

1 Lämmastiku kõrvaldamine

1.1 Sissejuhatus lämmastikuärastusse

Vesikeskkonnas esineb lämmastik enamasti neljas vormis: orgaaniline lämmastik (N_{org}), lahustunud ammooniumlämmastik (omavahel tasakaalus olev ammooniumioon NH_4^+ ja ammoniaak NH_3), nitraat (NO_3^-) ja nitrit (NO_2^-). Inimtekkeline lämmastik jõuab reovette peamiselt valgulise päritoluga orgaaniliste ühendite koostises, mida inimene väljutab kanalisatsiooni urea ehk karbamiidina (CN_2H_6), mis laguneb kanalisatsioonis kiiresti ammooniumlämmastikuks (NH_4^+ -N). Seega jõuab lämmastik kanalisatsiooni redutseeritud vormis orgaanilise ja ammooniumlämmastikuna. Neid kahte lämmastikukomponenti saab summaarselt mõõta ka Kjehldahli lämmastikuna (ingl *total Kjeldahl nitrogen* – TKN). Reovees sisalduv lämmastik muundub nitritiks ja nitraadiks alles oksüdeerumisel aeroobses reoveepuhastis või looduskeskkonnas. Vesikeskkonnas leiduvate lämmastikuvormide olulisust on kirjeldatud tabelis 8.1.

Käesolevas jaotises käsitletakse põhjalikumalt lämmastikuärastuse enimlevinud tehnoloogiaid ja nende protsesside aluseid aktiivmudapuhastuses. Lämmastikuärastuse toimimist biokilepuhastites ja looduslähedastes puhastussüsteemides on käsitletud käsiraamatu jaotistes 10 ja 11. Käesoleva peatüki lõpus tuuakse lühidalt välja mõned uudsemad või ka vähem kasutatud lämmastikuärastuse tehnoloogiate alternatiivsed lahendused nagu autotroofne deammonifikatsioon ja sadestamine.

Tabel 8.1 Vesikeskkonnas leiduvate stabiilsete lämmastikuvormide olulisus ja tüüpiline sisaldus

Lämmastikuvorm	Olulisus
Orgaaniline lämmastik N_{org}	N_{org} hõlmab orgaaniliste ainete koosseisus olevat lämmastikku (urea, valgud, aminohapped, nukleiinhapped, mõned suhkrud). See on ainus mittelahustunud lämmastiku vorm. Mikroorganismid lagundavad N_{org} ammooniumlämmastikuks. Sisaldus olmereovees 15–50 mgN/l. Sisaldus reoveepuhasti väljavooluvees 1–2 mgN/l.
Ammooniumlämmastik NH_4 -N	Ammooniumlämmastik tekib vette N_{org} lagunemisel. Ammooniumioon (NH_4^+) ja ammoniaak (NH_3) on vesilahuses tasakaalus ning nende omavaheline proportsioon sõltub pH-st. Ammoniaak, mis tekib vette aluselises keskkonnas kõrgema pH korral, on vee-elustikule toksiline ning inhibeerib suurema sisalduse puhul ka biopuhastusprotsesse. Sisaldus olmereovees 30–50 mgN/l. Sisaldus lämmastikuärastusega reoveepuhasti väljavooluvees 0,5–2 mgN/l.
Nitrit- ja nitraatlämmastik NO_2 -N ja NO_3 -N	Nitrit- ja nitraatlämmastik on lämmastiku oksüdeeritud vormid. Nitritlämmastik on ammooniumlämmastiku oksüdeerumise

Lämmastikuvorm	Olulisus
	<p>vaheühend ning selle esinemine viitab oksüdeerimisprotsesside inhibeerimisele või ülekoormatud puhastusprotsessile. Nitrit on elusorganismidele toksiline.</p> <p>Nitraatlämmastik on oksüdeerimisprotsesside lõppsaadus.</p> <p>Olmereoveepuhasti sissevooluvees nitraat- ja nitritlämmastikku ei leidu, väljavooluvees on nende tavapärase sisaldus:</p> <p>lämmastikuärastuse korral 6–13 mgN/l; denitrifikatsioonita 30–60 mgN/l; suure koormuse korral nitrifikatsioonita 0–10 mgN/l.</p>

Lämmastikku on reoveest mõnevõrra keerulisem kõrvaldada kui KHT-d, orgaanilisi aineid ja fosforit, sest tavapäraselt on selleks vaja kaht erinevate mikroorganismide poolt vahendatud protsessi, suuremat mudavanust, suuremaid reaktoreid, rohkem ringlusvoogude pumpamist ja protsessi hoolikamat jälgimist. Lämmastikuärastuse puhul tuleb arvestada peale reovees sisalduva lämmastiku ka orgaanilise aine sisaldust, s.o lämmastiku ja süsinikuühendite omavahelisest proportsiooni.

Reoveepuhastis hõlmab lämmastikuärastus kolme eri protsessi. Esmalt kasvab orgaanilise aine aeroobsel heterotroofselt lagundamisel biomass, mis sisaldab orgaanilist lämmastikku. Kui see biomass kõrvaldatakse protsessist liigmudana, toimib see esmatasandi lämmastikuärastusena. Täiendava tõhustatud lämmastikuärastuse jaoks on protsessi esimene etapp nitrifikatsioon, milles autotroofsed nitrifitseerivad mikroorganismid oksüdeerivad lämmastikuühendid nitrit-lämmastikuks ($\text{NO}_2\text{-N}$) ja nitraatlämmastikuks ($\text{NO}_3\text{-N}$). Nitrit- ja nitraatlämmastik kõrvaldatakse molekulaarse lämmastikuna (N_2) reoveest denitrifikatsiooni-protsessis. Kahe viimase protsessi jaoks on aktiivmudapuhastites kõige levinum tehnoloogiline lahendus eel-denitrifikatsiooniga lämmastikuärastus.

Aktiivmudapuhasti sissevooluvees jaguneb lämmastik ($C_{N,SV}$) järgmiselt:

$$C_{N,SV} = S_{\text{Norg},VV} + S_{\text{NH}_4,VV} + S_{\text{NO}_3,VV} + S_{\text{NO}_2,VV} + X_{\text{Norg},BM} + S_{\text{NO}_3,DN} \quad (\text{mgN/l}), \quad (8.1)$$

kus $S_{\text{Norg},VV}$ on väljavooluvee orgaanilise lämmastiku sisaldus, $S_{\text{NH}_4,VV}$ – väljavooluvee ammoniumlämmastiku sisaldus, $S_{\text{NO}_3,VV}$ – väljavooluvee nitraatlämmastiku sisaldus, $S_{\text{NO}_2,VV}$ – väljavooluvee nitritlämmastiku sisaldus, $S_{\text{Norg},BM}$ – biomassi seotav lämmastik ning $S_{\text{NO}_3,DN}$ – puhastusprotsessis denitrifitseeritav nitraatlämmastik.

Väljavooluvee orgaaniline lämmastik ($S_{\text{Norg},VV}$) on lahustunud orgaanilises aines (KHT fraktsioonis $S_{\text{KHT},\text{inert}}$; vt joonist 7.5) sisalduv biolagunematu lämmastik, mis kandub biopuhastusest välja lahustunud ainaena. See on lämmastikuosa, mida pole võimalik puhastusprotsessis oluliselt muuta.

Tavapäraselt on olmereoveepuhasti väljavooluvee orgaanilise lämmastiku sisaldus 1–2 mg/l, mis võib tööstusreovee osakaalust sõltuvalt ka suurem olla.

Väljavooluvee ammoniumlämmastiku sisaldus on suur kõrgelt koormatud, väikese mudavanusega reoveepuhastites, milles nitrifikatsiooni ei toimu. Seda leidub ka lämmastikuärastusega reoveepuhastite väljavooluvees madalate käitamistemperatuuride või aktiivmuda inhibitsiooni puhul. Tavaliselt projekteeritakse lämmastikuärastusega reoveepuhastite nitrifikatsiooniprotsessi aktiivsus nõnda, et väljavooluvee ammoniumlämmastiku sisaldus ($S_{\text{NH}_4, \text{VV}}$) oleks alla 1 mgN/l.

Biomassi koosseisu minev lämmastik ($X_{\text{Norg, BM}}$) sõltub tekkiva aktiivmuda hulgast ning seega peamiselt puhasti orgaanilise aine koormusest. Reoveepuhasti väljavooluvees on nitritlämmastikku tavaliselt väga vähe (ligikaudu 0 mgN/l) ning nitrifikatsiooniprotsessi tulemiks on nitraatlämmastik. Kui nitritlämmastiku on rohkem, viitab see sellele, et puhastis pole tõhusat nitrifikatsiooni või denitrifikatsiooni.

Olmereoveepuhastite väljavooluvees on neid lämmastikuühendeid ($S_{\text{Norg, VV}}$, $N_{\text{NH}_4, \text{VV}}$), mille sisaldust protsessiga vähendada ei saa, kokku ligikaudu 3 mgN/l. Samuti ei ole võimalik puhasti käitamisel olulisel määral muuta biomassi seotud orgaanilise lämmastiku osakaalu. Valemi 8.1 ülejäänud kahe komponendi ($S_{\text{NO}_4, \text{VV}}$ ja $S_{\text{NO}_3, \text{DN}}$) omavaheline proportsioon mõjutab olulisel määral puhasti väljavooluvee lämmastikusisaldust. Denitrititserimata nitraatlämmastik jõuab puhasti väljavoolu vette, seega sõltub reoveepuhasti väljavooluvee lämmastikusisaldus valemi 8.1 komponentidest.

1.2 Lämmastiku sidumine biomassi

Kui heterotroofsed mikroorganismid aeroobselt lagundavad orgaanilist ainet, tekib biomassi juurde. Kuna mikroorganismide poolt seotud süsiniku ja lämmastiku suhe on organismide kooslusest sõltumata suhteliselt sarnane, sõltub seotud lämmastik puhastusprotsessis tekkinud biomassi kogusest.

Saksamaa reoveeühingu DWA standardi DVWK-A 131E [1] kohaselt seotakse olmereoveepuhasti aktiivmudaprotsessis 4–5 % ärastatud BHT-st ($X_{\text{orgN, LM}} = 0,04-0,05 \cdot C_{\text{BHT, SV}}$) või 2–2,5 % ärastatud KHT-st ($X_{\text{orgN, LM}} = 0,02-0,025 \cdot C_{\text{KHT, SV}}$) biomassi ning võetakse liigmudana välja.

Detailsema lähenemise korral võib lämmastiku biomassi sidumist hinnata KHT fraktsioonipõhise mudatekke järgi. Lähtuvalt reoveepuhasti biomassi tekke käsitlest aktiivmudapuhastusele pühendatud jaotises 7.4 (vt joonis 7.5) sõltub aktiivmudaprotsessis tekkiv biomass ($X_{\text{KHT, LM}}$) reovee

orgaanilise aine fraktsioonidest. Biomassi seotakse see osa reovees olevast lämmastikust, mida on vaja mikroorganismide kasvuks (seotud fraktsioonidega $X_{KHT,BM}$ ja $X_{KHT,inert,BM}$). Seega sõltub ka liigmudasse akumulunud lämmastiku sisaldus eelkõige heterotroofsete, süsinikuühendeid lagundavate mikroorganismide kasvust ning nendes seotud lämmastikku sisaldavate fraktsioonide ($X_{N,BM}$ ja $X_{N,inert,BM}$) osakaalust teiste liigmudasse akumulervate fraktsioonide ($X_{KA,LM}$) suhtes.

Näidisülesanne. *Kui suur on aktiivmudapuhasti väljavooluvee ligikaudne lämmastiksisaldus, kui puhasti sissevooluvee mõõdetud BHT- ja üldlämmastiksisaldused on vastavalt $C_{BHT,SV} = 400 \text{ mg/l}$ ja $C_{N,SV} = 70 \text{ mgN/l}$? Reoveepuhastis ei ole rakendatud tõhustatud lämmastikuärastust.*

Kui aktiivmudapuhastis ei ole tõhustatud lämmastikuärastust, väheneb sissevooluvee lämmastikuärastus ainult biomassi seotud lämmastiku arvel. Kuna biomassi seotakse lämmastikku ligikaudu 4–5 % ärastatud BHT kohta, väheneb lämmastiksisaldus nõnda: $X_{orgN,LM} = 0,04\text{--}0,05 \cdot C_{BHT,SV} = 0,04\text{--}0,05 \cdot 400 \text{ mgN/l} = 16\text{--}20 \text{ mgN/l}$. Seega on sellise reoveepuhasti väljavooluvee lämmastiksisaldus 50 kuni 54 mgN/l.

1.3 Nitrifikatsioon

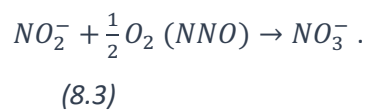
Nitrifikatsioon on bioloogiline protsess, milles ammooniumioon oksüdeeritakse nitritiks ja nitraadiks. Seda keemilist reaktsiooni viivad reoveepuhastis läbi autotroofsed mikroorganismid, mille süsinikuallikaks (anabolism) on lahustunud süsihappegaas (CO_2) ning energiaallikaks (katabolism) ammooniumi oksüdeerimine molekulaarse hapnikuga. Võrreldes heterotroofsete mikroorganismidega on autotroofsete organismide metaboolsed protsessid vähem tõhusad, sest nende kasvukiirus ja saagis on ligikaudu viis korda väiksemad. Seega peab mudavanus reoveepuhastis olema nitrifikatsiooni toimimiseks suurem, kui seda oleks vaja süsinikuühendite lagundamiseks, ning seeläbi määrab nitrifikatsiooni aktiivsus ka aktiivmudapuhasti minimaalse mahu.

Nitrifitseerivateks organismideks on peetud baktereid perekondadest *Nitrosomonas* ja *Nitrobakter*, viimasel ajal on aga leitud, et seda protsessi vahendavad mitmed muudki mikroorganismiperekonnad. Ammooniumi oksüdeerivaid (nitriteerivaid) organisme nimetatakse ANO-deks ning nitritit oksüdeerivaid (nitrateerivaid) organisme NNO-deks.

1.3.1 Nitrifikatsiooni stöhhiomeetria

Nitrifikatsioon toimub kahe järjestikuse oksüdeerimisreaktsiooni jadana: ANO-d oksüdeerivad ammooniumiooni nitritiks ning NNO-d nitriti nitraadiks. Tavaliselt on ANO-de kasvukiirus NNO-de omast suurem ning seetõttu nitrititseeritakse kogu ammooniumlämmastik nitraadiks.

Kaheastmelise nitrifikatsiooni stöhhiomeetriselised reaktsioonid on kirjeldatavad järgmiselt:



Stöhhiomeetriselt kulub nitriti (nitritatsioonil) ja nitraadi tekkel (nitratsioonil) ühe lämmastikuaatomi kohta vastavalt 3/2 ja 1/2 hapnikumolekuli. Arvestades hapniku ja lämmastiku molekulmasside suhet 32/14, kulub ühe grammi ammooniumlämmastiku oksüdeerimiseks nitritiks $3/2 \times 32/14 = 3,43$ g ja nitritlämmastiku oksüdeerimiseks nitraadiks $1/2 \times 32/14 = 1,14$ g hapnikku. Ühe grammi lämmastiku oksüdeerimise hapnikutarve on kokku 4,57 mgO₂/mgN.

Reaktsioonivõrrandi (8.2) kohaselt tekib nitritatsiooni käigus kaks vesinikiooni (H⁺). Seega võib reovee suure lämmastikusisalduse puhul nitrifikatsiooni tulemusena pH puhastis alaneda. Seda tasakaalustab reovee leelisus (puhvermahtuvus), mis tuleneb eelkõige karbonaatsete soolade sisaldusest. Ammooniumlämmastiku oksüdeerimisel väheneb leelisus 7,14 mg CaCO₃/mgN või -1/7 mekv /mgN võrra.

1.3.2 Nitrifikatsiooni kineetika

Nitrifikatsioon on kaheastmeline protsess ning enamasti on reoveepuhasti aktiivmudas olemas nii ANO kui ka NNO organismid. Tavapärastes puhasti toimimise tingimustes on ammooniumi oksüdeerimine nitritiks ANO toimel aeglasem kui NNO vahendatud nitriti oksüdeerimine nitraadiks. Seega on peaaegu alati reoveepuhastis nitrifikatsiooni limiteeriv etapp nitritatsioon ning kogu tekkinud nitrit oksüdeeritakse nitraadiks. Nitriti üle 1 mgN/l suurune akumulatsioon lämmastikuärastusega puhastis viitab protsessihäiringule, inhibitsioonile või ülekoormatud puhastile. Seega võib ka nitrifikatsiooni kineetika käsitlemisel lihtsustatult arvestada ainult ANO sooritatud nitritatsiooniprotsessiga ja arvestada, et tekkinud nitrit oksüdeeritakse kiiremini nitraadiks kui nitrit tekib.

Nitrifikatsiooni kineetika allub bakterite tavapärasele kineetikale, mida iseloomustavad 6. jaotises käsitletud Michaelis-Menteni ja Monod sõltuvused. Lähtuvalt nitritatsiooni reaktsioonivõrrandist sõltuvad nitrifikatsiooni tõhusus ja mikroorganismide kasv ammooniumlämmastiku- ja hapnikusisaldusest. Nitrifikatsiooni kasvu kiirus:

$$\mu_{ANO} = \frac{\mu_{ANO,max} \cdot S_{NHx}}{K_{ANO} + S_{NHx}},$$

(8.4)

kus μ_{ANO} on ANO-de kasvu kiirus (1/d), $\mu_{ANO,max}$ – kasvu maksimaalne kiirus (1/d), K_{ANO} – reaktsiooni iseloomustav konstant, mis vastab ammooniumlämmastiku sisaldusele poole maksimumkiiruse puhul (mgN/l) ning S_{NHx} – ammooniumlämmastiku sisaldus (mgN/l).

Joonisel 8.1 on kujutatud ANO aktiivsuse sõltuvus ammooniumisisaldusest, mis arvestab tavapäraselt aktsepteeritud nitrifikatsiooni kiiruskonstanti $K_{ANO} = 1$ mgN/l ning maksimaalset kasvu kiirust $\mu_{ANO,max} = 0,45$ (1/d). Väiksemate sisalduste korral reaktsiooni kiirus väheneb. Kui ammooniumi sisaldus on 1 mgN/l, on nitrifikatsiooni aktiivsus 50% maksimaalsest. Seetõttu dimensioneeritakse reoveepuhastid tavaliselt nõnda, et väljavooluvette võib jõuda 1 mgN/l ammooniumlämmastikku.

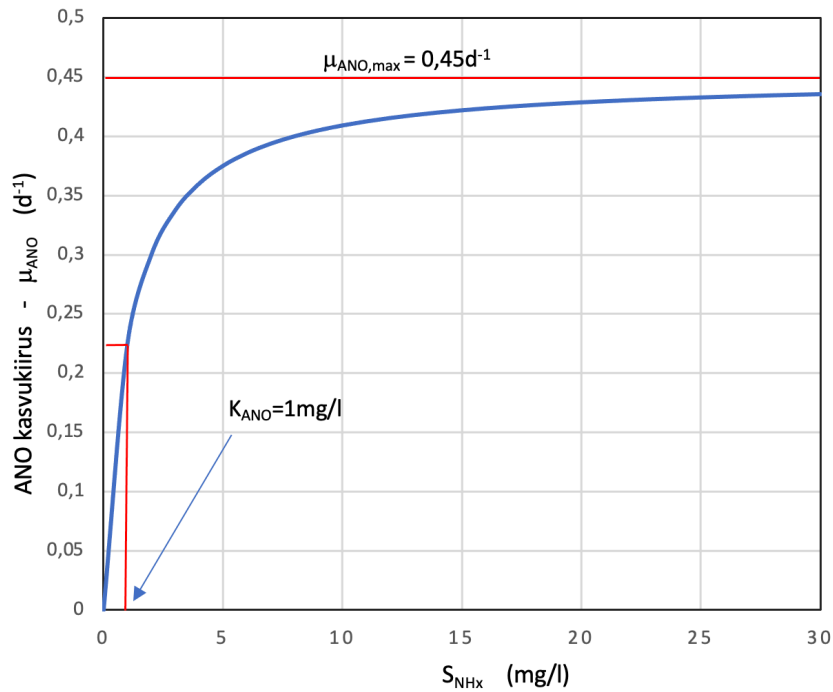
Kui väikese ammooniumioonisalduse puhul väheneb nitrifikatsiooni kiirus substraadi limitatsiooni tõttu, siis suurema sisalduse korral läheneb kasvukiirus $\mu_{ANO,max}$ väärtusele.

Ammooniumlämmastiku vormid sõltuvad pH-st. Mida kõrgem on pH, seda suurem on ammoniaagi osakaal (vt jaotist 2). Kuna ammoniaak on aga mikroorganismidele suuremate sisalduse puhul inhibeeriv, avaldub ammooniumlämmastiku suurema sisalduse korral ka nitrifikatsiooni inhibitsioon. Seega ei arvesta joonisel 8.1 kujutatud protsessi aktiivsuse sõltuvus ammooniumlämmastiku sisaldusest siiski ammoniaagi inhibitsiooni ning sõltuvalt pH-st hakkab protsessi aktiivsus alates mõnesaja mg/l suurusest ammooniumisisaldusest vähenema.

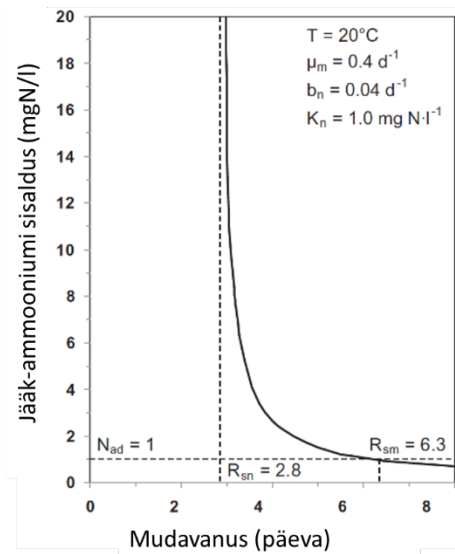
Aktiivmudaprotsessis saab väljavooluvette jõudva ammooniumi sõltuvuse üle kanda muda vanusesse. Mida suurem on muda vanus, seda väiksem on selle lämmastikukoormus ning seetõttu ka jääkammooniumisisaldus. Joonisel Joonis 8.2 on kujutatud heitvee ammooniumlämmastikusisalduse sõltuvus aktiivmudapuhasti muda vanusest temperatuuril 20°C [2].

Nitrifikatsiooni kavandamisel arvestatakse täiendavaid varutegureid, mis arvestavad reovee võimalikku inhibitsiooni, pH-d ning temperatuuri ja sissevooluvee lämmastikusisalduse lühiajalist kõikumist. Arvestatakse ka seda, et mida väiksem on reoveepuhasti, seda suuremad on kõikumised. Muutuvastes tingimustes kavandatakse puhastid mõnevõrra suurematena, võttes mudavanuse

varuteguriks 1,45 kuni 1,8. Oluline on ka temperatuuri valik. Saksamaa ATV standard [1] näeb ette, et nitrifikatsiooniks vajalik aeroobse muda vanus protsessi temperatuuril 12 °C on väiksematel reoveepuhastitel (< 20 000 ie) 8,2 d ning suurematel (> 100 000 ie) 6,6 d.



Joonis 8.1 Nitrifitseerivate organismide kasvukiiruse sõltuvus vee ammooniumlämmastikusisaldusest temperatuuril 20°C



Joonis 8.2 Jääk-ammooniumi sisalduse sõltuvus aeroobse muda vanusest aktiivmudaprotsessis temperatuuril 20°C

1.3.3 Nitrifikatsiooni hapnikutarve

Vastavalt reaktsioonivõrranditele 8.2 ja 8.3 sõltub nitrifikatsiooni määr lahustunud hapniku sisaldusest ning selle matemaatiliseks kirjeldamiseks saab rakendada Monod' sõltuvust:

$$\mu_{ANO,O} = \frac{\mu_{ANO,max,O} \cdot S_{O_2}}{K_{ANO,O} + S_{O_2}},$$

(8.5)

kus $\mu_{ANO,O}$ on ANO-de kasvu kiirus, kui hapnikusisaldus on S_{O_2} (1/d), $\mu_{ANO,max,O}$ – kasvu maksimaalne kiirus (1/d), $K_{ANO,O}$ – reaktsiooni iseloomustav konstant, mis vastab hapnikusisaldusele poole maksimaalse kasvukiiruse juures (mgO_2/l) ning S_{O_2} – hapnikusisaldus (mgO_2/l).

Võrrandi $K_{ANO,O}$ -väärtust on mõõdetud vahemikus 0,3 kuni 2 mgO_2/l , mis tähendab seda, et sellise hapnikusisalduse puhul on nitrifikatsiooni aktiivsus 50% maksimaalsest. Suur väärtusvahemik on seletatav sellega, et vee hapnikusisaldus ei ole võrdne mudahelbe hapnikusisaldusega. Kuna hapnikku tarvivad nii nitrifitseerijad kui ka orgaanilisi aineid lagundavad heterotroofsed mikroorganismid, väheneb mudahelbe hapnikusisaldus ning see mõjutab ka nitrifikatsiooni aktiivsust [3]. Mida suurem on mudahelbes, seda suurem on vee ja mudahelbe lahustunud hapniku sisalduse erinevus. Enamasti ei ole aktiivmudapuhasti õhustuskambri vee hapnikusisaldus täiesti ühtlane ning esineb väiksema sisaldusega piirkondi.

Hapnikusisalduse suurendamine ei inhibeeri nitrifitseerivaid organisme. Reoveepuhasti õhustuskambri suurem hapnikusisaldus ka nitrifikatsiooni, kuid üleõhustamine raiskab elektrit. Üldjuhul loetakse nitrifikatsiooni toimimiseks piisavaks lahustunud hapniku sisalduseks 2 mgO_2/l .

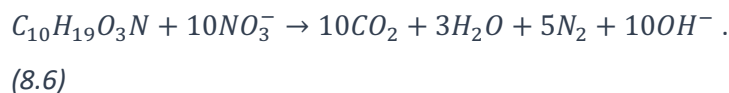
1.4 Denitrifikatsioon

Denitrifikatsioon on nitraadi või nitriti bioloogiline redutseerimine atmosfääri lenduvaks molekulaarseks lämmastikuks (N_2). Redutseerijana kasutatakse orgaanilisi aineid. Denitrifikatsiooni vahendavad mikroorganismid on fakultatiivsed heterotroofid, kes saavad orgaaniliste ainete lagundamiseks kasutada nii hapnikku kui ka nitraati ja nitritit. Aeroobsetes tingimustes kasutavad nad aga oksüdatsioonireaktsioonis molekulaarset hapnikku. Seega on denitrifikatsiooni toimumiseks vaja anoksilisi tingimusi (vt ka jaotist 6.2.3), sest lahustunud hapnik inhibeerib denitrifikatsiooni.

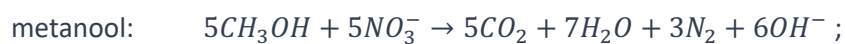
Heterotroofide saagis ja kasvukiirus on suurem kui nitrifitseerivatel autotroofsetel organismidel ning nitrifitseeriva aktiivmuda puhul on biomassis olemas ka denitrifitseerivad organismid, mistõttu ei ole reoveepuhasti muda vanus denitrifikatsiooni piirav tegur.

1.4.1 Denitrifikatsiooni stöhiomeetria

Kuna denitrifikatsioonis on nitraati redutseerivad orgaanilised ained väga erinevad, on ka selle reaktsiooni kirjeldamise stöhiomeetrilised valemid iga aine jaoks erinevad. Kuna sageli kasutatakse reovee biolaguneva orgaanilise aine üldvalemist $C_{10}H_{19}O_3N$, võib ka denitrifikatsioonireaktsiooni kirjeldada alljärgnevalt [4]:

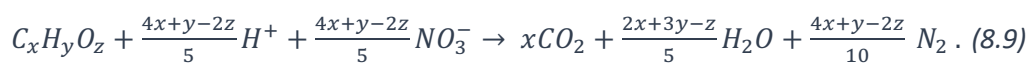


Denitrifikatsiooniks kasutatakse välise süsinikuallikana sageli metanooli või äädikhapet:

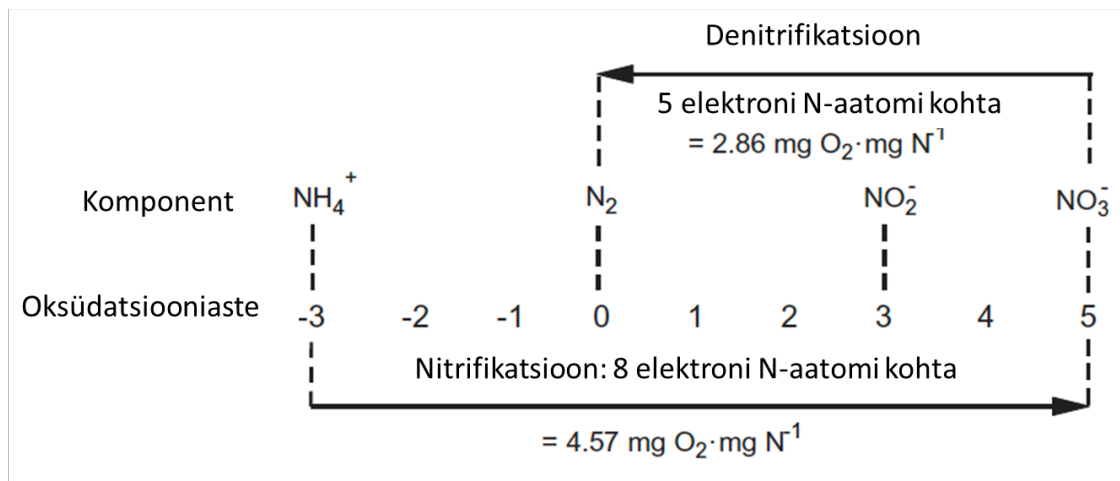


(8.8)

Iga orgaanilise aine jaoks saab kasutada orgaaniliste ainete üldvalemist $C_xH_yO_z$ ning seeläbi saab denitrifikatsiooni reaktsiooni kirjeldada stöhiomeetrilise võrrandiga:



Nitrifikatsioon ja denitrifikatsioon on vastandreaktsioonid. Reovees sisalduva orgaanilise lämmastiku ja ammoniumlämmastiku oksüdatsiooniate on mõlemal -3. Nitrifikatsioon on ammoniumlämmastiku oksüdeerimisreaktsioon, milles lämmastiku aatom loovutab kaheksa elektroni ning liidab kokku kolm hapnikuaatomit. Selle protsessi tulemusel on lämmastiku oksüdatsiooniate +5. Denitrifikatsioon on aga nitraatlämmastiku redutseerimisreaktsioon, milles lämmastikuaatom liidab viis elektroni ning oksüdatsiooniate väheneb nullini. Denitrifikatsioonis on nitraatioon ise oksüdeerija. Kui nitrifikatsioonil kulub ühe lämmastiku grammi kohta 4,5 g hapnikku, siis denitrifikatsioon vähendab reoveepuhasti süsinikuärastuse hapnikukulu 2,8 gO₂/gN (joonis 8.3).



Joonis 8.3. Lämmastikuühendite oksüdeerimine ja redutseerimine nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni käigus ning nende oksüdatsiooniastmete skemaatiline seletus

Nitrifikatsiooni- ja denitrifikatsiooniprotsesse on võrreldud tabelis 8.2.

Tabel 8.2. Aktiivmudas toimuvate nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni redoksreaktsioonide võrdlus

Parameeter	Nitrifikatsioon	Denitrifikatsioon
Substraat	Ammooniumioon (NH_4^+)	Nitraatioon (NO_3^-)
Lämmastikuaatomi roll	Elektronidoonor	Elektroniaktseptor
Reaktsioon	Oksüdeerimine	Redutseerimine
Reaktsiooni vahendav organism	Autotroofne	Heterotroofne
Reaktsioonikeskkond	Aeroobne	Anoksiline
Hapnikutarve	4,57 gO ₂ /gN	Hapnikutarve väheneb: -2,86 gO ₂ /gN

1.4.2 Denitrifikatsioonitingimused

Kuna nitrifikatsiooniks peab aktiivmuda vanus suur olema, on aktiivmudapuhastis olemas ka denitrifikatsiooni toimimiseks vajalikud fakultatiivsed heterotroofsed mikroorganismid. Kuna nitrifitseerivad organismid on inhibitsiooni suhtes tundlikumad kui denitrifitseerivad organismid, ei ole üldiselt nitrifikatsiooni toimumisel probleeme denitrifitseerivate organismide olemasoluga aktiivmudas.

Kuna heterotroofid kasutavad eelistatult hapnikku, peab denitrifikatsiooni toimumiseks nitraadi olemasolul hapnikusisaldus olema väga väike. On ka leitud, et aktiivmudas ja eelkõige biokiles ja graanulmudas tekib hapnikugradient ning helbe sisemistes kihtides on hapnikusisaldus oluliselt väiksem kui lahustunud faasis. Sageli piisab sellest, et isegi märkimisväärse lahustunud hapnikusisalduse korral võib mudahelbe sisemistes kihtides või reaktori halvasti õhustatud tsoonides valitseda denitrifikatsiooniks sobivad tingimused. Üldiselt on täheldatud, et alates lahustunud hapnikusisaldusest 0,2–0,5 mgO₂/l väheneb märgatavalt denitrifikatsiooni aktiivsus [2].

Denitrifikatsiooni toimimiseks piisab väga väikesest nitraadisisaldusest: juba 0,5 mgN/l-st piisab maksimaalse reaktsioonikiiruse saavutamiseks.

Denitrifikatsioon toimub tõhusalt neutraalses pH vahemikus (7–8,5). Reaktsioon on oluliselt pärsitud, kui $\text{pH} > 8,5$ või $\text{pH} < 6$. Kuna nitrifikatsioon alandab pH-d (vt jaotist 8.3), võib protsess reovee väikese leelisuse ja sissevooluvee suure lämmastikusisalduse puhul happeliseks muutuda. Madala pH puhul on inhibeeritud ka nitrifikatsioon, mis on eeltingimus denitrifikatsiooni toimimiseks reoveepuhastis. Teisalt tekib denitrifikatsioonireaktsioonis hüdroksüülioon, mis omakorda alandab pH-d (vt valemit 8.6).

1.4.3 Orgaaniliste ainete piirang denitrifikatsioonil

Denitrifikatsioonis saavad fakultatiivsed heterotroofsed organismid kasutada orgaanilisi aineid tinglikult kolmest allikast, mida orgaanilise aine lagundamise jaotises kirjeldati fraktsioonidena $S_{\text{KHT,biolag,sv}}$, $X_{\text{KHT,biolag,sv}}$ ning $X_{\text{KHT,BM}}$ (vt joonist 7.5). Nendest kaks esimest on seotud reovees leiduva orgaanilise ainega ning $X_{\text{KHT,BM}}$ on mikroorganismide biolagunev orgaaniline aine, mida denitrifitseerivad organismid saavad nende suremisel või lagunemisel oksüdeerida.

Denitrifikatsiooni kineetika ja reaktsioonikiirus nende kolme fraktsiooni suhtes on erinev. Lahustunud biolagunev orgaaniline aine ($S_{\text{KHT,biolag,sv}}$) sisaldab üldiselt väikseid orgaanilisi molekule, mis läbivad kergesti rakumembraani ning see fraktsioon on mikroorganismide jaoks kergesti kättesaadav. Nad biolagunevad kiiresti ning denitrifikatsiooni kiirus selle fraktsiooni suhtes on kõige kiirem. Kusjuures lagunemise kiirus ei erine märkimisväärselt sellest, kas orgaanilisi aineid oksüdeeritakse hapniku või nitraadiga [5]. Heljumis olev orgaanilise aine fraktsioon ($X_{\text{KHT,biolag,sv}}$) on aga aeglaselt biolagunev ning need orgaanilise aine molekulid ei pääse otse läbida rakumembraani. Selleks et mikroorganismid saaksid kasutada neid denitrifikatsioonil, peavad heljumis või kolloidosakestes olevad pikemad molekulid esmalt rakuväliste ensüümide toimele lagunema lühemateks lahustunud orgaanilisteks molekulideks ehk hüdrolüüsumaks. See hüdrolüüsireaktsioon on aga aeroobsetes tingimustes ligikaudu kolm korda kiirem kui anoksilistes oludes. Sellest tulenevalt on denitrifikatsiooni kiirus $S_{\text{KHT,biolag,sv}}$ suhtes ligikaudu 7–10 korda suurem võrreldes süsinikuallikaga $X_{\text{KHT,biolag,sv}}$. Denitrifikatsioon saab toimuda ka mikroorganismide orgaanilise aine fraktsiooni ($X_{\text{KHT,BM}}$) arvel. Ka selle süsinikuallika kasutamisel on reaktsioonikiirus väike, kuid see protsess põhjustab sageli puhasti käitamisel soovimatut denitrifikatsiooni, näiteks järelsetitis.

Reoveepuhasti väljavooluvee lämmastiku piirmäära saavutamiseks vajaliku denitrifitseeritava lämmastikusisalduse saab tuletada valemist 8.1 alljärgnevalt:

$$S_{NO_3, DN} = C_{N, SV} - S_{Norg, VV} + S_{NH_4, VV} + S_{NO_3, VV} + S_{NO_2, VV} + X_{Norg, BM} \quad (\text{mgN/l}).$$

(8.10)

Selleks et hinnata, kas reoveepuhasti väljavooluvee piirmäärade saavutamiseks vajaliku nitraadisalduse saab sissevooluveega puhastisse jõudva orgaanilise ainega vajalikul määral denitrititseerida, tuleb analüüsida orgaanilise aine ja denitrititseeritava lämmastiku omavahelist suhet. Tööstusreovee puhul on nitrifikatsiooni käsitlemisel soovitatav määrata orgaanilise aine fraktsioonid ning protsessi detailsem analüüs toimub enamasti modelleerides. Kuigi ka olmereovee puhul on soovitatav alustada KHT fraktsioneerimisest, saab kasutada ka lihtsustatud empiirilist lähenemist.

BHT-põhise lähenemise korral saab suhte $S_{NO_3, DN}/C_{BHT, SV}$ järgi hinnata, kas sissevooluga puhastisse jõudvast orgaanilisest ainest piisab denitrifikatsiooniks [1]. Tabelis 8.3 on esitatud maksimaalsed $S_{NO_3, DN}/C_{BHT, SV}$ suhted denitrifikatsioonimahuti ja õhustusmahuti erinevate omavaheliste suhete korral. Mida suurem on denitrifikatsioonimahuti, seda aktiivsemalt kasutatakse denitrifikatsioonis süsinikuühendeid. Süsinikuühendite ärakasutamise tõhusus sõltub ka lämmastikuärastus- tehnoloogiast ning on suurem eel-denitrifikatsiooni rakendamisel.

Tabel 8.3. Denitrifikatsiooni süsinikuühendite vajadus väljendatuna denitrititseeritava nitraadi ja BHT suhtena erinevatel anoksilise mahuti ja kogu reaktori suhetel temperatuuril 10–12 °C (kg denitrititseeritavat nitraatlämmastikku kg sissevooluvee BHT₅ kohta) [1]

$\frac{V_{DN}}{(V_{DN} + V_N)}$	$S_{NO_3, DN}/C_{BHT_5, SV}$	
	Eel-denitrifikatsioon	Simultaan-denitrifikatsioon ja vahelduv denitrifikatsioon
0,2	0,11	0,06
0,3	0,13	0,09
0,4	0,14	0,12
0,5	0,15	0,15

Tabelist 8.3 järeldub, et mida väiksem on denitrifikatsioonimahuti ruumala, seda suurem on süsinikuühendite kadu ning eeldenitrifikatsioonitehnoloogia on muude lahendusega võrreldes tõhusam. Kui denitrifikatsioonimahuti moodustab 50% reaktorite mahust, kasutavad eri tehnoloogilised lahendused ühtemoodi maksimaalsel võimalikul määral süsinikuühendeid.

Juhul kui süsinikuühendeid ei ole piisavalt väljavooluvee vajaliku denitrifikatsioonimäärade saavutamiseks, tuleb proovida leida lahendus süsinikuühendite osakaalu suurendamiseks. Eelsetititega puhastitel võib selleks vähendada reovee viibeaega eelsetitis või juhtida osa reovett eelsetitist mööda. Denitrifikatsiooniprotsessi võib lisada täiendavalt orgaanilisi aineid. Kõige levinum

ja odavam on lisada metanooli, kuid lisatud on ka etanooli ja äädikhapet. Metanooli lisamisel tuleb arvestada, et tavalises reoveepuhastis on seda tarbivaid organisme vähe ning neid tuleb juurde pärast metanooli järkjärgulist annustamist.

Tabelis 8.4 on toodud väliste süsinikuallikate orgaanilise aine sisaldused väljendatuna KHT-na. Arvestada võib, et ühe kg denitrifitseeritava lämmastiku kohta on vaja lisada 5 kg KHT-na väljendatud välist süsinikku.

Tabel 8.4 Väliste süsinikuallikate KHT-sisaldus

Näitaja	Ühik	Metanool	Etanool	Äädikhape
Tihedus	kg/m ³	790	780	1060
KHT	kg/kg	1,50	2,09	1,07
KHT	kg/l	1,19	1,63	1,14

Näidisülesanne. Kas eeldenitrifikatsiooni lahendust kasutavas olmereoveepuhastis on võimalik saavutada väljavooluvee 10 mg/l suurust üldlämmastikuisaldust? Puhasti sissevooluvee näitajad on $C_{BHT5} = 400$ mg/l, heljumisisaldus $X_{KA} = 440$ mg/l, lämmastikuisaldus $C_{N,SV} = 80$ mgN/l ning eeldatav mudavanus puhastis 20 päeva? Puhastisse jõuab keskmiselt 1 500 m³ reovett päevas. Puhasti reaktorite ruumala on kokku 1500 m³, millest õhustuskamber on 1200 m³ ning denitrifikatsioonimahuti 300 m³ suur. Kas ja kui palju peab väljavooluvee 10 mgN/l suuruse lämmastikuisalduse saavutamiseks lisama protsessi metanooli?

Kõigepealt arvutame valemist 8.10, kui palju peab väljavooluvees olema denitrifitseeritavat lämmastikku. Arvestades seda, et biomassi seotakse lämmastikku keskmiselt 4,5% BHT-st, on $X_{Norg,BM} = 400 \cdot 0,045 = 18$ mgN/l. Väljavooluvee tavaline orgaanilise lämmastiku sisaldus on 2 mgN/l ning sõltuvalt koormusest on hästi toimivas nitrifikatsiooniga aktiivmudaprotsessis vee ammoniumlämmastikuisaldus kuni 1 mgN/l (võtkem 0,5 mgN/l). Väljavooluvee 10 mgN/l suuruse üldlämmastikuisalduse saavutamiseks peab väljavooluvees olema nitraatlämmastikku $S_{NO3,VV} = 10 - 0,5 - 2 = 7,5$ mgN/l, seega valemi 8.10 järgi $S_{NO3,DN} = 80 - 2 - 0,5 - 7,5 - 18 = 52$ mgN/l.

Arvutame tabelis 8.3 esitatud puhasti reaktorite suhte $\frac{V_{DN}}{(V_{DN}+V_N)} = \frac{300}{1200+300} = 0,2$. Seega on võimalik eeldenitrifikatsiooniga reoveepuhastis saavutada, et $S_{NO3,DN}/C_{BHT,SV} = 0,11$ gN/gBHT. See näitab, et kui protsessi sissevooluvee BHT-sisaldus on 400 mg/l, on võimalik denitrifitseerida $400 \text{ mgBHT/l} \cdot 0,11 \text{ mgN/mgBHT} = 44$ mgN/l. Kuna denitrifitseerida on vaja 52 mgN/l, jääb näite tingimustes denitrifitseerimata 8 mgN/l nitraatlämmastikku.

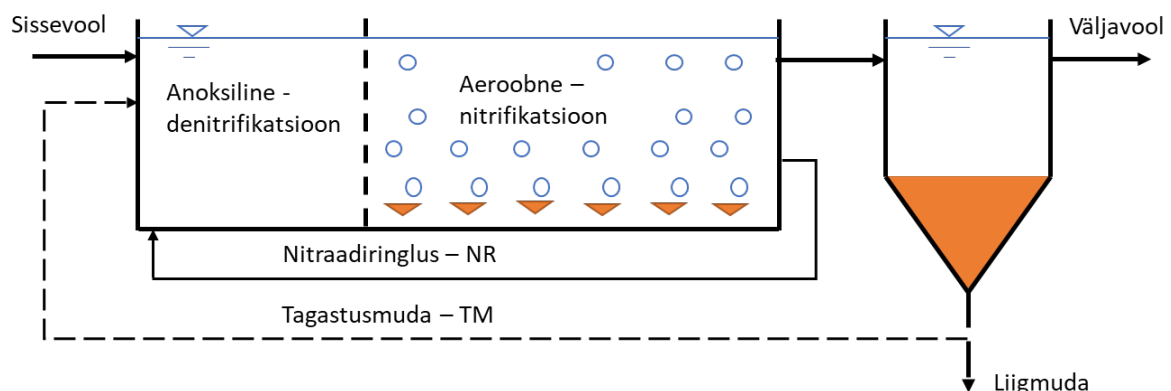
Kui võimalik, võiks sellisel reoveepuhastil suurendada denitrifikatsioonimahuti mahtu ning sel moel ära kasutada suurem osa BHT-s olevast süsinikust ($S_{NO3,DN}/C_{BHT,SV}$ on suurem). Kuna seda võimalust

ülesandes näidatud ei ole, tuleb lisasüsinikku annustada metanoolina, millega täiendavalt denitritseerida $8 \text{ mgN/l} \cdot 1500 \text{ m}^3/\text{d} = 12\,000 \text{ gN/d}$. Arvestades seda, et ühe grammi lämmastiku denitritseerimiseks kulub 5 gKHT-d ning tabeli 8.4 järgi on metanooli KHT-sisaldus $1,5 \text{ gKHT/g}$ metanooli, on vaja metanooli annustada $\frac{12 \text{ kgN/d} \cdot 5 \text{ kgKHT/kgN}}{1,5 \text{ kgKHT/gCH}_3\text{OH}} = 40 \text{ kgCH}_3\text{OH/d}$.

1.5 Eeldenitifikatsiooniga lämmastikuärastus

Eeldenitifikatsiooniga lämmastikuärastus on aktiivmudapuhastites kõige levinum tehnoloogiline lahendus. Protsess, mis töötati välja eelmise sajandi 60-ndatel aastatel ning mida nimetatakse ka tema autorite järgi täiustatud Ludzack-Ettingeri (lühendatult MLE – *Modified Ludzack Ettinger*) protsessiks [4], sageli ka A/O protsessiks (A – anoksiline, O – aeroobne ehk O_2).

Joonisel 8.4 on kujutatud eel-denitifikatsiooni rakendava reoveepuhasti tehnoloogiline skeem, milles kohaselt reovee ja tagastusmuda segu juhitakse esmalt mahutisse, milles toimub ainult aktiivmudasuspensiooni segamine. Sellest mahutist voolab suspensioon edasi õhustusmahutisse, milles toimub lämmastikuühendite nitrifikatsioon. Nitrifikatsiooni tulemusel tekkinud nitraat pumbatakse tagasi esimesse, denitifikatsioonimahutisse, milles saavad kokku nitraat ning sinna reoveega jõudvad süsinikuühendid ning kus toimub denitifikatsioon. Õhustusmahutis tekkinud nitraadi juhtimine denitifikatsioonimahutisse määrab selle mahuti anoksilised tingimused. Protsesside või loodud keskkonna järgi nimetatakse nitrifikatsioonimahutit sageli õhustusmahutiks või aeroobseks mahutiks ning denitifikatsioonimahutit anoksiliseks mahutiks.



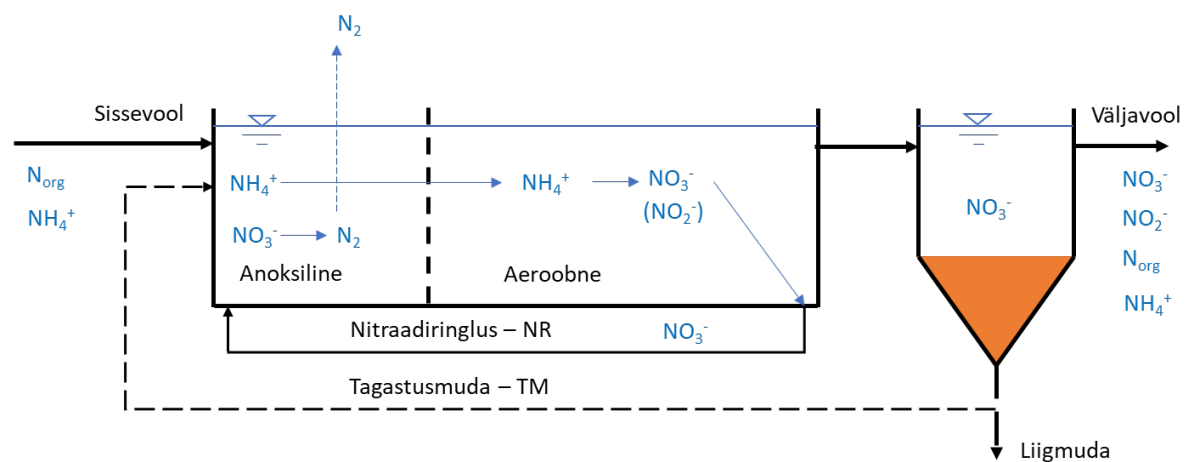
Joonis 8. 4 Eeldenitifikatsiooniga lämmastikuärastusega aktiivmudapuhasti skeem

1.5.1 Lämmastiku muundumine eel-denitifikatsiooniga lämmastikuärastuses

Lämmastikuühendite muundumist eeldenitifikatsiooniga reoveepuhastis on skemaatiliselt kujutatud joonisel 8.5. Puhastisse jõudvas reovees on nii orgaanilist lämmastikku (N_{org}) kui ka

ammooniumlämmastikku (NH_4^+). Nitraat- ega nitritlämmastikku olmereovees märkimisväärse koguses ei ole. Sissevoolu seguneb denitrifikatsioonimahutis tagastusmudaga ning kogu biolagunev orgaaniline lämmastik lagundatakse ammooniumlämmastikuks. Kuna mikroorganismid anoksilistes tingimustes ammooniumlämmastikku muundada ei saa, läbib see denitrifikatsioonimahuti muutumatul kujul. Kui reoveepuhasti muda vanus on selleks piisav, et aktiivmudas on ANO- ja NNO- organisme, oksüdeeritakse õhustusmahutis ammooniumlämmastik hapniku toel nitraatlämmastikuks (NO_3^-). Selleks et vabaneda nitraatlämmastikust, pumbatakse nitraati sisaldav aktiivmudasuspensioon õhustusmahuti lõpust tagasi denitrifikatsioonimahutisse. Reovees sisalduvad lagundamata orgaanilised ühendid redutseerivad nitraatlämmastiku molekulaarseks lämmastikuks (N_2), mis lendub gaasina atmosfääri. Kuna osa õhustusmahutis tekkivast nitraadist läheb järelsetiti kaudu väljavoolu, on kõige suurem osa väljavooluvette jõudvast lämmastikust enamasti nitraat. Kui nitrifikatsioon ei toimi tõhusalt või on inhibeeritud, võib väljavooluvees olla ka nitritlämmastikku (NO_2^-). Väljavooluvette jõuab ka mittebiolagunev orgaaniline lämmastik, mida on tavalises olmereoveepuhastis ligikaudu 2 mg/l. Ammooniumlämmastikku on hästi toimiva nitrifikatsiooniga reoveepuhasti väljavooluvees vähe (< 1 mgN/l).

Reoveepuhasti väljavooluvee kohta on kehtestatud üldlämmastikusisalduse piirmäär, ent kuna üldlämmastik koosneb neljast komponendist, ei piisa lämmastikuärastuse toimimise analüüsimisel üksnes selle määramisest, vaid määrata on vaja ka teisi lämmastikuvorme.



Joonis 8.5 Lämmastikuühendite muundumine eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastusega aktiivmudapuhastis

Aktiivmudapuhasti järelsetitis on lahustunud reoainete sisaldus sama, mis puhasti väljavooluvees. Kui järelsetitis on nitraadisaldus suur, hakkab mudahelvestes olevate süsinikuühendite toimel mudakihis toimuma denitrifikatsioon ning tekib gaasiline lämmastik N_2 . Kui aktiivmudasuspensiooni denitrifikatsioonimahutis segatakse ning tekib lämmastik pääseb kergesti mudahelvestest ja veekeskkonnast välja, jäävad gaasimullid järelsetitis mudakihti ning põhjustavad mudakerkeid.

Seetõttu on Eestis soovitatav rakendada lämmastikuärastust ka väiksemates reoveepuhastites, kus väljavooluvee lämmastikusisalduse piirmäärad seda otseselt ei nõua. Lämmastikuärastusega reoveepuhastites on reoveesette settimisomadused tavaliselt paremad ning sette eraldumine järelsetitis tõhusam.

1.5.2 Denitrifikatsiooni tõhusus

Eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastuse toimimise eelduseks on toimivad nitrifikatsioon ja nitraaditagastus ning sissevooluvee piisav orgaanilise aine sisaldus. Denitrifikatsiooni tõhusust saab mõjutada nitraaditagastusmääraga. Mida rohkem nitraati õhustusmahutist denitrifikatsioonimahutisse juhitakse, seda suurem on protsessi tõhusus. Kuna nitraat jõuab anoksilistesse tingimustesse nii järelsetiti tagastumuda (TM) pumpamise kaudu kui ka nitraadiringluse (NR) teel, tuleb arvutustes võtta arvesse mõlemad vood: summaarne nitraaditagastus $NT = TM + NR$. Tagastusnitraadi hulk arvutatakse aktiivmudaprotsessi juhitud vooluhulga suhtes. Saksamaa ATV-standardis tuginetakse denitrifikatsiooni tõhususe arvutamisel kuiva ilma kahe tunni maksimaalsele vooluhulgale. Nitraaditagastuse kordsus:

$$NT = \frac{Q_{TM}}{Q_{DW,2h,max}} + \frac{Q_{NR}}{Q_{DW,2h,max}},$$

(8.11)

kus Q_{TM} on tagastumuda vooluhulk, Q_{NR} – nitraadiringluse vooluhulk ning $Q_{DW,2h,max}$ – puhasti kuiva aja 2 tunni maksimaalne vooluhulk.

Denitrifitseerimiseks vajaliku summaarse nitraaditagastuskordsuse saab arvutada ka nitraadisisalduse kaudu:

$$NT = \frac{S_{NO_3,DN}}{S_{NO_3,VV}},$$

(8.12)

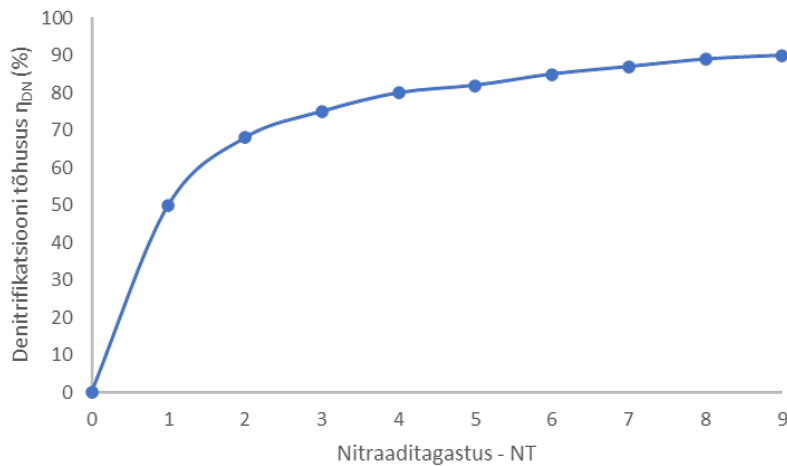
kus $S_{NO_3,DN}$ on denitrifitseeritav nitraatlämmastik (vt valemit 8.10) ning $S_{NO_3,VV}$ – väljavooluvee lubatud nitraadisisaldus.

Võrrandi 8.13 ja joonise 8.6 toel saab arvutada denitrifikatsiooni tõhususe protsentides. Olmereovee puhul on maksimaalne nitraaditagastus enamasti ligikaudu 4–6 kordne ning sellega saavutatakse denitrifikatsiooni tõhusus 80–85%. Nitraadiringluse suurenemisel juhitakse DN-mahutisse rohkem hapnikku, mis omakorda vähendab denitrifikatsiooni tõhusust. NR suurendamisel lüheneb DN-mahutis protsessi kontakiaeg ning seega väheneb ka denitrifikatsiooni tõhusus η_{DN} :

$$\eta_{DN} \leq 100 - \frac{100}{1+NT} (\%),$$

(8.13)

kus NT on nitraaditagastuse kordsus.



Joonis 8.6. Denitrifikatsiooni tõhususe sõltuvus nitraaditagastusest (NT)

Näidisülesanne. Lähtudes jaotises 8.4.3 esitatud näidisülesandest arvutada eeldenitrifikatsiooni lahendust kasutavas olmereoveepuhastis nitraadiringluse kordsus ja nitraadiringluspumpade vooluhulk, kui reoveepuhasti väljavooluvee üldlämmastikusisaldus peab olema 15 mgN/l. Reoveepuhasti keskmine päevavooluhulk on 1 500 m³/d ning kuiva aja maksimaalne 2 tunni vooluhulk 100 m³/h (vt jaotist 2.3.2).

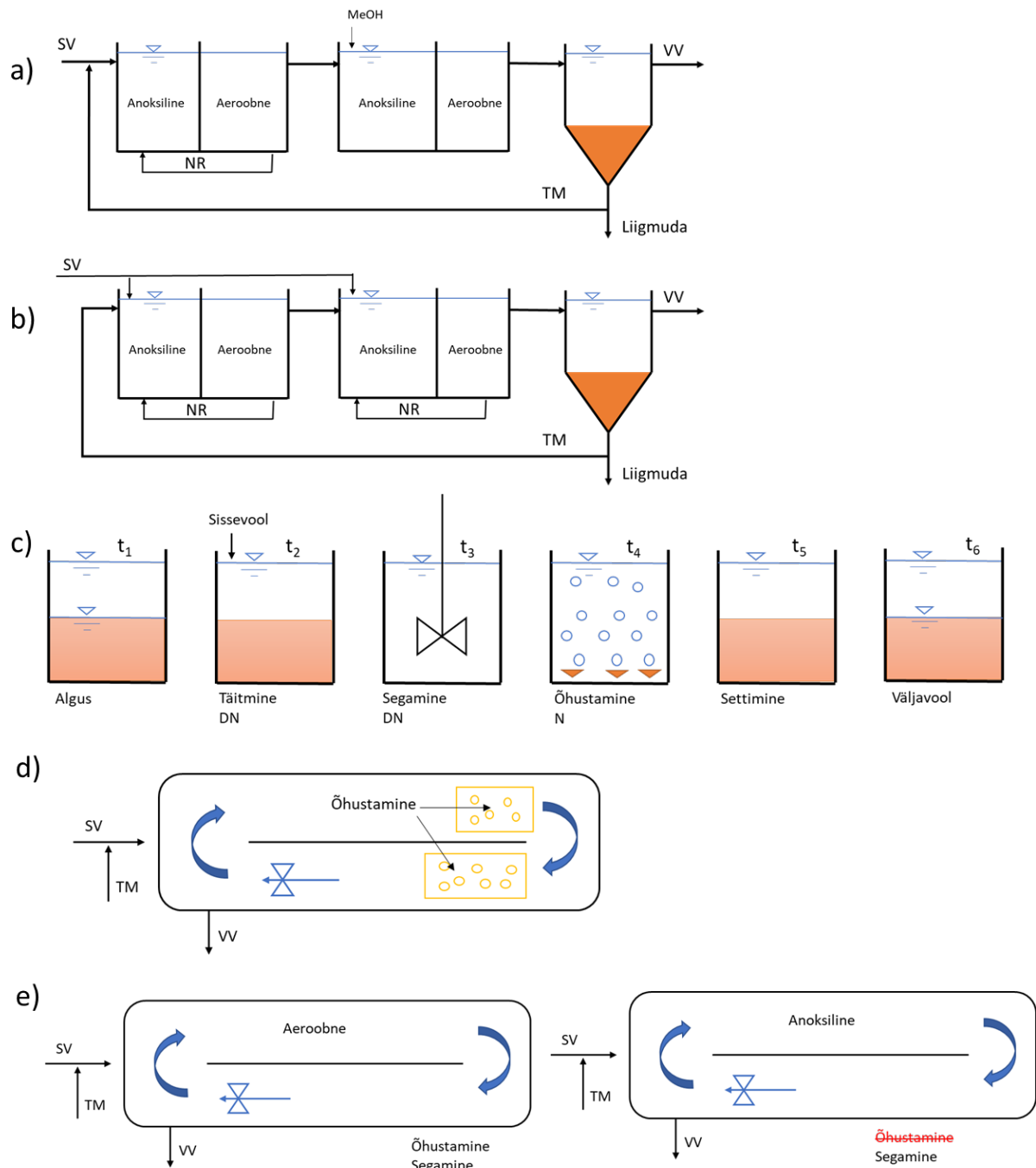
Kui väljavooluvee nitraadisaldus peab olema alla 15 mgN/l, seadkem arvutuses väikese varuga eesmärgiks 14,5 mgN/l. Analoogiliselt eelmise näidisülesandega leiame, et väljavooluvees võib olla nitraatlämmastikku $S_{NO_3, VV} = 14,5 - 0,5 \cdot 2 = 12$ mgN/l. Valemi 8.10 järgi on vaja denitrifitseerida nitraatlämmastikku $S_{NO_3, DN} = 80 - 2 \cdot 0,5 - 12 \cdot 18 = 47,5$ mgN/l. Vastavalt valemile 8.12 on vajalik summaarne nitraaditagastuse kordsus $NT = 47,5 / 12 = 3,96$. Võttes ümardades $NT=4$ peavad tagastusmuda- ja nitraadiringluspumbad summaarselt andma $4 \cdot Q_{DW, max, h} = 400$ m³/h. Tagastusmudapumba toimimine sõltub eelkõige järelsetiti tööst (käsitletakse jaotises 15) ning seda lämmastikuärastuse seisukohast muuta ei tohi. Tavaliselt on see vahemikus 0,7–1 korda $Q_{DW, max, h}$, seega käesoleva ülesandes 70 m³/h. Järelikult peavad nitraadiringluspumbad töötama lämmastiku piirnормi tagamiseks pidevalt jõudlusega 330 m³/h.

1.6 Tõhustatud lämmastikuärastuse tehnoloogilised lahendused

Kuigi eeldenitrifikatsiooniga reoveepuhasti on kõige levinum tehnoloogiline lahendus tõhustatud lämmastikuärastuse jaoks, on ka teisi tehnoloogiaid (vt joonist 8.7).

1.6.1 Bardenpho järelanoksiline lämmastikuärastus

Reoveepuhastites, milles tavalisest eeldenitrifikatsiooniga reoveepuhastusest ning reoveega puhastisse jõudvast orgaanilisest ainest väljavooluvee lämmastikusisalduse kohta kehtestatud nõuete täitmiseks ei piisa, tuleb protsessi lisada metanooli. Kuigi metanooli võib doseerida ka MLE-protsessi anoksilisse mahutisse, ei ole see tõhus, sest vajab väga suurt nitraaditagastuse taset. Selleks, et reoveepuhasti väljavooluvee nitraadisisaldus oleks väike, rakendatakse järelanoksilist denitrifikatsiooni. Joonisel 8.7a on skemaatiliselt kujutatud **Bardenpho 4-etapilise järelanoksilise lämmastikuärastuse** tehnoloogiat. Selle protsessi esimesed kaks mahutit toimivad samasuguse nitraadiringlusega nagu MLE-protsess. Aeroobse mahuti väljavoolu ja järelsetiti vahel on anoksiliste tingimustega mahuti. Selleks, et denitrifikatsioon toimiks järelanoksilises mahutis tõhusalt, lisatakse sinna täiendavat süsinikuallikat. Kuna kogu puhastis on ühesugune biomass, on denitrifitseerivad organismid selles alati olemas. Sel moel on võimalik viia väljavooluvee nitraadisisaldus alla 1 mg/l. Selleks, et vältida lisasüsiniku jõudmist järelsetitisse ja väljavoolu vette, õhustatakse aktiivmudasuspensiooni pärast anoksilist protsessi eraldi mahutis.



Joonis 8.7. Tõhustatud lämmastikuärastuse tehnoloogilisi lahendusi: a – järelanoksiline denitrifikatsioon; b – kaskaad-denitrifikatsioon; c – eeldenitrifikatsioon annuspuhastis; d – simultaan-nitrifikatsioon-denitrifikatsioon; e – vahelduv nitrifikatsioon-denitrifikatsioon (lühendid: SV – sissevool, VV – väljavool, TM – tagastusmuda, NR – nitraadiringlus) [1] järgi

1.6.2 Kaskaad-denitrifikatsioon

Kaskaad-denitrifikatsioon (joonis 8.7b) on tehnoloogiline lahendus, milles mitu eeldenitrifikatsiooni anoksiliste ja aeroobsete tingimustega mahutit paiknevad üksteise järel. Joonisel on kujutatud kaks järjestikust DN/N-mahutit, ent neid võib olla ka rohkem. Iga nitrifikatsiooni-denitrifikatsiooni vahel toimub nitraadiringlus ning sissevooluesi jaotatakse kõigi anoksiliste mahutite vahel. Kuna järelsetitist juhitakse suurema lämmastikusisaldusega tagastusmuda esimesse anoksilisse mahutisse,

kus aktiivmuda lahjeneb ainult osa reoveega, saavutatakse selles suurem aktiivmuda kuivainesisaldus. Joonisel kujutatud kahe kaskaadiga lahenduse puhul on DN/N-mahutite esimeses paaris kuivainesisaldus ligikaudu 1,5 korda suurem kui järelseti sissevooluvees. Sellisel moel saavutatakse reoveepuhasti reaktorites keskmiselt suurem kuivainesisaldus ning dimensioneerimisel saab vähendada protsessi toimimiseks vajalikku mahutite ruumala ja vähendada investeerimismaksumust. Kuna seda tehnoloogiat on mõnevõrra keeruline käitada, kasutatakse seda enamasti suurte reoveepuhastite puhul. Eestis on kaskaad-denitrifikatsiooni tehnoloogia kasutusel Kohtla-Järve reoveepuhastis.

1.6.3 Lämmastikuärastus annuspuhastis

Lämmastikku saab ärastada ka **annuspuhastites** (joonis 8.7c), milles toimuv protsess on väga sarnane eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastusega. Joonisel on kujutatud annuspuhastuse 6-etapiline tsükkel, kus eri aegadel (t_1 – t_6) toimub samas mahutis erinev protsess. Lämmastikuärastuse toimimiseks segatakse reaktori sisu sissevoolu ajal (t_2) ja vahetult pärast seda (t_3), kuid ei õhustata. Seeläbi tekivad mahutis anoksilised tingimused. Selles etapis on eelnevas protsessis toimunud nitrifikatsiooni tulemusel mahutis nitraati ning sissevooluveega lisatakse sellesse uut süsinikku. Nõnda luuakse denitrifikatsiooniks sobivad tingimused. Järgmises protsessietapis luuakse õhustamise teel aeroobsed tingimused ning toimub nitrifikatsioon. Nitraaditagastus kulgeb annuspuhastis kahel moel. Igas nitrifitseerivas annuspuhastis juhatakse nitraatlämmastik koos settinud ja tihenendud mudaga uue tsükli alguses tagasi denitrifikatsiooni. See on tavalise läbivoolse puhasti puhul justkui nitraaditagastus tagastusmudaga (TM). Teisalt on nitraaditagastuse jaoks on võimalik puhastustsükli etappe t_2 – t_4 korrata ning uue sissevooluvee lisamisega denitrifikatsiooni-nitrifikatsiooni korrata. See toimub läbivoolse puhasti korral justkui nitraadinglusena (NR).

Annuspuhastuse denitrifikatsiooni süsinikuärastuse vajaduse arutamisele saab läheneda nõnda, nagu läbivoolse eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastuse puhul. Tabelis 8.3 esitatud denitrifikatsioonimahuti ruumala osakaalu saab arvutada alljärgnevalt:

$$\frac{V_{DN}}{V_{DN}+V_N} = \frac{t_{DN}}{t_{DN}+t_N}, \quad (8.14)$$

kus t_{DN} on kogu denitrifikatsiooni perioodi kestus (joonisel 8.7 t_2+t_3) ning t_N – õhustusperioodi kestus (joonisel t_4).

Annuspuhasti väljavooluvee nitraatlämmastikuisaldus

$$S_{NO3,VV} = S_{NH4,N} \cdot \frac{f_{A,SBR}}{z} \left(\frac{mgN}{l} \right),$$

(8.15)

kus $S_{NH4,N}$ on protsessis nitrifitseeritava ammooniumlämmastiku sisaldus, $f_{A,SBR}$ – annuspuhastuse tsüklis välja vahetatava vedelikuhulga ja kogu annuspuhasti mahu suhe ning z – denitrifikatsiooni-nitrifikatsiooni vaheldumiste arv ühes annuspuhastustsüklis.

1.6.4 Simultaan-nitrifikatsioon-denitrifikatsioon

Aktiivmudapuhastites, milles õhustatavad ja anoksilised tsoonid vahelduvad, kuid ei ole kergesti piiritletud, või on viibeajad nii lühikesed, et seadet ei saa lugeda eeldenitrifikatsiooniga reoveepuhastiks, saab lämmastikuärastus siiski toimuda nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni teel. Sellist protsessi nimetatakse **simultaan-nitrifikatsioon-denitrifikatsiooniks (SNdN)**. Mikroorganismid toimivad sellises puhastis sageli väikese hapnikusisaldusega keskkonnas ning samal ajal võib mudahelbe välimistes kihtides kulgeda nitrifikatsioon ja süsinikuühendite lagundamine ning sisemistes kihtides denitrifikatsioon. SNdN-tehnoloogia ei ole enamasti nii tõhus kui eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastus. Et sellistes puhastites on denitrifikatsioonimahud enamasti suhteliselt suuremad, suudab SNdN kasutada ära sama palju sissevooluvees sisalduvat orgaanilist ainet ning tagada väljavooluvee väikese lämmastikusisalduse (vt Tabel 8.3). Üks selliseid SNdN-tehnoloogiaid rakendavaid reoveepuhasteid on ringkanal, milles õhustatavad piirkonnad on võrreldes puhasti mahuga väikesed ning aktiivmuda viibib suure osa ajast vähe õhustatud tingimustes (joonis 8.7d).

1.6.5 Vahelduv nitrifikatsioon-denitrifikatsioon

Vahelduv nitrifikatsioon-denitrifikatsioon (vahelduv NdN) on võrreldes eeldenitrifikatsiooniga vähem tõhus kui lämmastikuärastustehnoloogia (joonis 8.7e). Selle lahenduse puhul vaheldatakse ühes aktiivmudamahutis aeroobseid ja anoksilisi tingimusi. Aeroobsete tingimuste ajal toimub süsinikuühendite ärastamine ja nitrifikatsioon ning anoksiliste tingimuste ajal denitrifikatsioon. Kuna reovesi pidevalt sisse ja heitvesi välja voolab, muutub tingimuste vaheldumise tõttu väljavooluvee reoainesisaldus. Anoksilise perioodi lõpus on nitraatlämmastikusisaldus väike, kuid KHT ja ammooniumisisaldus suurem. Õhustamisperioodi lõpus on nitraatlämmastikusisaldus aga suur.

Käsitletud tõhustatud lämmastikuärastuse tehnoloogilistest lahendustest on Bardenpho järel-denitrifikatsioon ja kaskaadtehnoloogia pigem eeldenitrifikatsiooniga lämmastikuärastuse edasiarendused ning neist mõnevõrra tõhusamad. Neid tehnoloogiaid rakendatakse suurtes

puhastites, milles heitvee lämmastikusisalduse piirmäärad on rangemad. Annuspuhastuses toimib lämmastikuärastus ligilähedaselt sama tõhususega kui eeldenitrifikatsiooniga protsessis ning see tehnoloogia on Eestiski laialdaselt kasutusel. SNdN- ja vahelduv NdN-tehnoloogiat rakendatakse pigem väiksemates reoveepuhastites, milles väljavooluvee reoainesisalduse piirmäärad ei ole väga väikesed.