

17 Reoveesette käitlemine

Mait Kriipsalu, Vallo Lemmiksoo, Maarja-Liis Salumäe, Kaja Orupõld, Daisi Rist

17.1 Sissejuhatus

Reoveesete on reovee puhastamisel tekkiv kõrvalsaadus, mis liigitatakse selle päriolu ja reoainesisalduse (raskmetallid, ravimijäägid, haigust tekitavad mikroorganismid jt ohtlikud komponendid) ja toime (mõju keskkonnale ja inimtervisele) tõttu jäätmeks. Reoveesete sisaldab aga ka palju kasulikke aineid ja ühendeid, mis lubab seda pidada heaks orgaaniliseks väetiseks. Sõltumata sette lõppkasutusest ning selle reoainete ja kasulike ainete sisaldusest, on vaja seda käidelda. Käitlusviisi valik sõltub mitmest tegurist, sh reoveesete edasisest kasutusvaldkonnast, lõppärastuspaiga piirangutest, reoveepuhasti suuruselt ning sette omadustest ja käituskuludest.

Reoveesete algne veesisaldus on väga suur (tavaliselt üle 97%), mistõttu selle käitlemise esmane eesmärk on veesisaldust vähendada. Siis sette hulk väheneb ning edasised töötlemisetapid muutuvad lihtsamaks. Reoveesete tihendamise, tahendamise (veetustamise) ning kuivatamise eesmärk on järk-järgult suurendada selle kuivainesisaldust. Eesti seaduse kohaselt ei piisa vee kõrvaldamisest selleks, et lugeda seda sette töötlemiseks, vaid sellele peab eelnema või järgnema stabiliseerimine. Sette stabiliseerimisena mõistetakse peamiselt selle patogeenisalduse vähendamist, mis muudab selle lõpp-kasutuse ohutumaks. Stabiliseerimine võib seisneda aeroobses või anaeroobses bioloogilises käitlemises (kompostimises või kääritamises), keemilises või termilises töötlemises või orgaanilise aine looduslähedases mineraliseerimises – humifitseerimises [1].

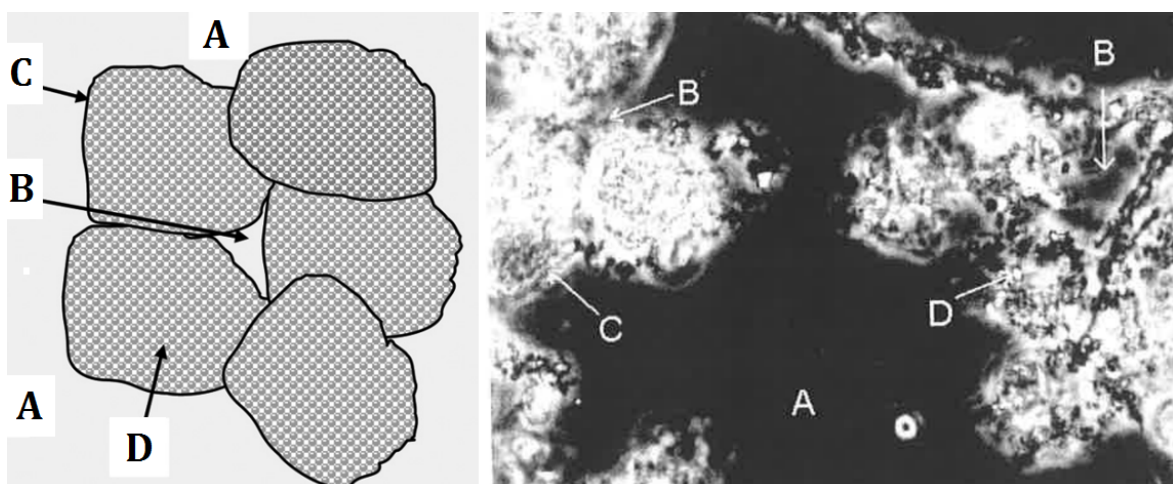
17.2 Reoveesete veesisalduse vähendamine

Reoveesete töötlemise tõhusust ning kvaliteeti mõjutavad selle keemilised, füüsikalised, morfoloogilised ja mikrobioloogilised omadused, mille järgi sete liigitatakse kolme rühma:

- hästi tahendatav sete – suure mineraalainesisaldusega sete, nt liivapüünise liiv;
- mõõdukalt tahendatav sete – eelsetitise ja kääritatud muda (ilma olulise tööstusliku mõjuta);
- halvasti tahendatav sete – aktiivmuda, nõrgbiofiltri sete (biokile), keemilise fosforiärastuse sete, mille kemikaali/fosfori moolide suhe on suurem kui 1,5.

Reoveesete käitlemisel tuleb kõrvaldada vesi, mida leidub selles neljal kujul (joonis 17.1):

- vaba vesi (ingl *free water*) – settes olev vesi, mis ei ole millegagi seotud, liigub mudaosakeste vahel vabalt ringi ning ei ole mudaosakestele adsorbeerunud. Mida väiksem on sette kuivainesisaldus, seda rohkem on selles vaba vett. Puhastusprotsessist liigmudana kõrvaldatud (KA ca 1%) reoveesette vaba vee sisaldus on ca 97%, samas juba tihendatud sette puhul (KA-sisaldus üle 5%) jääb see vahemikku 65–85%. Vaba vesi on settest kergesti kõrvaldatav mehaanilise tihendamise ja tahendamise teel;
- osakestevaheline vesi ehk kapillaarvesi (ingl *capillary water, interstitial water*) on reoveesettes tahkete osakeste ja mikroorganismide vahel olev vesi, mis püsib seal kapillaarjõu toimele. Tihendatud reoveesettes (KA ca 5%) on vahevett 15–25%. Rakkudevahelise vee sisaldus sõltub setteosakeste suurusest, kujust ja asetustihedusest. Vahevett on teatud määral võimalik lahutada polümeeride lisamise ja mehaanilise töötlemise teel, kui selle käigus lõhutakse reoveesette helbed (flokid), mille tulemusena on osakestevaheline vedelik kättesaadavam;
- rakkude pinna lähedane vesi (ingl *surface water, vicinal water*) on reoveesettes olev tahkete osakestega seotud vesi, kus veemolekulide kihid hoiavad end vesiniksidemetega tihedalt vastu tahkete osakeste pinda. Pinnalähedane vesi on siis füüsiliselt seotud, ei liigu vabalt ringi ning keemiliselt seotud ühendid on selle osa. Pinnalähedase vee sisaldus on tihendatud reoveesettes (KA ca 5%) ligikaudu 7%. Seda liiki vett ei ole võimalik settest mehaaniliselt lahutada;
- rakkude sees olev vesi ehk intratsellulaarne vesi (ingl *intracellular water, water of hydration, chemically bound water*) on osakeste struktuuriga seotud vesi. Rakusisest vett on tihendatud reoveesettes (KA ca 5%) ligikaudu 3%. Rakusisest vett on võimalik reoveesetest kõrvaldada üksnes termo-keemiliselt.



Joonis 17.1. Reoveesettes oleva vee jaotus: A – vaba vesi, B – rakkudevaheline vesi, C – rakkude pinna lähedane vesi ja D – rakusisene vesi

17.2.1 Reoveesette tihendamine

Esmane ning enamikes reoveepuhastites (sh väikepuhastites) kasutamist leidev settetöötlemisetapp on reoveesette tihendamine. See on lihtne ja kulutõhus meetod sette veesisalduse vähendamiseks. Tihendatud reoveesette kuivainesisaldus on sõltuvalt rakendatavast tehnoloogiast 2–10%. Saksa standardi DWA-M 381 [2] kohaselt on eri tihendusmooduste korral oodata tabelis 17.1 osutatud keskmisi tulemusi.

Tabel 17.1. Tihendamismooduste võimalused ja töönäitajad [2]

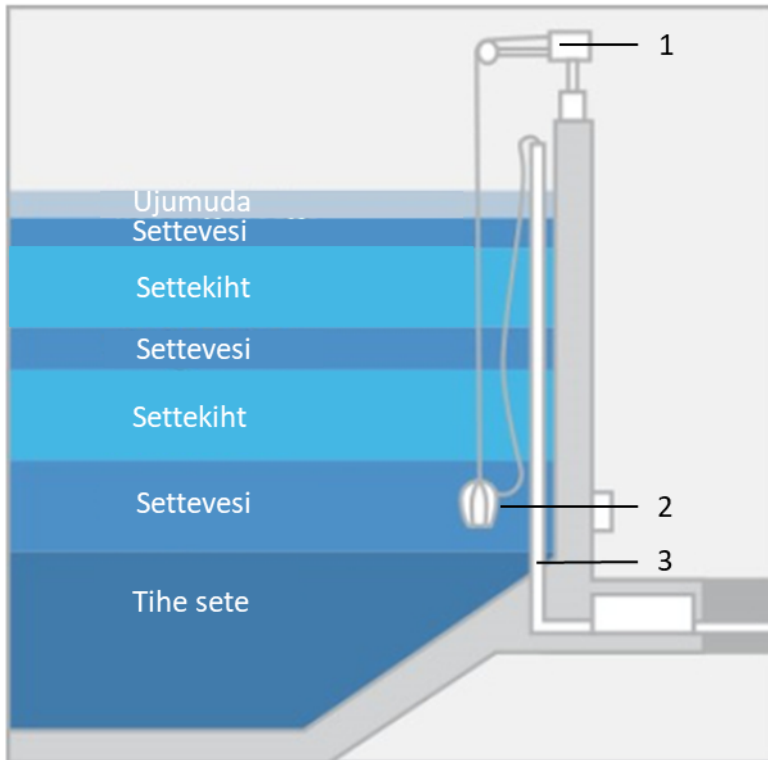
Näitaja	Raskustihendamine			Flotatsioon	Mehaaniline tihendamine			
	Pidev toide		Tsükli- line toide		Lahustu- nud õhuga	Lint-, ketas- või kruvitihendi	Tsentrifuugitud	
	ilma polü- meerita	polü- meeriga					ilma polü- meerita	polü- meeriga
Primaarsete eelsetititest (% KA)	5 – 10	-	5 – 10	-	-	-	-	
Settesegu* (%KA)	4 – 6	5 – 8	4 – 8	-	-	-	-	
Liig(aktiiv)-muda (%KA)	2 – 3	3 – 4	2 – 3	3 – 5	5 – 7	5 – 7	6 – 8	
Polümeeri-kulu (kg/tKA)	0	0,5 – 3	0	0	3 – 7	0	1 – 1,5	
Energia eritarve (kWh/m ³)	< 0,1	< 0,1	-	0,6 – 1,2	< 0,2	1 – 1,4	0,6 – 1	
Energia eritarve (kWh/tKA)	< 20	< 20	-	100 – 140	< 30	180 – 220	100 – 140	

- **Raskustihendamine**

Raskustihendamisel (gravitatsioonilisel tihendamisel) surub raskusjõud reoveesette osakesed kokku tahkeks mudamassiks. Tihendamine võib toimuda nii tsükliliselt kui ka läbivoolurežiimil ning selle protsessi käigus tekib kaks ainevoogu – tihendatud muda ja vähe tahket ainet sisaldav settevesi (rejektvesi). Kõige rohkem on tahket ainet muda põhjakihis. Raskustihendamine on nii energia- kui ka tihenemist soodustavate kemikaalide (flokulantide) kulu (neid pigem ei kasutatagi) poolest üks tõhusaimaid mooduseid primaarsette ja segamuda käitlemiseks. Kääritatud sette ehk digestaadi gravitatsiooniline tihendamine on üldiselt ebatõhus (seetõttu pole seda ka tabelis 17.1).

Sette tihenemise ajal jätkuvad selles mikrobioloogilised protsessid ning gaasimullid kergitavad mudaosakesi veepinna poole. Tekib kihistumine (joonis 17.2), mida saab vältida:

- kasutades aeglaselt pöörlevat settekaapi (kammsegurit);
- kõrvaldades setteveet kihtide vahelt;
- setet aeg-ajalt läbi segades (sh õhustades). Siis võib tihendatud sette kuivainesisaldus olla mõnevõrra väiksem, kui on kirjas tabelis 17.1.



Joonis 17.2. Sette raskustihendamisega kaasnev kihistumine ilma kaapsüsteemita tihendis. Saksa tootja Kleine Solutionen GmbH süsteem settevee kõrvaldamiseks mudakihtide vahelt: 1 – vints koos sensoriga, 2 – sukelpump, 3 – settevee äravool [26]

- **Pidevtoimeline gravitatsiooniline settetihendi**

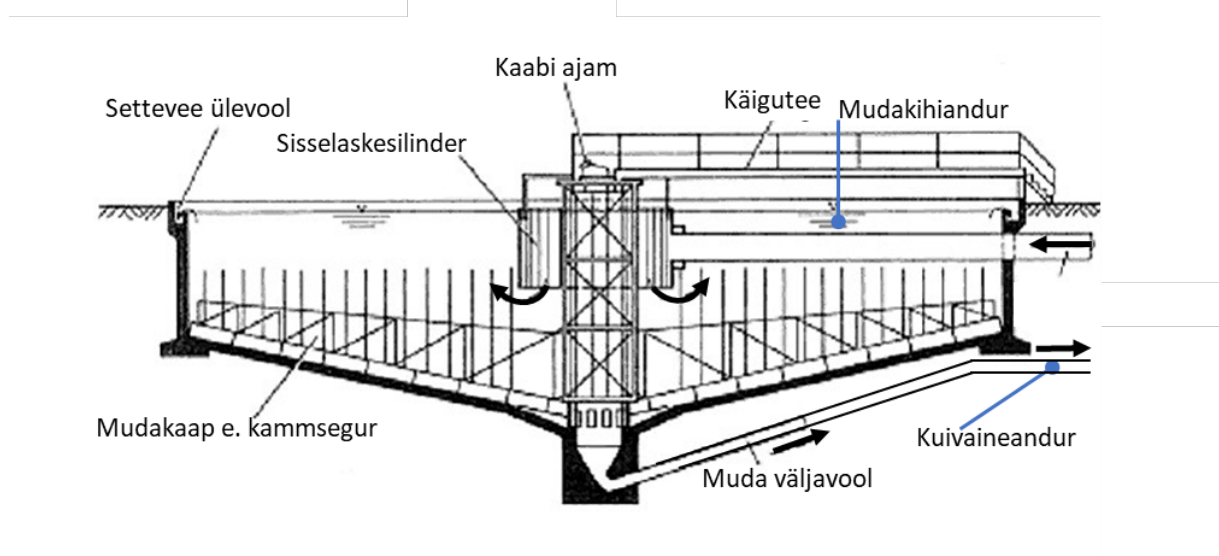
Pidevtoelises gravitatsioonilises settetihendis toimub pidev mudavoo sissevool, settevee ärajuhtimine ja tihendatud reoveesette kõrvaldamine, kusjuures muda võetakse välja sealt, kus see on kõige tihedam, s.o settetihendi koonuspõhjast. Pidevtoelised settetihendid on varustatud aeglaselt pöörleva kaabi ning muda etteandmise, settevee ja tihendatud muda ärajuhtimise seadmetega (joonis 17.3). Kaabi labade abil juhitakse tihendatud sete settetihendi põhjakoonusesse. Settevesi voolab ära mahuti pinnal oleva ülevoolurenni kaudu. Ujumuda tekkimine mahuti pinnale on vältimatu ja selle kõrvaldamiseks tuleb rakendada sobivat süsteemi, nt koos setteveega.

Settetihendi vajalik pindala:

$$A_{\text{settetihendi}} = \frac{Q_{\text{muda}} \cdot X_{\text{KA,SV}}}{q_{A,\text{tih}}} \text{ (m}^2\text{)},$$

(17.11)

kus Q_{muda} on siseneva muda kogus (m^3/h); $X_{\text{KA,SV}}$ – siseneva muda KA-sisaldus (kgKA/m^3) ning $q_{\text{A,tih}}$ – tihendimuda pinnakoormus (m^2/d).



Joonis 17.3. Pidevtoimeline gravitatsiooniline settetihendi [2]

Standardi DWA-M 381 kohased settetihendi tahke aine pinnakoormused (kuivainemassi baasil) on tabelis 17.2.

Tabel 17.2. Settetihendi tahke aine pinnakoormused [2]

Muda settimisomadused	Mudatüüp	Tihendimuda pinnakoormus q_{TSA} ($\text{kgKA}/\text{m}^2\text{d}$)
Halvad	Sekundaarsete	20–50
Keskmiised	Settesegu	40–80
Head	Primaarsete, mineraalsete, mittekääritatav sete	Kuni 100

Settetihendi sügavus tuleneb kaapimistsooni ning mudakihi ja setteveetsooni kõrguste summast:

$$H_{\text{settetihendi}} = H_{\text{settevesi}} + H_{\text{mudakiht}} + H_{\text{tihesete}} \text{ (m)}, \quad (17.12)$$

kus $H_{\text{settevesi}}$ on setteveekihi kõrgus (m), H_{mudakiht} – mudakihi kõrgus (m) ning H_{kaap} – põhjakaabi kõrgus (m).

Mudakihi kõrguseks tuleb valida vähemalt 0,3 m või kaabi ja setteveekihi kõrguseks ca 1,0 m.

Eriti oluline on mudakihi kõrgus, sest sellest oleneb tahke aine viibeaeg tihendis. Primaarsete puhul ei tohiks see ületada muda 1,5 päeva pikkust viibeaega (20°C), et vältida anaeroobseid

lagunemisprotsesse, mille lagugaasid võivad settimist häirida. Kõrgematel temperatuuridel tuleks muda viibeaga lühendada, madalamatel temperatuuridel võib see olla pikem.

Muda viibeaja ja seeläbi mudakihi mahu määramiseks tuleb juhinduda kuivaine keskmisest sisaldusest, mis on tavaliselt ligikaudu 75%-le mahuti põhjamuda suurimast sisaldusest. Mudakihi kõrgus:

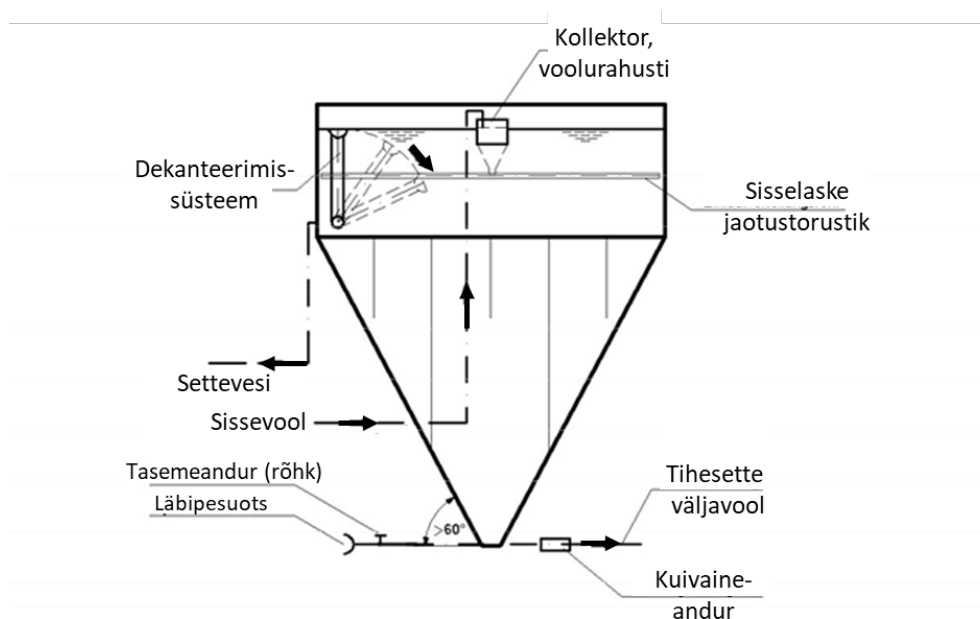
$$H_{mudakiht} = \frac{q_{KA,tih} \cdot SRT_{tih}}{0,75 \cdot X_{KA,tih}} \quad (m), \quad (17.13)$$

kus $q_{KA,tih}$ on mudakoormus ($kgKA/(m^2 \times d)$); SRT_{tih} – muda hüdrauliline viibeag tihendis (d); $X_{KA,tih}$ – tihendatud põhjamuda sisaldus ($kgKA/m^3$).

Pidevtoitelise settetihendi töö kõige olulisem hindamisnäitaja on muda tase, millest oleneb muda viibeag tihendis ja ka selle kuivainesisaldus, mida on mõistlik pidevalt seirata.

- **Tsükliline gravitatsiooniline settetihendi**

Tsükliline gravitatsiooniline tihendamine sarnaneb üldjoontes läbivoolse tihendamise tehnoloogiaga, samas tuleb selle kavandamisel ja käitamisel arvestada protsessi tsüklilisust. Tsükliline on nii muda juhtimine settisse kui ka sealt ära juhtimine ning settevee kõrvaldamine mahuti pinnalt. Tüüpiline tsüklilise gravitatsioonilise mudatihendi süsteem on kujutatud joonisel 17.4 vertikaalse järelsetiti (põhjakalle 60°) näitel.



Joonis 17.4. Tsükliline gravitatsiooniline settetihendi [2]

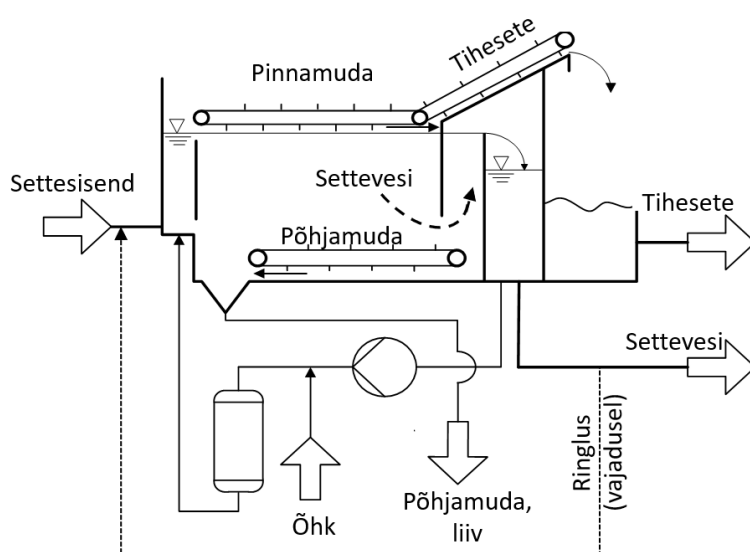
Settetihendi maht vastab tavaliselt sellesse siseneva reoveesette päevakogusele, mis võib muutuda olenevalt sette omadustest, juurdevoolu tsüklilisusest vm.

Sette sissevoolu- ja settevee kõrvaldamise süsteemid (sh tsüklite kestused) peavad olema kavandatud ja seadistatud nõnda, et kõrvaldatav settevesi sisaldaks võimalikult vähe heljumit. Süsteeme võib ka automatiseerida, paigaldades väljavoolule andurid nii tihesette (muda kuivaine) kui ka mudakihi kõrguse mõõtmiseks.

Eestis on levinud gravitatsiooniliste mudatihendite tsükliline läbisegamine õhuga, et vähendada kihistumist ja bioloogiliselt seotud fosfori tagasileostumist. Siis tuleb tihendi kavandamisel arvestada lisamahu vajadust (õhustamise ajal ei toimu mingit tihenemist, vaid kogu tihendi maht segatakse täielikult läbi) ning seda, et sette kuivainesisaldus võib olla tabelis 17.1 osutatud standardväärtustest mõnevõrra väiksem.

- **Flotatsioon**

Flotatsioon (ingl *dissolved air flotation, DAF*) on tihendamismeetodina väga levinud reovee eelpuhastamisel (vt jaotist 5.5.2) ja ka järelpuhastamisel. Flotatsiooni eesmärk on vastupidine settimisele – setteosakesed tõstetakse peente õhumullide abil veepinnale ning kõrvaldatakse sealt pinnakaabi abil tihesettena (joonis 17.5). Pinnakihi all olev setteveekiht juhitakse ära altvooluna (et mitte kaasata pinnal olevat tihesetet). Kõrvaldada on vaja ka tekkida võiv põhjasete (nt liiv). Flotatsioon on oluliselt kiirem tahke aine lahutamise viis kui settimine ja/või gravitatsiooniline tihendamine.



Joonis 17.5. Setet tihendav flotatsiooniseade [2]

Flotatsiooniseadmete standardi DWA-M 381 [2] kohased kavandamis- ja käitusnäitajad on koondatud **Error! Reference source not found..**

Tabel 17.3. Flotatsiooniseadmete kavandamis- ja käitusnäitajad [2]

Näitaja	Sümbol	Ühik	Väärtus
Hüdrauliline pinnakoormus	q_A	$m^3/(m^2h)$	1–7,5
Muda pinnakoormus	q_{KA}	$kgKA/(m^2h)$	5–20
Õhu erivajadus	L_{TS}	$g \text{ õhku/kg KA}$	5–40
Rõhu erinevus puhkefaasi ajal	Δp	bar	3–6
Õhumulli keskmine läbimõõt	D_L	mikron	30–80
Mahuti pikkus	L_{FB}	m	6–30
Mahuti sügavus	H_{FB}	m	0,6 – 3,5
Mahuti pikkuse ja sügavuse suhe	$P : H$	-	2–8
Mahuti läbimõõt	D_{FB}	m	5–20
Viibeaeg segamistsoonis	-	min	1–2
Viibeaeg flotatsioonimahutis	-	min	20–60
Flotomuda eemaldamise kiirus	-	cm/s	1–3

Flotatsiooniseadmed töötavad eriti hea tulemusega siis, kui sette kuivainesisaldus sissevooluvees on *ca* 3 kgKA/m³. Seetõttu on levinud liigmuda kõrvaldamine flotatsiooniga tihendamise teel otse reoveepuhastist. Kui kuivainesisaldus on suurem (nt kui liigmuda kõrvaldatakse järelsetitist) tihendamise tõhusus üldiselt halveneb ning muda võib setteveega välja uhtuda. Seetõttu on süsteeme varustatud setteveeringlusega, et sissevooluvett lahjendada.

Flotatsiooniga tihendamisel on tavapärase tihesette kuivaine saagis vahemikus 4–4,5 %. Veidi suuremate väärtuste (*ca* 5,0–5,5 %) saavutamiseks on vaja süsteemi toimimist märksa pidevamalt jälgida ja optimeerida. Tihendatud muda kuivainesisaldust võib suurendada ka flokulantide abil, kuid see nõuab veelgi paremat optimeerimist. Tõhusaks on osutunud tihendatud sette kuivaine andurid, mis vähendavad tihesettekaabi tööd, kui tahke aine sisaldus muutub etteantud saagisest väiksemaks.

Mehaaniline tihendamine

Mehaaniline tihendamine on füüsikaline protsess, mille eesmärk on kasutada ära gravitatsioonivälja mõju ja ületada tahket ainet ning vett siduvad jõud, mistõttu sete eraldub veest. Tehnoloogia poolest saab mehaanilise tihendamise seadmed jaotada kaheks – mitmesugused tihendid ja pressid, mis kasutavad loodusliku gravitatsiooni, ning tsentrifuugid, mille abil tekitatakse seadmes endas kunstlik gravitatsioon.

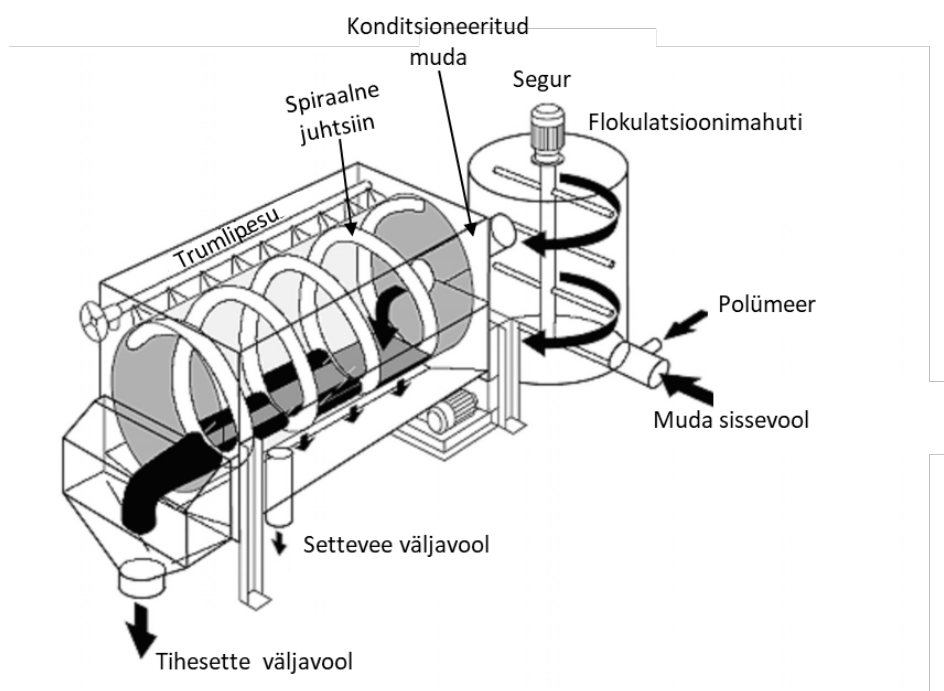
Mehaanilisel tihendamisel on vastandina gravitatsioonilisele tihendamisele väga levinud flokulantide kasutamine (v.a tsentrifuugimisel). Tsentrifuugid võimaldavad gravitatsioonijõudu reguleerida,

mistõttu neid saab edukalt kasutada ilma flokulante lisamata, või kasutada neid tihendamise suurema saagise saamiseks väga väikese hulgal. Flokulantide kasutamiseks on vaja segamisliini ja flokulatsioonimahuti, milles peab viibeajast piisama heljumihelveste moodustumiseks. Konkreetse sette jaoks sobiliku flokulandi valimine ja optimaalne kasutamine on mehaanilise tihendamise tõhususes väga oluline.

Reoveesette mehaaniliseks tihendamiseks kasutatakse nii trummel-, kruvi- ja lint-tihendeid kui ka tsentrifuuge.

- **Trummel-settetihendi**

Trummel-settetihendi tööorgan on silindriline perforeeritud trummel (joonis 17.6), mille ühest otsast siseneb eelnevalt helvestatud muda. Muda liigub trumli (mis on seadistatav täiesti horisontaalseks või väikese kaldenurga alla) pidevalt selle aeglase pöörlemise ja selle sees asuva spiraalse siini toimel. Settest lahutatud settevesi väljub trumlist läbi perforeeritud avade. Trumli lõpus kukub tihendatud muda läbi leetri kogumismahutisse, millest see pumbatakse tavaliselt edasisele käitlemisele. Trumlile korraldatakse väljast poolt perioodiliselt (või ka pidevalt) tagasipesu.



Joonis 17.6. Trummel-settetihendi [2]

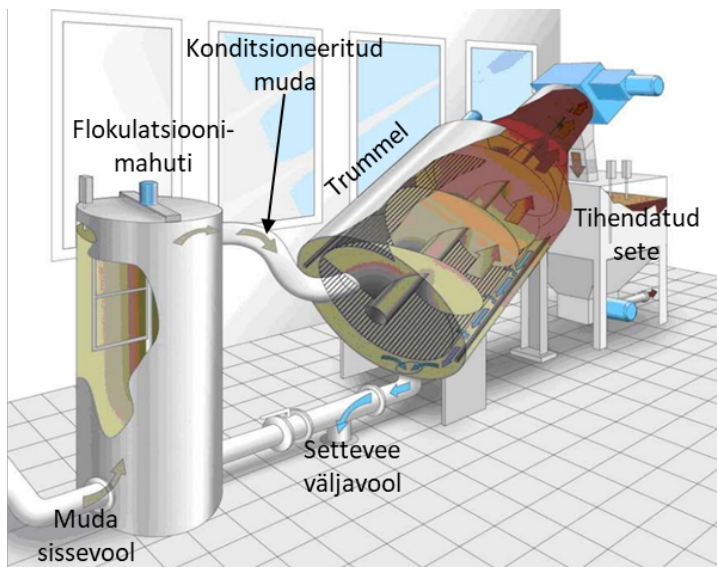
Trummel-settetihendite DWA 381 kohased jõudlusnäitajad on koondatud tabelisse 17.4.

Tabel 17.4. Trummel-settetihendi jõudlusnäitajad [2]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	3 – 100
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	15 – 1 500
Trumli läbimõõt	mm	600 – 1 200
Trumli pikkus	mm	1 500 – 3 500
Trumli pöörlemiskiirus	1/min	2 – 30

- Kruvi-settetihendi**

Kruvi-settetihendi (joonis 17.7) peamine tööorgan on ca 30° nurga all kaldu olev silindriline sõeltrummel, mille sees on pöörlev kruvi. Flokulatsioonimahutist voolab muda tihendisse trumli madalamast osast ning hakkab kruvi sunnil liikuma trumli kõrgemas otsas asuva väljavoolu suunas. Trumli tagumine osa on kooniline, mis soodustab sette kokkupressimist. Trumli välispinna pesemiseks on olemas nii harjasüsteem kui ka pihustid. Settevesi väljub trumlist läbi perforeeritud avade. Trumli lõpus kukub tihendatud muda lehtri kaudu kogumismahutisse ning pumbatakse sealt edasisse käitluse.



Joonis 17.7. Kruvi-settetihendi [2]

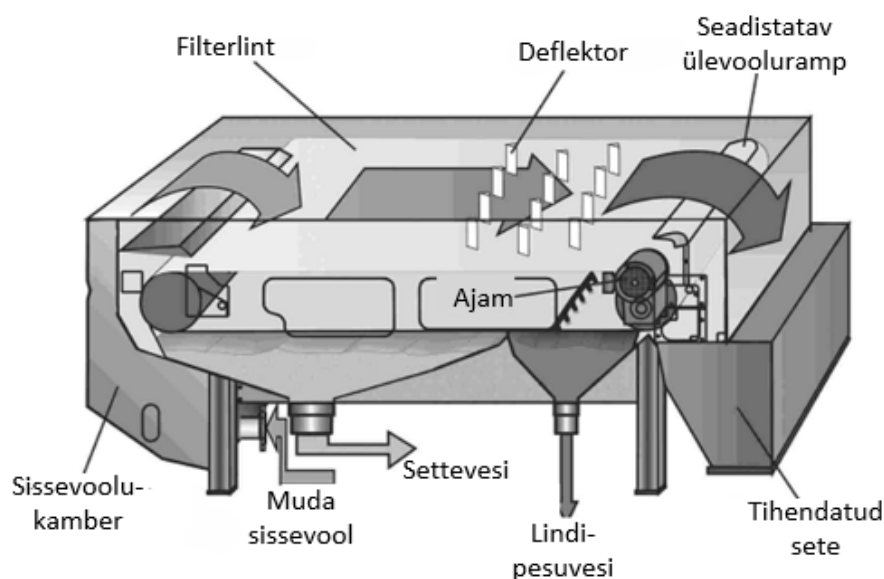
Kruvi-settetihendite DWA 381 kohased jõudlusnäitajad on koondatud tabelisse 17.5.

Tabel 17.5. Kruvi-settetihendi jõudlusnäitajad [2]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	8 – 90
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	40 – 750
Sõeltrumli läbimõõt	mm	300 – 1 200
Võre pikkus	mm	1 200 – 1 900
Kruvikonveieri pöörlemiskiirus	1/min	1 – 12

- **Lint-settetiendi**

Lint-settetiendi (joonis 17.8) on horisontaalselt paikneva aeglaselt liikuva filterlindiga tihendusseade, mille peale juhitud mudast settevesi läbi nõrgub. Filterlindi, mille liikumiskiirust on võimalik reguleerida, kohal paiknevad mudavoodeflektorid segavad lindil olevat muda ning soodustavad sel moel settevee äravoolu ega lase seda filterlindile koguneda. Seadme väljavooluotsas paikneb ülevooluramp, mille abil on võimalik mudakihi paksust reguleerida. Linttihenid tagumises otsas kukub tihendatud muda läbi lehtri kogumismahutisse ning pumbatakse sealt edasisse käitlusse.



Joonis 17.8. Lint-settetiendi

Lint-settetiendite DWA 381 kohased jõudlusnäitajad on koondatud tabelisse 17.6.

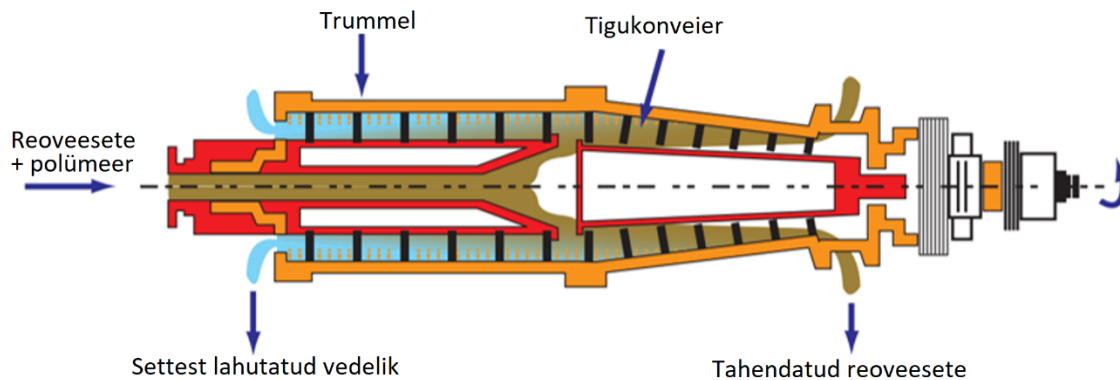
Tabel 17.6. Lint-settetiendi jõudlusnäitajad [2]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	10 – 150
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	50 – 2 250
Lindi laius	mm	800 – 2 700
Lindi liikumiskiirus	m/min	7 – 30

- **Tsentrifuugid**

Tsentrifuug (joonis 17.9) on horisontaalne seade, mille koonus-silindrilise trumli sees paikneb tigukonveier ning milles erineva tihedusega vesi ja tahke aine tsentrifugaaljõu toimel teineteisest lahutuvad. Tihendatav muda juhitakse sisselasketoru kaudu suure kiirusega pöörlevasse tsentrifugitrumlisse, milles tahked ained kogunevad siseseinale ning millesse settevesi moodustab sisemise setteveekihi. Vedela ja tahke faasi, mis lahutuvad kogu silindrilise osa ulatuses, sügavust reguleeritakse ülevooluplaadi abil. Trummel ja tigukonveier pöörlevad ühes ja samas suunas, kuid

erineva kiirusega. Aeglasemalt pöörlev sisemine tühjenduskrui tõukab settinud muda tsentrifuugi koonuselise osa suunas välja. Eraldatud settevesi täidab trumli kuni ülevooluavani ning voolab sealt välja. Tsentrifuugi teisest otsast väljub veest lahutatud sete.



Joonis 17.9. Dekanter-tsentrifuug [2]

Tsentrifuugid sobivad igasuguse reoveesete tihendamiseks ja tahendamiseks, ent konstruktsioon tuleb valida kasutusotstarvet arvestades. Tsentrifuugide valikul tuleb arvestada kasutuseesmärki, millest oleneb trumli ja tühjenduskrui pöörlemiskiirus, vedela ja tahke kihi sügavus, mudaläbilaskevõime ning flokulantide annustamine. Seadme rakendamisel tuleb arvestada suhteliselt suuri hooldus- ja ülevaatuskulusid. Tsentrifuugide DWA 381 kohased jõudlusnäitajad on koondatud tabelisse 17.7.

Liigmuda tihendamisel tsentrifuugidega ilma flokulante lisamata muutub tihendatud muda voolu käitumine: tihendatud muda viskoossus suureneb suurel määral ning võib pastalaadseks muutuda. Seda tuleb arvestada kogu süsteemi kavandamisel ja projekteerimisel, eriti mudapumpade ja torustike puhul.

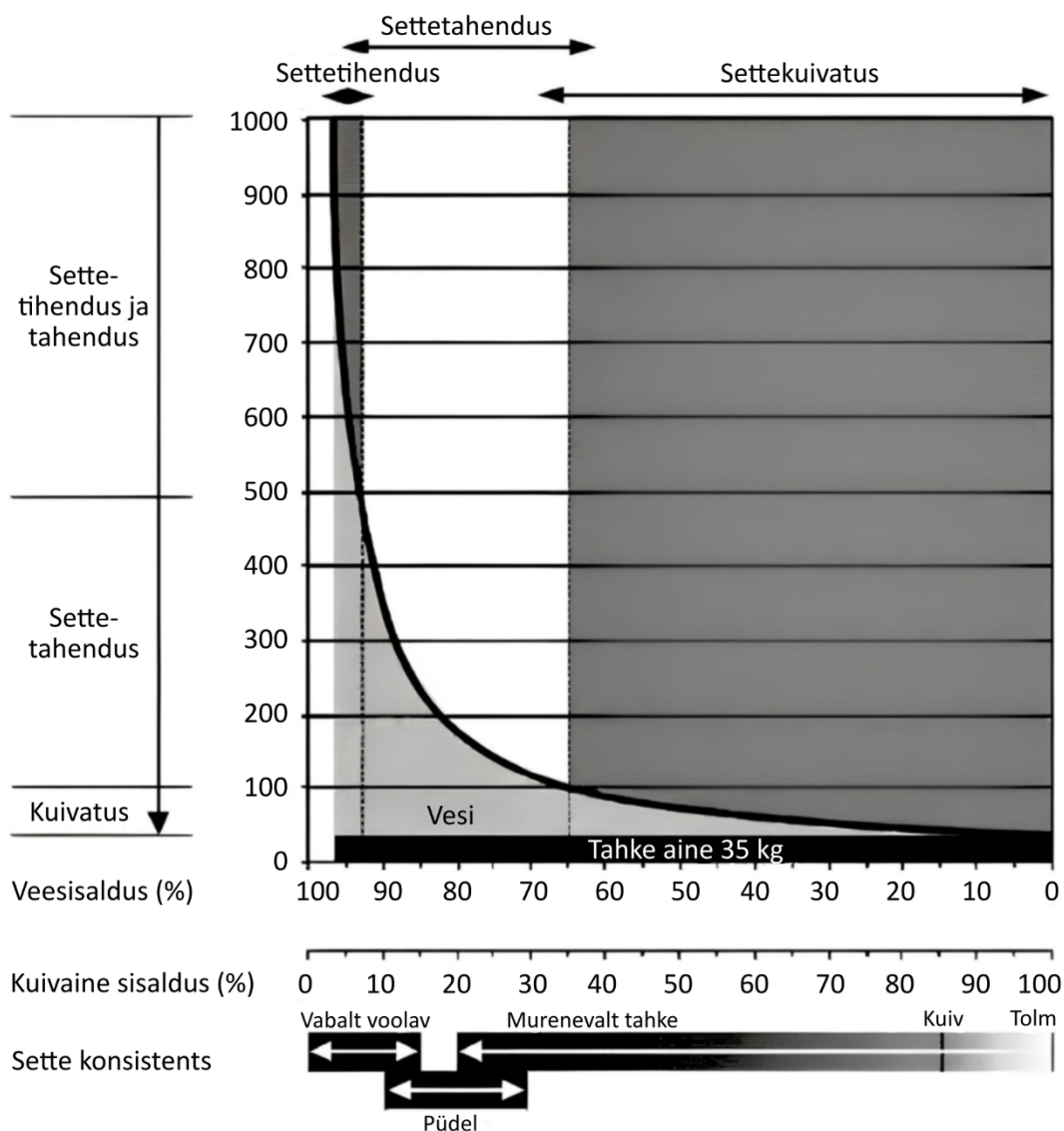
Tabel 17.7. Tsentrifuugide jõudlusnäitajad [2]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	5 – 200
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	20 – 3 000
Trumli läbimõõt	mm	250 – 1 400
Trumli pikkus koos koonusega	mm	600 – 4 200
Trumli pöörlemiskiirus	1/min	700 – 3 000

17.2.2 Sette tahendamine

Sette tahendamise eesmärk on vähendada selle vaba vee sisaldust minimaalseks ja muuta ta pooltahkeks massiks. Nii vaba kui ka baktermassi seotud vee osakaal sõltub sette liigist ja selle eelnevatest töötlemisetappidest, mistõttu on sette tahendamise võimalik saavutada kuivaine sisaldus vahemikus 18–45% (tabel 17.8), tavapärane vahemik on aga 18–25%.

Joonisel 17.10 on kujutatud gravitatsiooniliselt tihendatud sette (kuivainet 3,5%) vee ja tahke aine sisalduse bilanss ning näidatud, millise käitlustehnoloogiaga on võimalik vett kõrvaldada. Sette koguseid on võimalik kaks korda vähendada (kõrvaldada 50% veest) täiendava mehaanilise tihendamise, kasutades polümeere ja tõstes sette KA 7%-ni, mis on tahendamistehnoloogia piir. Sette tahendamise on võimalik kõrvaldada kogu vaba vee osa (antud näite puhul 35% KA), ülejäänud vee kõrvaldamiseks on vaja rakendada termilisi protsesse (nt kuivatamist). Tahesette saagis on oluline nii sette edasisel töötlemisel (nt kompostimisel) kui ka veol (transpordikulud). Eriti oluliseks aga muutub see siis, kui järgmise etapina rakendatakse termilist kuivatamist, mis on kümneid kordi energiakulukam kui tahendamine.



Joonis 17.10. Gravitatsiooniliselt tihendatud (KA=3,5%) sette veesisalduse bilanss [3]

DWA-366 standardi alusel on tabelisse 17.8 koondatud settetahenduseseadmed ja nende keskmised tahesettesaagised ning kemikaali -ja energiakulud eri settevoogude puhul.

Tabel 17.8. Settetahendusseadmete keskmised toimimispiirid [3]

	Ühik	Tsentri- fuugid	Lintfilterpressid ¹⁾	Filterpressid: kamberpress ³⁾ kottfilterpress		Kruvipress
				Polümeerid	Lubi/raud konditsioneerimine ²⁾	
Väljundi tahkeainesisaldus KA (%)						
Eelsetitise	%	32 – 40	30 – 35	32 – 40	35 – 45	30 – 40
Settesegu (primaarsete ja liigmudasegu vahekorras 1:1)	%	26 – 32	24 – 30	26 – 32	33 – 45	24 – 30
Aeroobselt stabiliseeritud liig(aktiiv)muda (ilma eelsetitita)	%	18–24	15–22	18–24	28 – 35	18–24
Kääritatud muda	%	22 –30	20–28	22 – 30	30 – 40	20–28
Polümeersete flokulantide kulu						
Polümeersete flokulantide kulu	kg/t	8–14	6–12	6–12/ 8– 15 ⁶⁾	–	6–12
Energiatarve						
Erivõimsustarve ⁴⁾	kWh / m ³	1,0–1,6	0,5 –0,8	0,7 –0,9/ 1,0–1,2 ⁷⁾	1,0 –1,2	0,2–0,5
Erivõimsustarve ⁵⁾	kWh / m ³	1,6–2,2	1,1 –1,4	1,5 –1,8	1,8 –2,0	0,6 –1,0
Erivõimsustarve ⁴⁾	kWh / tKA	40–60	20–30	30–40/ 40–50 ⁷⁾	30–40	8–16
Erivõimsustarve ⁵⁾	kWh / tKA	60–90	40–50	60–70	70–80	20–40

1) KA-sisaldus sisendis vahemikus 2% kuni 7%.

2) Olenevalt lubja ja raua lisanditest.

3) Membraanfiltripressid saavutavad optimaalse töö ja konditsioneerimisega kamberfilterpressiga võrreldes 2%–4% suurema KA. Membraanfilterpresside energiatarve on veidi suurem kui kamberfilterpressidel.

4) Seadme elektritarbimine muda läbilaskevõime või tahkete ainete koormuse suhtes ilma konditsioneerimisaineta.

5) Energiatarve nagu 4), kuid sisaldab etteandepumba ja konditsioneerimissüsteemi energiatarbimist.

6) Kottfilterpresside flokulandikulu.

7) Membraanfilterpresside energiatarve.

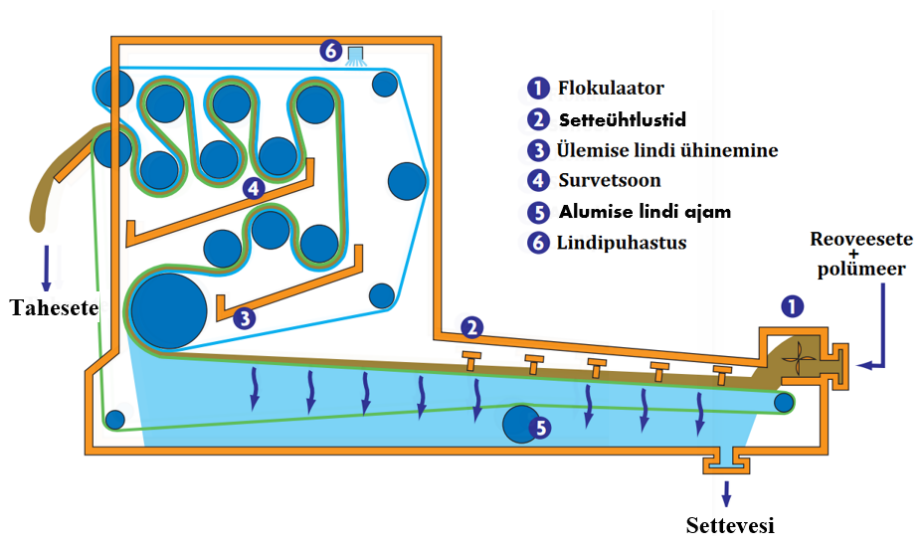
Kuna tahendamise saagis sõltub suure osas sette konkreetsetest omadustest, on teatud juhtudel (nt termilise kuivatustehnoloogia rakendamisel korral) soovitatav enne tahendusseadmetüübi valimist korraldada välikatsed, sest enamikul seadmetootjaist on mobiilsed testimisseadmed olemas. See võimaldab teada saada, milline tahendusseade on antud oludes kõige sobilikum.

Peale õige seadme valiku on oluline hoolitseda selle eest, et sette omadused oleksid võimalikult ühtlased. Sette omadused võivad muutuda nii sesoonselt kui ka olla tingitud koormuse tavapärasest kõikumisest. Ebaühtlast võib veelgi võimendada liigmuda või toorsette ebaregulaarne kõrvaldamine ja tihendusseadmete ebaõige käitamine.

Väga oluline mõju on ka sobiva helvestuskemikaali valimisel (vaja on teha laboratoorseid ja masinkatseid). Reoveesette tihendamisel kasutatakse tavaliselt orgaanilisi polümeerseid flokulante. Tõhusa protsessi eeltingimus on ka polümeerilahuse õige ettevalmistamine – tuleb jälgida, et aktivatsioon kestaks vähemalt 45 minutit ning segatud lahus tarbitaks ära ühe päeva jooksul.

- **Lintfilterpress**

Lintfilterpress (ingl *belt filter press*) on seade (joonis 17.11), milles reoveesettes olev vesi kõrvaldatakse kahe rullikute vahel liikuva poorse lindi vahelise rõhu rakendamise teel. Protsess jaguneb kolmeks: sette konditsioneerimine, madalsurve (~ 4 bar) rakendamine settekoogi tekitamiseks ning lõpuks kõrgsurve (~ 7 bar) tekitamine, kui lint läbib rullikusarja. Viimasel rullil kaugenevad linnid teineteisest ning tahesete kukub väljundi kaudu settekonteinerisse. Lõpus kõrgsurvepestakse linnid puhtaks, et kõrvaldada nende pooridesse kogunenud tahked ained. Settevesi langeb läbi poorse lindi seadme põhja ning voolab sealt välja. Sette tahendamise tulemus sõltub sette omadustest, keemilise konditsioneerimise viisist ja toimeainest, rakendavast survest, masina ehitusest ning lindi poorsusest, kiirusest ja laiusest. Lintfilterpresside töönäitajad on kirjas tabelis 17.9.



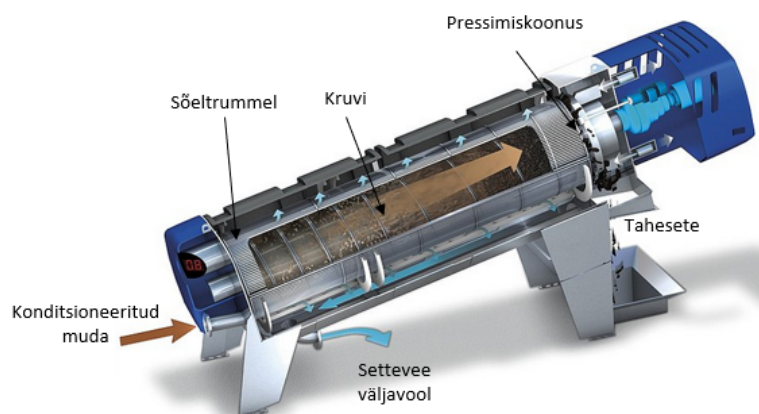
Joonis 17.11. Lintfilterpress [27]

Tabel 17.9. Lintfilterpresside töönäitajaid [3]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	2 – 40
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	100 – 2 000
Rihma laius	mm	800 – 3 000
Rihma liikumiskiirus	m/min	0,4 – 6
Elektriline võimsus (koos lisaseadmetega)	kW	7 – 20

- **Kruvipress**

Kruvipressi (joonis 17.12) tööpõhimõte on üldiselt sama mis kruvitihendil, peamine osa on kaldu olev silindriline sõeltrummel, mille sees pöörleb sisemine kruvi. Konditsioneeritud muda voolab flokulatsioonimahutist kruvipressi trumli alumisest otsast ning liigub pöörleva kruvi tõukel trumli ülemises otsas oleva väljavoolu poole. Sete pressitakse kokku trumli ülemises koonusekujulises osas. Trumli pesemiseks on selle välisseina taga harjasüsteem ja veepihustid. Settevesi pääseb trumlist välja läbi perforeeritud avade. Kruvipresside töönäitajad on kirjas tabelis 17.10.



Joonis 17.12. Kruvipress (Huber)

Tabel 17.10. Kruvipresside töönäitajaid [3]

Näitaja	Ühik	Väärtus
Mudaläbilaskevõime	m ³ /h	5 -30
Tahkete ainete läbilaskevõime	kg/h	10 – 1 000
Trumli läbimõõt	mm	200 – 1 200
Trumli pöörlemiskiirus	1/min	700 – 3 000
Elektriline võimsus (koos lisaseadmetega)	kW	0,25 – 5,5

- **Tsentrifuugid**

Tsentrifuugi tööpõhimõtet on käsitletud mehaanilise tihendamise jaotises, käesolevas on piirdutud näitega 100 000 ie reostuskoormusega olmereoveepuhasti tahendusseadme eelvalimise kohta. Tihendamise- ja tahendamise-seadmete valik sõltub:

- reovee tahkete ainete sisaldusest, mis sõltub puhasti koormusest, mida on võimalik arvutada BHT, KHT ja HA kaudu. Keskmise ööpäevane liigmudakogus on näiteks 100 000 ie jõudlusega reoveepuhastusjaamas ca 6000 kg/d;

- reovee hulgest, mis sõltub puhastiosast, millest reoveesete on võetud: bioloogilises aktiivmudamahutis (mudasisaldus 4 % = 40 g/l) on see 1 500 m³/d, järelsetitis (sisaldus 8 %) 750 m³/d ning gravitatsioonilises settetihendis (sisaldus 4%) 150 m³/d.

Kui soovitakse reoveesetet tahendada 10 tundi ööpäevas kahe tsentrifuugiga (see võimaldab töötada 20 tundi ööpäevas ja seadmeid kordamööda hooldada + täiendavat varu) on ühe tsentrifuugi koormus vastavalt tahke aine kogusele 3000 (kg/päevas)/10 (h) = 300 kg/h.

Ühe tsentrifuugi tunnivooluhulk on veekoguse põhjal:

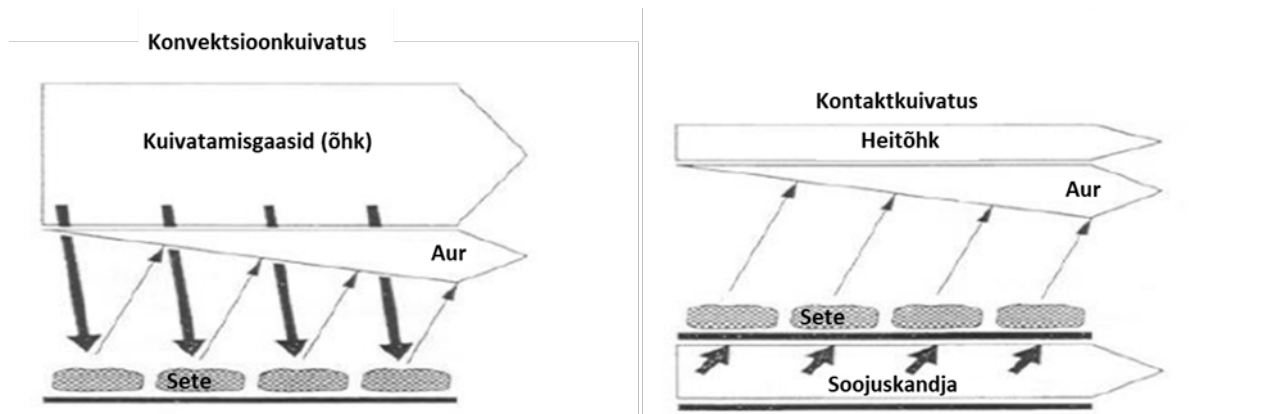
- aktiivmudamahutist 750 (m³/d)/10 (h) = 75 m³/h;
- järelsetitist 375 (m³/d)/10 (h) = 38 m³/h;
- gravitatsioonilisest settetihendist 75 (m³/d)/10 (h) = 7,5 m³/h;

Tahendusseadmete tootekataloogides on tavaliselt toodud seadmete jõudlusnäitajad (tahke aine kogus ja vooluhulk), mille puhult tuleb kindlasti piisava varuga tagada mõlemad näitajad. Seadme tegelik mudel tuleb koos tootja inseneridega täpsustada hilisemas projekteerimisfaasis, võttes täpsemalt arvesse nii sette omadusi, puhasti koormust ja selle kõikuvust jm tegureid.

17.2.3 Reoveesete kuivatamine

Reoveesete kuivatamisega on võimalik kõrvaldada (aurustada) sette baktermassi rakkude vaheline ja sisene vesi. Kasutusel on termilised tehnoloogiad, mis jagunevad konvektsioonkuivatuseks (kuivatamine õhu abil) ja kontaktkuivatuseks (kuivatamine kuuma pinna peal) (joonis 17.13). Mõlemal puhul aurustatakse settes olev vesi ning puhutakse see õhuga süsteemist välja. Võimalik on ka radiatsioon, milles soojusülekanne toimub elektromagnetilise kiirguse kaudu.

Kuivatamisel kasutatakse vee transportimiseks seadmes ringlevat õhku, mille hulk sõltub maksimaalsest küllastunud auru rõhust antud temperatuuril. Õhuhulk määratakse Mollieri diagrammi abil, millelt leitakse termodünaamilise arvutuse jaoks vajalikud näitajad. Mida kõrgem on kuivatis vett transportiva ja soojusenergiat üle kandva õhu temperatuur, seda väiksem on õhukulu. Madalatel temperatuuridel võib juhtuda, et vee kõrvaldamiseks vajalik õhuhulk on suur ning selle entalpia (soojussisaldus) on suurem kui vee aurustamiseks ja sette soojendamiseks teoreetiliselt kuluv energia. Entalpia (ühik džaul) kirjeldab vedeliku, gaasi, auru jm koguenergiat – siseenergiat ja rõhuenergiat. Gaasi entalpia sõltub temperatuurist ja rõhust.



Joonis 17.13. Kuivatamise füüsikalised võimalused [4]

Kuivatamisel kulub soojus sette soojendamisele ning vee aurustamisele (selleks on vaja ligikaudu 2400 kJ/kg vee kohta). Tegelik energiakulu on ca 15–20% suurem, sest väikese veesisalduse puhul hakkab aurustamiseks vajalikku energiat mõjutama vee kapilaarjõud.

Settes sisalduva veetoni vee aurustamiseks kulub sõltumata kuivatamise temperatuurist energiat:

$$Q_{aur} = \frac{2\,400 \text{ kJ/kg} \cdot 1,2 \cdot 1\,000 \text{ kg}}{3\,600} = 800 \text{ kWh.}$$

Energia kulub ka tahendatud settes oleva vee soojendamiseks arvestades, et energiakulu vee temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra on 4,18 kJ. Sette biomassi soojendamiseks kuluva energia määramisel arvestatakse kuiva mulla erisoojusega 0,8 kJ/kg°C.

Kuivatatava sette temperatuur on alati madalam kui protsessi juhitava õhu temperatuur. Mida kõrgem on temperatuur, seda suurem on isesüttimise oht. Sette kuivatusjärgne temperatuur sõltub kuivatustehnoloogiast ning seadmest. Mida kõrgema töötemperatuuriga on kuivatussüsteem, seda väiksem on seadmete vajalik maht/tööpind ja seega ka alginvesteering. Samas kulub kõrgema temperatuuri puhul rohkem primaarenergia ning suuremad on ka mitmesugused ohud (isesüttimine, sette kittimine). Madalama temperatuuriga kuivatamisel on võimalik ära kasutada jääkenergiat (mitmesuguste voogude soojustagastusi).

Suurem osa reoveesettes sisalduvast veest (umbes 60%) kõrvaldatakse kuivatamise esimeses etapis: umbes 25–45% kuivainesisaldusest kuni liimifaasi saavutamiseni. Reoveesetted on väga kleepuvad vahemikus 45–65% KA (liimifaas). Tahendatud muda < 2 MJ/kg kütteväärtus suureneb poolkuivatatud muda puhul kuni 4 MJ/kg.

Edasisel kuivatamisel (70 kuni 90% KA) kõrvaldatakse ainult väike hulk reoveesettes algselt sisaldunud veest (umbes 30–35%). Täielikult kuivatatud sette kütteväärtus on umbes 10 MJ/kg, mis on võrreldav pruunsöega ning pakub häid tingimusi transpordiks, ladustamiseks ja mõõtmiseks, eriti

kui kuivaine saadakse väikese tolmu sisaldusega ja suure puistetihedusega graanulitena. Täielikult kuivatatud reoveesete on bioloogiliselt stabiilne ja paindlik. Täielikult kuivatamine vähendab transporditava reoveesete massi umbes 70% ja transpordimahtu umbes 60%. Täielikult kuivanud reoveesete on tuleohtlik ja võib teatud tingimustel moodustada plahvatusohtlikke õhu ja tolmu segusid.

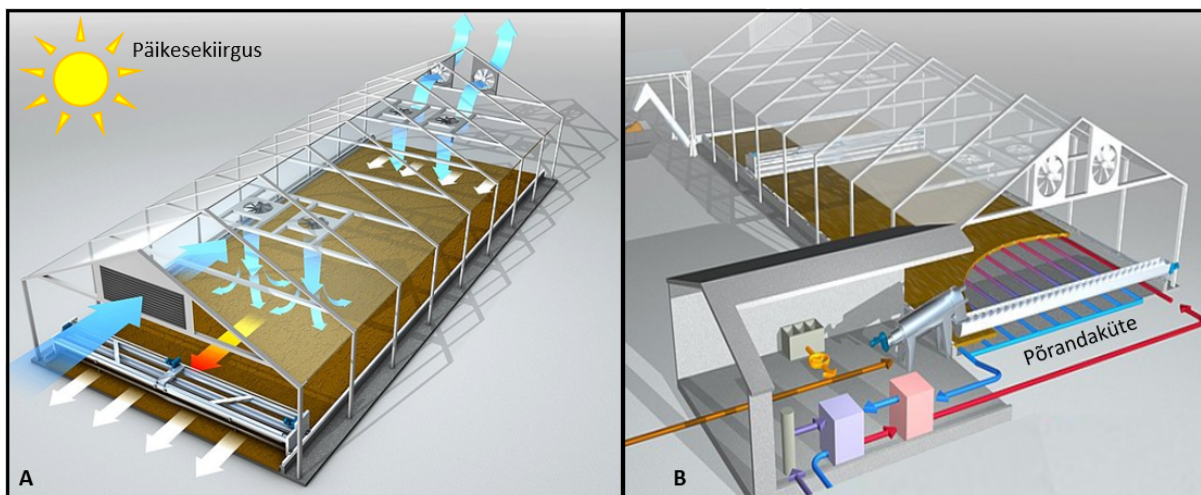
Tavalised kuivatussüsteemid on tööstusliku iseloomuga ja hõlmavad tavaliselt:

- tahendatud sette vahehoidlaid;
- muda struktureerimist;
- muda kuivatamist;
- aurustunud vee kondenseerimist;
- heitsoojuse taaskasutamist;
- kuivmaterjali jahutamist ja ladustamist;
- soojuse tootmis- ja ülekandesüsteeme;
- lõhnagaaside tuvastamist ja töötlemist.

Mudakuivatussüsteemid koosnevad suurest hulgast komponentidest, mida tuleb protsessi ja ohutuse seisukohalt ühendada, et moodustuks kompleksne üksus.

Päikesekuivatustehnoloogia on tavaliste termiliste kuivatitega võrreldes oluliselt lihtsam. Seevastu nõuab see oluliselt suuremat kuivatamisala ning sõltub suuresti kliimatilistest oludest. Eesmärk on kasutada energiaallikana peamiselt päikesekiirgust, viies primaarenergia tarbimise võimalikult väikeseks. Väga suurt rolli mängib ka õhu niiskus, sest õhuvahetus on peamisi tegureid süsteemi tõhusaks toimimiseks.

Tahendatud sete kantakse läbipaistva katusega kaetud sillutatud (tavaliselt betoon) alale, mis on võrreldav tavapärase kasvuhoonega (joonis 17.14). Lühilaineline päikesekiirgus siseneb hoonesse ning peegeldub maapinnalt pikalainelise soojuskiirgusena, mis hoonest välja ei pääse. Kasvuhooneefekt viib hoone siseõhu soojenemiseni. Niiske õhk juhitakse hoonest välja ventilaatorite abil. Tavaliselt on hoone varustatud põrandaküttega, mis võimaldab setet kuivatada ka ebasoodsates (liigne õhuniiskus, madal temperatuur) oludes. Põrandaküttes saab ära kasutada reoveepuhasti jääsoojust (nt koostootmisjaama metaantankist). Sobivad ka soojuspumbalahendused, milles energia saadakse heitveest. Kesk-Euroopas on päikesekuivatuse puhul levinud lahendus, et talvistes oludes ulatub põrandakütte osakaal 60–75%-ni kogu kuivatuse energiast.



Joonis 17.14. Huberi päikesekuivatusjaam [4]: A – suvistes oludes, mil peamine kuivatusenergia saadakse päikesekiirguselt ja õhuvahetusest; B – talvistes oludes, mil peab rakendama põrandakütet

Praktikas kestab kuivatustsükkel enamasti 6 kuni 14 päeva. Soojas kliimas või suviti parasvöötme laiuskraadidel piisab kuuest päevast, külmas kliimas pikeneb kuivamisperiood kahe nädalani. Eestis ega põhjanaabrite juures päikesekuivatust veel teadaolevalt rakendatud ei ole.

Olmereoveepuhastite settekuivatite juhise DWA M-379 [4] eelised ja puudused on kokku võetud tabelis 17.11.

Tabel 17.11. Reoveesettkuivatite eelised ja puudused [4]

Reoveesettkuivatiti	Eelised	Puudused
Plaatkuivatiti (ingl <i>disk type dryer</i>)	Hea soojusülekanne. Kompaktne disain. Sobib hästi siis, kui läbilaskevõime peab olema suur.	Vahelduv töötamine ei ole soositud. Vajalik on kuivatatud sette osaline ringlus. Teatud tingimustel võib kaasneda suur tolmu- ja kiudainesisaldus.
Õhukese settekihi kuivatiti (ingl <i>thin film dryer</i>)	Lihntne ja vastupidav tehnoloogia. Ei ole mõjutatud tahendatud sette kõikuvatest KA-sisaldustest. Liimifaasi probleemideta läbimine.	Täielik kuivatamine on energeetiliselt ebasoodne.
Kruvikuivatiti (ingl <i>centridry drier</i>)	Võimalikud on kiired sisse- ja väljalülitused. Liimifaasi probleemideta läbimine. Sobib keskmise suurusega jaamadele.	On tundlik KA kõikumise suhtes. Kuivatatud sette suhteliselt suur tolmusisaldus.
Lintkuivatiti (ingl <i>belt drier</i>)	Liimifaasi probleemideta läbimine. Väike kulumine. Toote kvaliteeti on lihtne reguleerida.	Suur ülekuumenemise ja tule oht. Settetahendus tuleb kohandada granuleerimisega.
Trummelkuivatiti (ingl <i>drum type dryer</i>)	Lihntne ja vastupidav tehnoloogia. Sobib hästi suure jõudlusega jaamadele. Toote kvaliteeti on lihtne reguleerida.	Vahelduv töötamine ei ole soositud. Väike soojusülekanne. Vajalik kuivatatud sette osaline ringlus.
Keevkihtkuivatiti (ingl <i>fluidised bed drier</i>)	Väike kulumine (pole liikuvaid osi). Liimifaasi probleemideta läbimine. Toote ühtne struktuur.	Suured rõhukaod. Piiratud (väike) jõudlus.

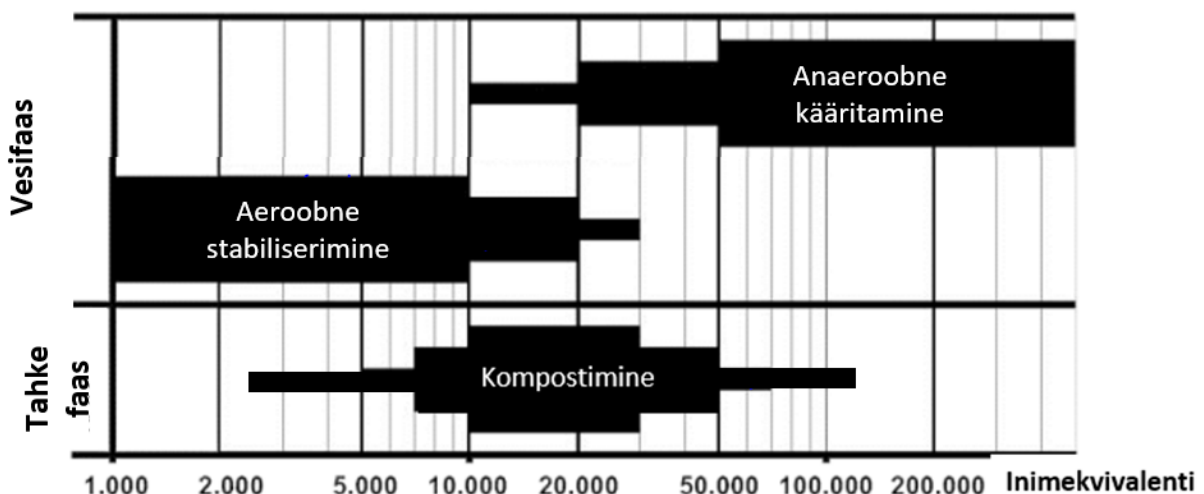
Reoveesettekuivati	Eelised	Puudused
Päikesekuivati (ingl <i>solar drier</i>)	Eriti väike energiakulu, lihtne tehnoloogia, lihtne hooldus, väike kulumine.	Suur ruumivajadus, väga pikad kuivamisajad, jõudlus sõltub ilmastikutingimustest.
Päikesekuivati koos lisaküttega (jääksoojuse ärakasutamine)		

17.3 Reoveesette stabiliseerimine ja hügieniseerimine

17.3.1 Stabiliseerimise ja hügieniseerimise ülevaade

Reoveesette stabiliseerimise all mõeldakse selles sisalduvate ühendite töötlemist viisil, mis muudab nad keskkonnale võimalikult ohutuks. Peaesmärk on orgaanilise aine lagundamine ning sekundaarsed eesmärgid sette massi vähendamine, biogaasi saamine (ainult anaeroobsel töötlemisel), patogeenide vähendamine ja sette koostise ühtlustamine [13].

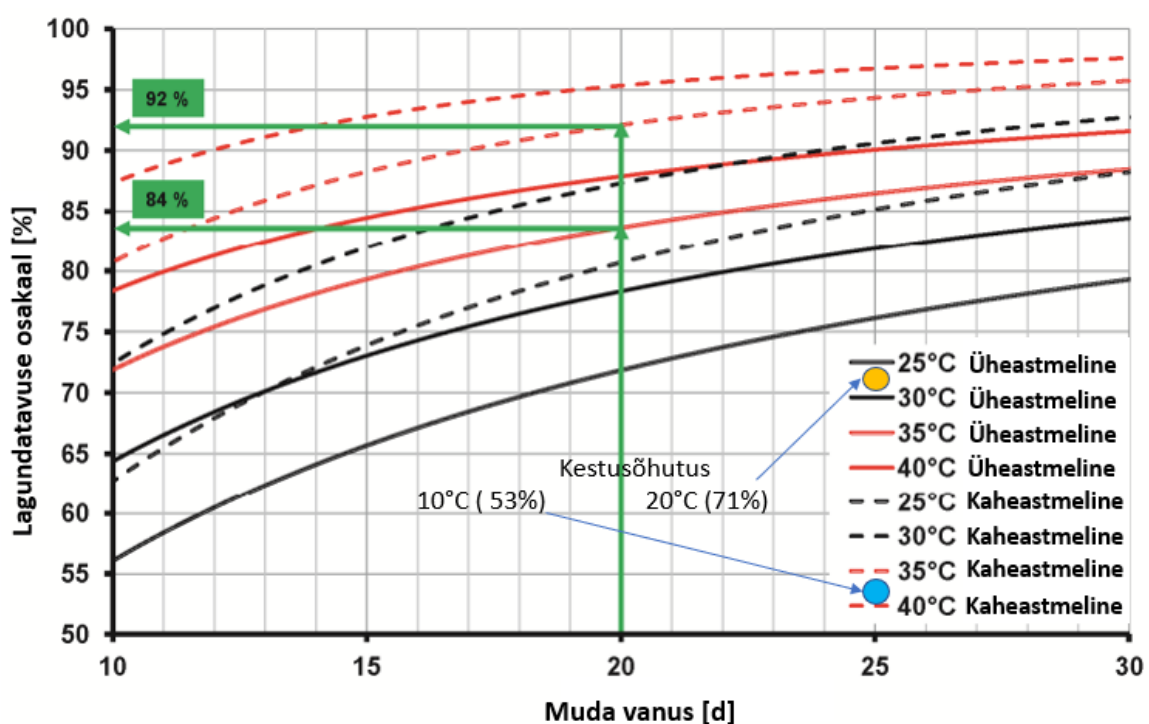
Stabiliseerimistehnoloogiaid on palju ning nende abil saavutatav tulem seetõttu erinev. Stabiliseerimismeetodite ja -eesmärkide tundmine on oluline seda enam, et eesmärgini võib viia mitme tehnoloogia järjestikune kasutamine. Stabiliseerimist on eelkõige vaja selleks, et reoveesetet saaks hiljem keskkonda häirimata kasutada. Joonisel 17.15 on ülevaade kõige rohkem levinud stabiliseerimisviisidest ja nende rakendamisest sõltuvalt puhasti suuruselt nõnda, et tegevus oleks majanduslikult mõistlik.



Joonis 17.15. Eri settikäitlusviiside rakendamine sõltuvalt puhasti suuruselt [13]

Sette bioloogilisel stabiliseerimisel lagundavad orgaanilist ainet bakterid, kusjuures lagundamiskiirust piirab hüdrolüüs, s.o biolagundamise esimene etapp. Hüdrolüüsi käigus lagundavad samad bakterid orgaanilised makromolekulid lahustuvateks monomeerideks nii anaeroobsetes kui ka aeroobsetes

tingimustes, mistõttu lagunemine ei sõltu keskkonnatingimustest (aerobne/anaerobne), vaid peamiselt ainesaldusest ja hüdroloüsi kiirusest (mis omakorda sõltub temperatuurist). Joonisel 17.16 on kujutatud hüdroloüsi kiiruse alusel koostatud orgaanilise aine lagunemise graafikud läbivoolsete süsteemide (ühe- või kaheastmeline) jaoks, milles maksimaalseks (100%) lagundatavuseks on loetud kogu biolaguneva osa teoreetiline lagundatavus. Graafikul on roheline joonega kujutatud metaantankide tavaline töörežiim (mudavanus 20 päeva, temperatuur 37–40°C), millega saavutatakse üheastmelisel käitamisel ca 84% ja kaheastmelisel 92% lagundatavus. Graafikul on näidatud ka Eestis levinud kestusõhustus (üheastmeline), millega 10°C puhul saavutatakse 53% ja 20°C korral 71% lagundatavus.



Joonis 17.16. Aine biolagunemine sõltuvalt temperatuurist ja muda vanusest olenevalt sellest, kas protsess on ühe- või kaheastmeline. Kehtib nii aerobse kui anaerobse stabiliseerimise kohta [13]

Reoveesette stabiliseerimine algab juba reovee puhastamise ajal, kusjuures kõige levinum meetod on **aerobne vedelstabiliseerimine** (varem nimetati seda tehnoloogiat kestusõhustuseks). Tegemist on protsessiga, milles aktiivmuda vanus on aerobsetes tingimustes ($O_2 > 1,0$ mg/l) üle 25 päeva, mille jooksul jõuab baktermassi seotud orgaaniline aine suures osas bioloogiliselt laguneda, s.o stabiliseeruda. Vedelstabiliseerimine kulgeb aerotankis (kui ruumi on) või omaette stabiliseerimismahutis (siis on tegemist teise astmega). Eesti tavapärasel madalatel temperatuuridel ehk psührofiilsetes tingimustes (temperatuur 10–15°C) laguneb nõnda umbes pool orgaanilisest ainest. Tulemusena vähenevad hapnikutarve, haisuteke ja haigustekitajate hulk. Väikepuhastites (nt soojas kliimas) stabiliseerimine sellega lõpebki ning sete võidakse vedelal kujul põllule viia ning orgaanilise aine lagunemine jätkub pinnases. Sellel ei ole erilist keskkonnamõju, sest vedela sette KA-

sisaldus on väike. Eesti tingimustes ei ole see küll reaalne, sest väga tõenäoliselt ei vasta see ühelegi kehtivale stabiliseerimise piirmäärale (nõnda stabiliseeritud sette hapnikutarve on ca 60 mgO₂/gKA*d [13]). Seetõttu on meil levinud vedela sette vedu suurematesse puhastitesse edasiseks käitlemiseks.

Suuremates puhastites ei ole vedelsette stabiliseerimine mõistlik ning vedelstabiliseeritud sete tahendatakse. Tahendamisel biomass kontsentreeritakse ning bioloogilised laguprotsessid intensiivistuvad – muda baktermassi sees on piisavalt palju kergesti lagunevat orgaanilist ainet. Märksa suurema keskkonnamõju tõttu ei saa tahendatud setet otse põllule viia ning seda tuleb näiteks kompostimisega stabiliseerida.

Suurtes puhastites on tavapärane stabiliseerimismeetod **anaeroobne metaankääritamine** (vt jaotist 17.3.2). Sete tihendatakse ning kääritatakse vedelal (pumbataval) kujul kõrgematel temperatuuridel (mesofiilne protsess tavaliselt temperatuuril 37 °C ja termofiilne temperatuuril 55°C). Käärimise ajal laguneb peale bakterimassi vahelises settevees oleva orgaanilise aine (primaarsette) ka varasemates etappides aeroobselt stabiliseeritud bakterimass ning väheneb patogeenide hulk. Anaeroobselt käideldud sete on juba märksa stabiilsem (tulemus on käärimistemperatuurist ja -ajast) ning lihtsamini kasutatav. Kasutamise hõlbustamiseks tahendatakse käärinud setet tsentrifuugimise teel. Kuna pärast anaeroobselt stabiliseeritud sette tahendamist on oodata teatavat mikrobioloogilise aktiivsuse tõusu, tuleb seda enne kasutamist järeltöödelda. Selleks segatakse sete tugimaterjaliga ja jäetakse kompostimisele sarnaneval moel järelvalmima. Peamine erinevus on selles, et temperatuuri tõusmist 60–65°C-ni enam ei eeldata (vt joonist 17.16), sest väga suur osa biolagunemisest on juba toimunud. Suurema bioogaasi toodangu saamiseks võib reoveesetetele ka biolagunevaid jäätmeid lisada [1].

Eestis on kõige levinum sette stabiliseerimise meetod **kompostimine** (vt jaotist 17.3.1). Kompostida saab ainult tahendatud reoveesetet (KA tavaliselt 16–25 %), millesse tuleb segada üsna suur hulk tugimaterjali. Protsess on eksotermiline – kompostimise algfaasis tõuseb temperatuur (kui on piisavalt kergesti lagunevat orgaanilist ainet) 65 °C-ni või kõrgemalegi ning enamik tõvestavaid baktereid, soolenugiliste mune ja umbrohuseemneid hävib. Tabelis 17.12 on näidatud, millist temperatuuri ja viibeaega on vaja, et kompost hügieeniliseks muutuks.

Kompostimine kestab kaua – mõne nädala pikkusele termofiilsele faasile järgneb pikk, kümme või enamgi nädalat kestev stabiliseerumis- ja järelvalmimisfaas. Intensiivne ja kaua kestev protsess tagab selle, et kompost muutub nii stabiilseks, et see põllule laotatuna ei põhjusta muutuvates keskkonnatingimustes keskkonnahäiringuid. Samasuguse toimega on humifitseerimine (vt jaotist

17.3.3), ent see annab kompostimisele ligilähedase tulemuse alles mitu aastat kestval käitlemisel ning selles termofiilset faasi ei ole.

Tabel 17.12. Mõningate bakterite hävitamiseks vajalik temperatuur ja viibeaeg [5]

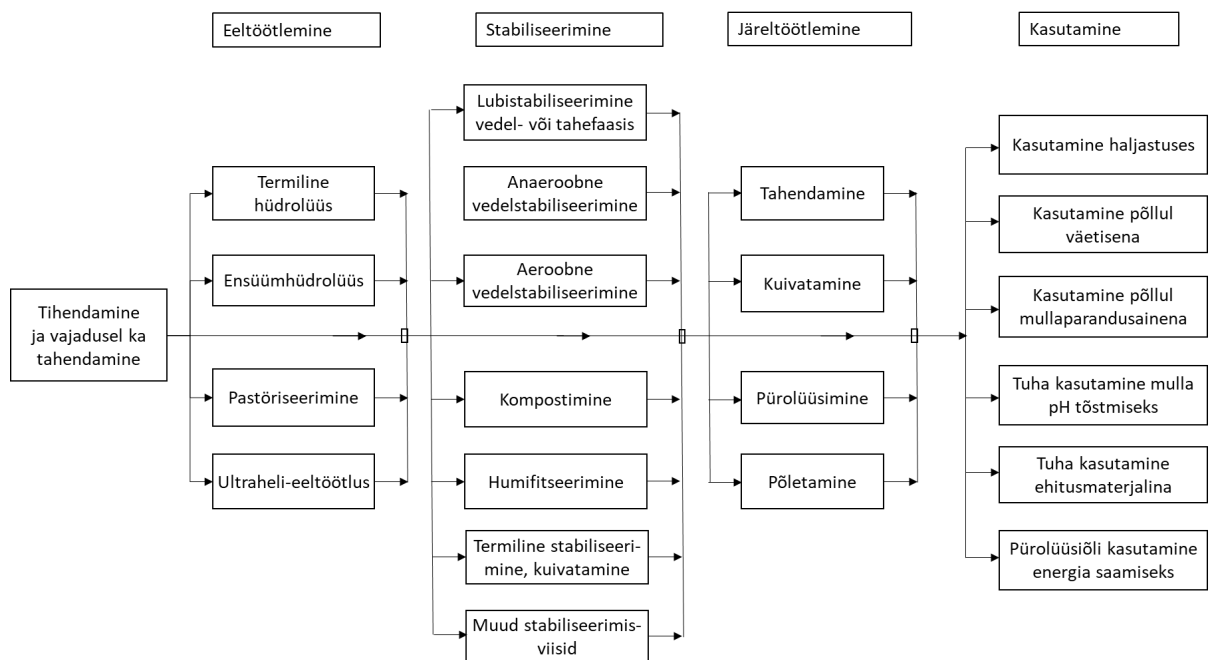
Bakterid	Vajalik temperatuur ja viibeaeg
<i>Salmonella typhosa</i>	Ei paljune temperatuuril üle 46 °C, surevad temperatuuril 55–60 °C kolmekümne ning 60 °C juures 20 minutiga; kompostis hävivad kiiresti
<i>Salmonella sp.</i>	Surevad 55 °C juures ühe tunni ning 60 °C juures 15–20 minutiga
<i>Shigella sp.</i>	Surevad 55 °C juures ühe tunniga
<i>Escherichia coli</i>	Enamik sureb 55 °C juures ühe tunni ning 60 °C juures 15–20 minutiga
<i>Entamoeba histolytica cysts</i>	Surevad 45 °C juures mõne minuti ning 55 °C juures mõne sekundiga
<i>Taenia saginata</i>	Surevad 55 °C juures mõne minutiga
<i>Trichinella spiralis</i> larvae	Hävivad 55 °C juures kiiresti, 60 °C juures kohe
<i>Brucella abortus</i> or <i>Br. Suis</i>	Surevad 62–63 °C juures kolme minuti ning 55 °C juures kiiremini kui tunni jooksul
<i>Micrococcus pyogenes</i> var. <i>aureus</i>	Surevad 50 °C juures kümne minutiga
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Surevad 54 °C juures kümne minutiga
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> var. <i>hominis</i>	Surevad 66 °C juures 15–20 minutiga, kuumutamisel 67 °C juures kohe
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Surevad 55 °C juures 45 minutiga
<i>Necator americanus</i>	Surevad 45 °C juures 50 minutiga
<i>Ascaris lumbricoides</i> eggs	Surevad üle 50 °C juures kiiremini kui tunni jooksul

Reoveesetet on võimalik stabiliseerida ka **termiliselt** – kuumutamise abil pastöriseerides, kuivatades, pürolüüsidest või põletades. Need protsessid on väga energiamahukad ning pole Eestis seni kasutatud leidnud. Nii mõnigi neist võib tulevikus rakendust leida järeltöötlustapina siis, kui setet on vaja hügieniseerida, nt kui seda käideldakse koos loomsete kõrvalsaaduste (nt rasvade) või toidujäätmetega. Sette stabiliseerimismoodused on kokku võetud joonisel 17.17.

Sette töötlemist ning kasutamist haljastuses, rekultiveerimisel ja põllumajanduses reguleerib keskkonnaministri määrus [1]. Sete (määrus lubab nii reoveesette kui ka teatavate biolagunevate jäätmete kooskasutamist) loetakse stabiliseerituks, kui täidetud on vähemalt üks järgnevatest tingimustest:

- hapnikutarve on alla 10 mg O₂/g kuivaine (KA) 96-tunnise mõõtmisperioodi järel (tselluloosi, paberi ja kartongi tootmise ja töötlemise tulemusel tekkinud sette korral, mis sisaldab üle 50% puitkiudu sisaldavaid jäätmeid ja milles on tugiainena kasutatud puukoort, on hapnikutarve alla 25 mg O₂/g KA 96-tunnise mõõtmisperioodi järel);

- orgaanilise aine (KAL) sisaldus on vähenenud vähemalt 38% võrra;
- põletuskao ja kuivaine suhe KAL/KA on alla 0,6;
- lenduvate rasvhapete sisaldus on alla 0,43 g keemilist hapnikutarvet/g OA;
- biogaasi jääkpotsentsiaal on alla 0,25 l/g OA.



Joonis 17.17. Sette stabiliseerimismoodused [6] järgi

Näitaja sette stabiilsuse hindamiseks tuleb valida stabiliseerimisprotsessist sõltuvalt. Keskkonnaministri määruse [1] järgi tuleb aeroobselt stabiliseeritud, sealhulgas kompostitud sette kvaliteedi hindamiseks kasutada kolme esimest näitajat. Anaeroobselt stabiliseeritud sette kvaliteedi hindamiseks tuleb kasutada nelja viimast näitajat. Reoveesette tootestamise uuringu [7] tulemused näitasid, et kompostide stabiilsuse hindamiseks sobib kõige paremini hapnikutarbe määramine. Katsekompostide stabiilsust ei olnud võimalik adekvaatselt hinnata orgaanilise aine vähenemise kriteeriumi ja põletuskao ja kuivaine suhte KAL/KA alusel. Komposti stabiilsuse hindamisel on Euroopas kõige laiemalt kasutusel hapnikutarbe määramisel põhinevad meetodid.

Enne stabiilsuse saavutamist peab sete muutuma hügieeniliseks eelkõige piisavalt kõrge temperatuuri abil, mille tulemusena haigusttekitavate patogeenide sisaldus settes vastab järgmistele tingimustele:

- *Esherichia coli* alla 1000 bakteri ühe grammi töödeldud sette märgkaalu kohta, väljendatuna ühikutes MPN (ingl *most probable number* ehk kõige tõenäolisem bakterite arv proovis), PMÜ (pesa moodustav ühik) või muus samaväärses ühikus;

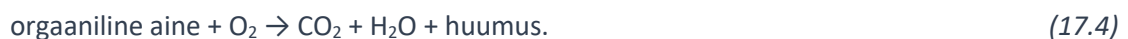
- mitte üle ühe helmindimuna 10 grammi töödeldud sette märgkaalu kohta.

Ehkki enamik patogeene hukub 45–55 °C juures juba kümnekonna minutiga (tabel 17.12), siis seadusnõuded [1] reguleerivad kompostimise kestust sõltuvalt kompostitava materjali temperatuurist järgmiselt:

- kompostimisel aunades temperatuuril ≥ 55 °C vähemalt kümme ööpäeva;
- kompostimisel aunades temperatuuril ≥ 65 °C vähemalt kolm ööpäeva;
- kompostimisel reaktoris temperatuuril ≥ 60 °C vähemalt kolm ööpäeva.

17.3.2 Reoveesette kompostimine

Setet eraldub reoveepuhastites rohkesti ning selle käitlemine on tülikas, kallis ja aeganõudev. Reoveesete on väga veerikas, sisaldab rohkesti kergesti lagunevat orgaanilist ainet, haiseb ning on mikrobioloogiliselt tugevasti saastunud. Käitlemise peamine eesmärk on stabiliseerida sete, st lagundada orgaaniline aine ja hävitada patogeensed organismid. Settes olev orgaaniline aine muutub kompostimise tulemusena huumuseks, süsihappegaasiks ja veeks:



Jäätmeseaduse [8] kohaselt kuulub reoveesete jäätmete hulka ning seda peab käitlema selle seaduse nõudeid järgides. Reoveesette kompostimine loetakse jäätmekäitluseks ning selleks tuleb taotleja vastav luba.

Kompostimistehnoloogia valimisel tuleb läbi mõelda soovid ja võimalused. Vaja on selgeks teha, kas koos reoveesetega soovitakse kompostida ka muid orgaanilisi jäätmeid, sest sellest olenevad kehtivad nõuded. Kindlasti on vaja otsustada, kas komposti on kavas turustada tootena või jääb ta jäätmeks. Sette töötlemist ja haljastuses, rekultiveerimisel ja põllumajanduses kasutamist reguleerib keskkonnaministri määrus [1]. Kui eesmärgiks seatakse toote valmistamine, tuleb nii tootmiskorraldus kui ka kompost sertifitseerida [9]. Sertifitseerimine eeldab kompostimise seiret, dokumenteerimist ja temperatuuri sagedast mõõtmist. Sertifitseeritud komposti kasutamiseks jäätmeluba vaja ei ole.

Prügilasse setet ega settekomposti vedada ei ole võimalik, sest prügilad ei tohi ladestada orgaanilise aine rikkaid ega liiga niiskeid jäätmeid. Pealegi oleks sette ladestamine vastutustundetu, sest taimetoitained läheksid raisku. Setet käitlemata jätta ei tohi, sest hapniku kadumisel muutub see anaeroobseks ning siis tekib ja lendub kasvuhoonegaasina tuntud metaan.

Komposti lähtematerjalid

Reoveesete tahendatakse kruvipressi, pressifiltri või tsentrifuugi abil tihkeks (kuivainet 15–20 %) massiks, sest kompostida saab ainult tahedat setet. Kompostimiseks on vaja settele lisada liigset vedelikku siduvat ning segu poorsust suurendavat tugiainet, et aeroobseks lagunemiseks vajalik õhk kompostitavasse massi sisse pääseks.

Tugiaineks sobivad hakitud puukoor või oksapraht, pallitud põhk, hein vms. Tugiaine lisamisega soovitakse tavaliselt saavutada mitut eesmärki korraga – suurendada kompostitava massi poorsust, vähendada selle niiskust ning korrigeerida C ja N suhet. Et reoveesete on pärast tahendamistki üsna niiske, peab tugiaine kindlasti olema kuiv, seetõttu tuleb seda õigel ajal varuda ning varju all hoida.

Tugiainet peab olema piisavalt palju. Pahatihi püütakse settele lisada tugiainet nii vähe kui võimalik, sest see on kallis ning ülemäärane tugiaine suurendab oluliselt kompostitava massi hulka. Olukorda saaks leevendada nutika töökorraldusega – kompostisegu tuleks kokku segada tugiaine tugeva liiaga (setet algul pool kuni kolmandik soovitus) ning kui kompost on käima läinud (temperatuur hakkab tõusma), alles siis lisada setet juurde.

Tugiaine valimisel on vaja sõnastada eesmärk – kas tugiaine seob vett või mitte; kas ta muudab komposti poorsemaks ilma liialt sagedase läbisegamiseta või mitte; kas ta aitab tasakaalustada C/N suhet või pH-d; kas ta on kättesaadav ja taskukohase hinnaga; kas ta on puhas või sisaldab võõrseid; kas tugiaine jõuab ka ise laguneda või on välja sõelutav ja taaskasutatav ning kas ta on arvel jäätmetena või mitte. Tugiainete omadusi kirjeldab tabel 17.13.

Tabel 17.13. Komposti tugiainete omadusi (kohandatud [10] järgi)

Tugiaine	Head omadused	Halvad omadused
Puukoor	Aunas temperatuur tõuseb, ent mitte väga kiiresti. Puukoor on suhteliselt kergesti kättesaadav ja selle struktuur ilma täiendava purustamiseta hea. C/N = 110–140.	Kvaliteet (tükisuurus, niiskus, pH) kõikuv. Ühtlase kvaliteediga kuiv puukoor on kallis. Kõdunenud puukoor sette kompostimisel tugiaineks ei kõlba.
Hakkpuit	Tänu sobivale ja ühtlasele struktuurile õhustab auna väga hästi ning ei lase seda laiali valguda. Aunas tõuseb temperatuur kiiresti ning püsib kaua kõrgena. Kuivainesisaldus 50–60%, C/N = 250–320. Parim materjal reoveesete kompostimiseks.	Suhteliselt kallis materjal, sest seda ostavad ka katlamajad. Sageli liigniiske ning seob siis halvasti vett.
Põhk	Põhk on parim hakituna. Pärast segamist on aunamaterjal õhuline ning temperatuur tõuseb selles kiiresti. C/N = 85–100,	Aun vajub kiiresti kokku ning seda on vaja tihti segada. Värske põhk seob halvasti vett. Põhupallide purustamine nõuab lisatööd. Pallinöörid tuleks

Tugiaine	Head omadused	Halvad omadused
	kuivainesisaldus (sõltuvalt aastaajast) 50–65%, kaaliumisisaldus suur.	käsitsi välja korjata, sest nad ummistavad aunapöörlit ja viivad mulda mikroplasti.
Turvas	Kuivainesisaldus ca 75%, imab hästi vett. Valida on mitmesuguse struktuuri ja omadustega turvast. Annab kompostile hea väljanägemise.	Peen freesturvas ei lase õhku auna sisemusse ning seetõttu on massi vaja tihti segada. Happeline (pH < 7) ning C/N väike (45–50). Aunas ei tõuse temperatuur piisavalt, mistõttu haigusttekitavad bakterid hävivad aeglaselt. Külmunud aun sulab kaua. Turvas võib olla akumuliseerinud õhust toksilisi aineid.
Puulehed	Struktuur ja niiskus stabiilsed. Odavad ning sügiseti hästi kättesaadavad. Kompost näeb hea välja.	Ei ole aasta ringi saadaval. Võivad sisaldada võõriseid, sh kilekotitükke. C/N väike (40–60). Et temperatuur tõuseb aunas aeglaselt, on seda vaja tihti segada. Suviste ja sügiseste puulehtede omadused ei ole ühesugused.
Hakitud lammutuspuit	Odavam kui puukoor või hakkpuit. Väga kuiv (kuivainesisaldus 80–85%). C/N ≈ 200.	Võib sisaldada ebasoovitavaid võõriseid, sh värvijääke. Struktuur ebaühtlane ning iga koorma omadused on erinevad. Tootena sertifitseerimisel ei ole lubatud.

Sageli kasutatakse kuivatamata puukoorepuru või hakkpuitu, mis suurendavad küll poorsust, ent vett ei imane ega lisa kergesti omastatavat süsinikku. Seetõttu on kompostitav mass liiga niiske ning süsinikku võib puudu jääda. Tugiaine peab olema kuiv ja imama tõhusalt vett, ilma et kompostimassi struktuur muutuks. Mida kõrgemaks tõuseb aunas temperatuur, seda rohkem aurustub vett ning ilmnedu võib paradoks: kui algul oli reoveesetekompost liiga niiske ning vett püüti tugiainetega imada, siis lõpufaasis võib settekompost olla liiga kuiv ning vajada niisutamist. Liiga kuivas keskkonnas aeglustub mikroobide elutegevus ning kompostimine peatub. Niisutamisel tuleb silmas pidada, et:

- kastmisveena saab edukalt ära kasutada kompostimisväljakult ära juhivat liigvett;
- alates sellest, kui kompost on läbinud termofiilse tsooni ja muutunud hügieeniliseks, tohib niisutamiseks kasutada ainult puhast vett.

Tugiainevajaduse saab määrata valemist 18.4 [11]:

$$G_t = \frac{M_j G_j - M_v G_j}{M_v - M_t} \quad (kg), \quad (18.4)$$

kus G_t on tugiaine ja G_j sette märgmass (kg) ning M_t tugiaine, M_j sette ja M_v kompostitava segu soovitatav suhteline niiskus %.

Reoveesette kompostimiseks vajalikku tugiainehulka saab väljendada mahu või massi järgi (tabel 17.14).

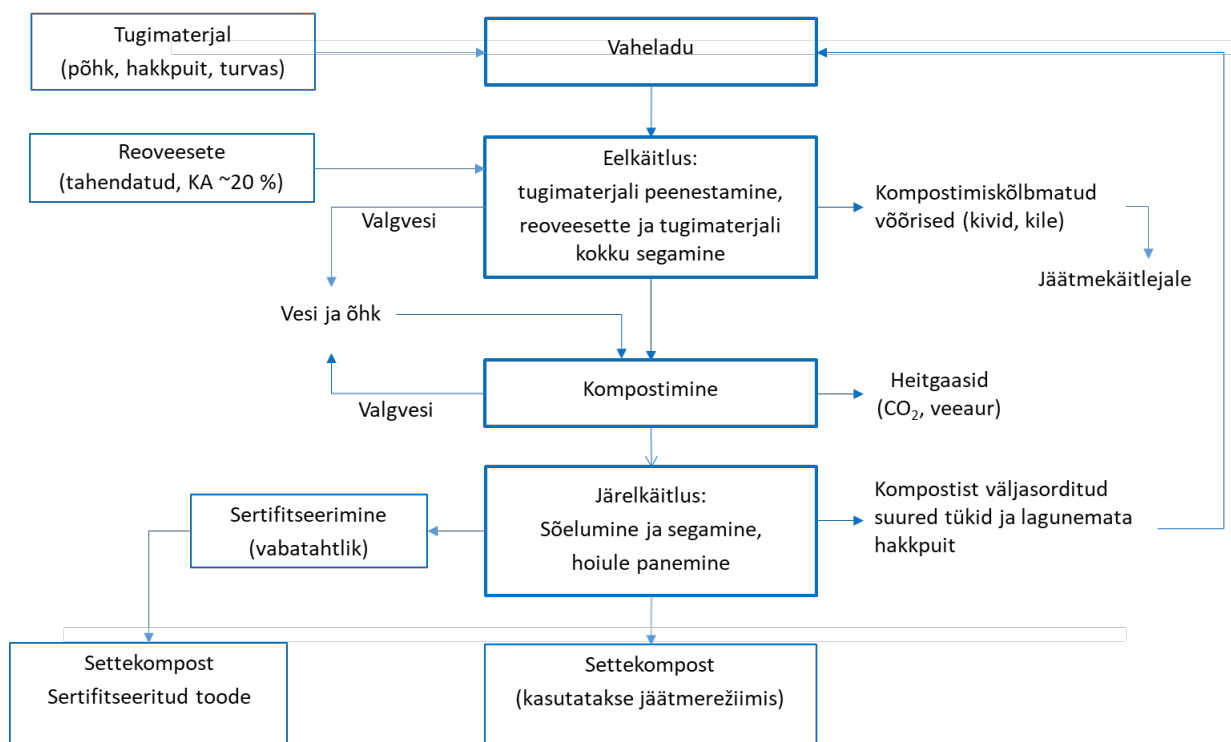
Tabel 17.14. Tugiainevajadus [10, 12]

Tugiaine	Minimaalne tugiainehulk	
	massi järgi %	mahu järgi (sete : tugiaine)
Põhk	20	1 : 2,5–3
Hakkpuit	30	1 : 1,5–2

Hakkpuidu mahumass on 0,25–0,35 t/m³, reoveesette mahumass 0,8–1,0 t/m³.

Kompostimistehnoloogia valik

Reoveesetet on võimalik kompostida mitmel moel. Aunkompostimine on kõige rohkem levinud, sest on paindlik ja kõige vähem investeeeringuid nõudev. Trummelreaktorites valmib kompost kiiremini ning keskkonnaolud on paremini kontrollitavad, kuid see on kallim ning ei sobi suurte koguste jaoks. Kompostimise vooskeem, mis ei sõltu tehnoloogia valikust, on kujutatud joonisel 17.18.



Joonis 17.18. Kompostimise vooskeem

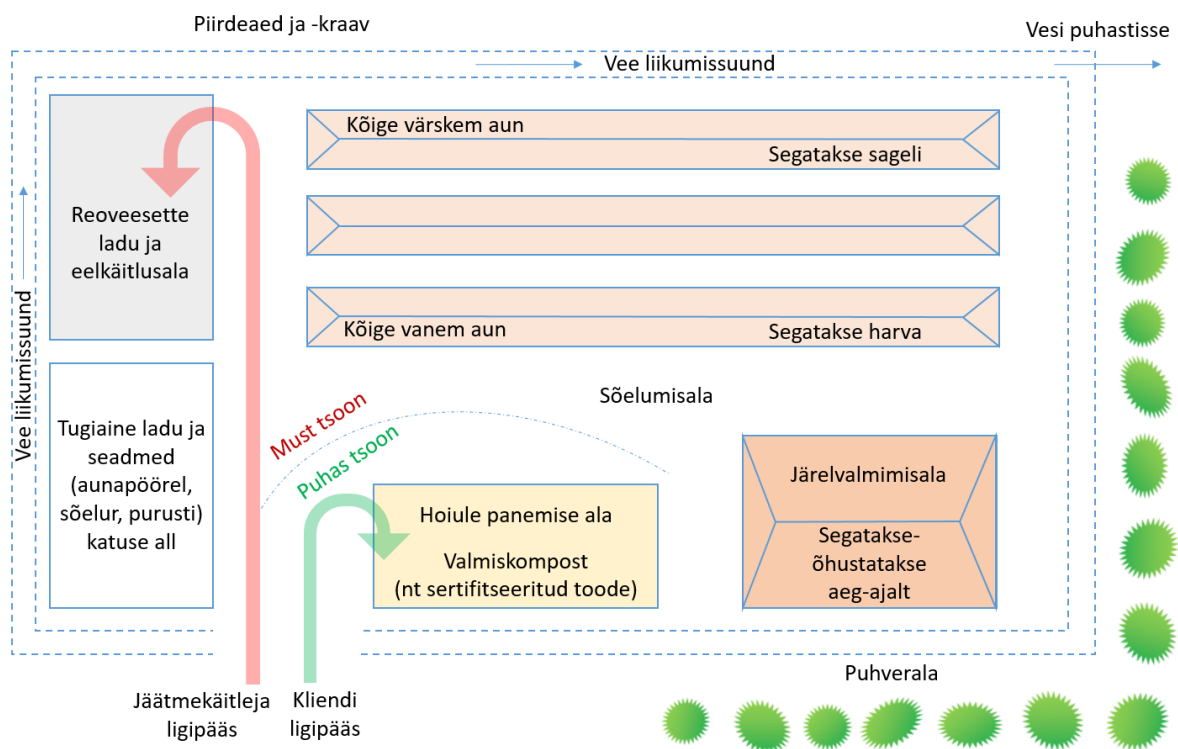
Eelkäitlus seisneb kompostimiskõlbmatute võõraste väljasortimises tugimaterjalist, tugimaterjali peenestamises ja sõelumises (kui vaja) ning kompostimiseks soodsa koostisega (C/N, poorsus,

niiskus) segu valmistamises. Peenestamine kiirendab lagunemist – temperatuur tõuseb ning kompost valmib kiiremini.

Kompostimise ajal on kompostimassi seisundit võimalik hinnata hapnikutarbe ja CO₂ lendumise kaudu või temperatuuri järgi. Kui massi soojenemine jätkub ka pärast auna segamist, on lagunemine aktiivne ning kompostimine kulgeb normaalselt. Kompostimise massibilanss oleneb lähtematerjalist. Valmiskomposti maht on algsest ligikaudu 50 % väiksem. See väheneb veelgi, kui kuivast ja koredast valmiskompostist kõdunemata tugiaine välja sõeluda ja uuesti kasutamiseks alles hoida.

Valmiskompost jäetakse **järelvalmima**. Järelvalmimisaunad anaeroobseks muutuda ei tohi ning seetõttu neid aeg-ajalt segatakse või puhutakse neisse aunaaluste torude kaudu õhku. Järelvalmimise kestuse kohta on õige mitmesuguseid soovitusi – mõnest nädalast kahe aastani.

Komposti väärtuse suurendamiseks võib valmiskompostist ka kasvusegusid valmistada. Silmas tuleb pidada, et kui komposti kavatakse sertifitseerida, siis segusid tohib teha alles sellest kompostist, mis on läbinud sertifitseerimise.



Joonis 17.19. Aunkompostimisplats [10] järgi

Tüüpilisel **aunkompostimisplatsil** (joonis 17.19) on:

- reoveesette ladu (kindlasti katuse all);
- tugiaine ladu (soovitavalt katuse või katte all);

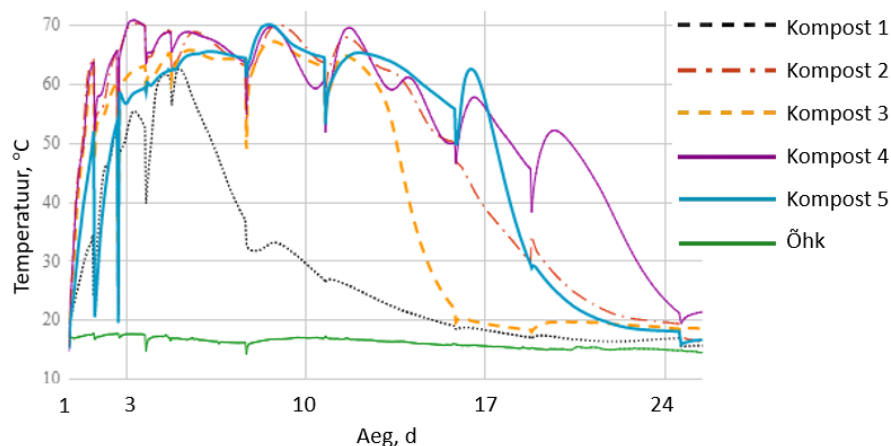
- aunapöörli, sõeluri, hakkuri hoiuala;
- kompostimisala, kus paiknevad aunad;
- nõrgvee kogumissüsteem;
- järelvalmimisala: aunade ja järelvalmimisala jaoks on vaja ruumi 1,2–2,5 m²/t aastas;
- juurdepääsu- ja liikumisteed (puhas ala kliendi jaoks, must ala reoveesette käitleja jaoks);
- piirded;
- kompostimisväljakut ümbritsev haljastatud puhverala (soovitav).

Kompostimisplats on jäätmeseaduse mõistes jäätmekäitluskoht, s.o maa-ala, kus tegeldakse jäätmete taaskasutamisega ning kus ei pea tingimata hooneid olema.

- **Aunkompostimine**

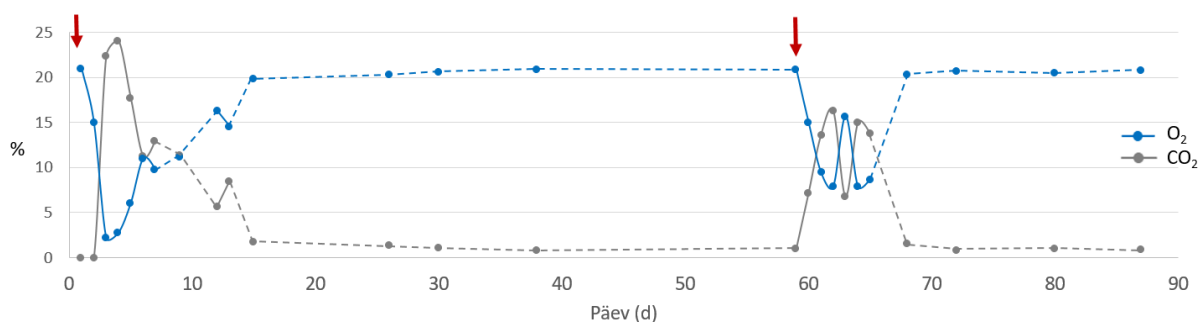
Levinuim reoveesette kompostimise viis on aunkompostimine. Kompostiaunad tehakse tavaliselt 1,5–2 m kõrged ja alt 3–5 m laiad, pikkus oleneb väljaku suurusest. Mida koredam mass, seda suurem võib olla aun. Aun ei tohi olla nii kõrge, et ta omaenese raskuse all ülemäära tihedaks vajub. Valmiskompost õhku palju ei vaja ning selle aun võib olla kõrgem.

Komposti tuleb regulaarselt **segada** – mida sagedamini, seda kiirem on protsess. Segamine hajutab niiskuse ja lõhub klombid, aitab lagugaasil lenduda, rikastab komposti õhuhapnikuga ning soodustab bakterite elutegevust, mis omakorda hoiab kompostitava massi ühtlaselt soojana isegi jaheda ilmaga. Segamine küll algul jahutab massi (seetõttu tuleb talvel olla sellega ettevaatlik), ent siis hakkab temperatuur lisandunud õhuhapniku toel uuesti tõusma (joonis 17.20). See annab tunnistust sellest, et oligi puudus hapnikust ning ka seda, et reoveesete ei ole veel lagunened ning kompost ei ole küps. Kui temperatuur ei tõuse enam ka pärast läbisegamist, viitab see orgaanilise aine stabiliseerumisele, nt joonisel 17.20 saabus see ka kõige ebasoodsama koostisega kompostil 25-ndal päeval.



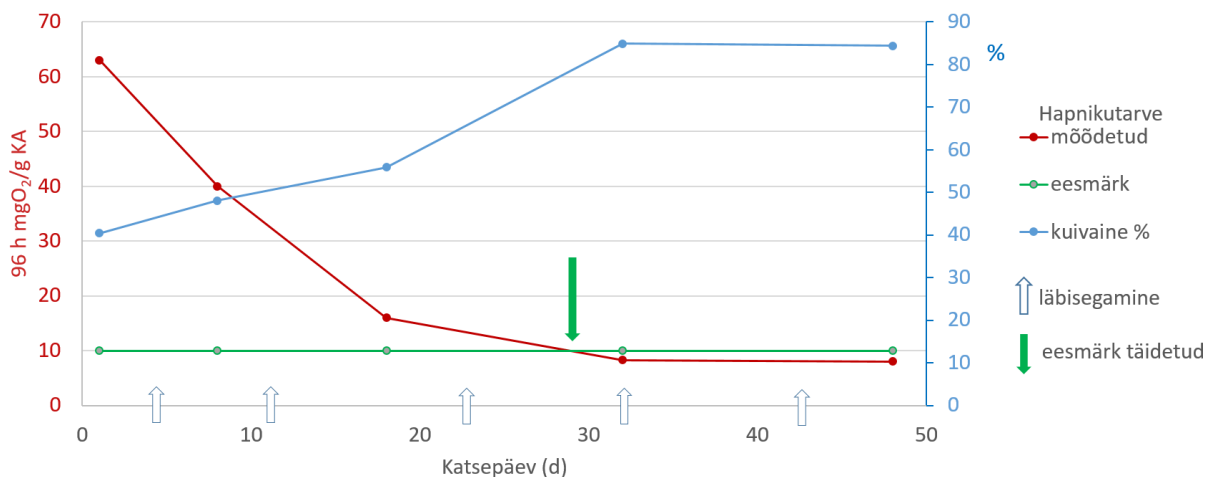
Joonis 17.20. Kompostimist iseloomustav temperatuurigraafik

Segamisvajaduse üle võib otsustada ka pooride hapnikusisalduse järgi – kui see langeb alla 10–15 % (välisõhus on hapnikku 21 %), on vaja auna õhustada. Esimestel kompostimispäevadel langeb hapnikusisaldus väga kiiresti, seega võib olla vaja aunasid segada lausa iga päev. Kuna hapniku ja süsihappegaasi sisaldus on pöördvõrdelised (joonis 17.21), piisab neist emma-kumma mõõtmisest, et segamise kohta otsuseid teha. Joonisel 17.21 näitab iga murdepunkt lagugaaside koostise mõõtmist ning noolega on osutatud sette lisamisele ja sellest tingitud muutustele gaaside koostises – hapnikusisaldus langeb kohe ja süsihappegaasi sisaldus tõuseb. Kompostimise algusnädalal võib seega olla vaja aunu segada iga päev, järgnevatel nädalatel kord nädalas ning küpsemisfaasis harvem. Kui setet kompostimise käigus juurde lisada, tuleb pärast seda aunu taas sagedamini segada.



Joonis 17.21. Hapnik ja süsihappegaas kompostiaunas, kuhu setet lisati kaks korda (tähistatud noolega)

Stabiilne kompost on selline, milles suurem osa orgaanilisest ainest on biolagunenud ning mikrobioloogilised protsessid aeglustunud. Stabiilse komposti bioloogiline aktiivsus ei tohi olla pöörduv ega suurenda ka nt niiskuse või hapnikusisalduse suurenemisel või vees lahustuva lämmastiku lisamisel. Orgaanilise aine stabiliseerimise käiku iseloomustab joonisel 17.22 kujutatud hapnikutarbe vähenemine kompostiaunas. Eesmärk 10 mg O₂/g KA täideti ligikaudu kuu aja möödudes. Hapnikutarbe sealt peale enam oluliselt ei vähenenud ning komposti edasine töötlemine (läbisegamine) stabiilsust ei suurendanud. Selle aja jooksul vähenes ka veesisaldus ning kompost muutus kuivemaks.



Joonis 17.22. Hapnikutarve kompostimise käigus

Segada on kindlasti vaja ka siis, kui temperatuur auna sees tõuseb üle 60–70 °C. Liigne kuumus ei tule kasuks, sest kompostimine lakkab kuivuse tõttu. Seda tuleb ette siis, kui peale reoveesette hakkab aktiivselt lagunema ka tugimaterjal.

Kompostimiseks on vaja seadmeid. Frontaallaadur või koppekskavaator kõlbavad auna kokku kuhjamiseks, ent mitte segamiseks. Aunad tuleb pöörata „seest väljapoole“, et välimine jahe, niiske ja hapnikurikas kiht satuks uue auna südamikku ning auna kuumast keskosast saaks uue auna väliskihti. Kompostiaunu segatakse tavaliselt spetsiaalse aunapöörli abil. **Aunapööril** (ingl *windrow turner*) segab, õhustab, peenestab ja, kui vaja, ka niisutab kompostitavat massi. Peenestamine on nii põhjalik, et valmiskompostiga seda enam tegema ei pea. Pööril sõidab piki auna ja heidab komposti enda taha või kõrvale uude auna. Mõnega saab korraka ümber pöörata terve auna, mõni teeb seda kihiti. Lihtsamad masinad on järelveetavad, täiuslikumad liiguvad omal jõul (joonis 17.23).



Joonis 17.23. Aunapöörliid: a – järelveetav COMPOST and WASTE Technology ST-300 Võrus, b – liikurpööril BACKHUS Tartu reoveepuhasti kompostimisväljakul (Fotod: M. Kriipsalu)

Ilmastiku mõju aunkompostimisele on väga suur. Vihma, tuule ja lume vastu aitab aunade katmine veekindla **kattakangaga**. Kangas või *Goretex*-membraan tõkestab sademevee juurdepääsu, piirab haisu ja bioaerosoolide levimist, vähendab soojuse kadu ja hoiab massi niiskena. Lagugaasid pääsevad kattest läbi.

- **Reaktorkompostimine**

Reaktorkompostimine sobib seal, kus aunade jaoks ei jätku maad ning kus peab hoiduma lagugaaside levimisest. Kompostitavat massi segatakse, õhustatakse, niisutatakse ja soojendatakse kinnises reaktoris seni, kuni termofiilne faas käima läheb. Protsess algab kohe ning kuigi kompostimine päris lõpuni ei jõua, laguneb suurem osa orgaanilisest ainest ligikaudu kahe nädalaga. Reaktorist välja võetud kompost pannakse mõneks ajaks aunadesse laagerduma.

Trummelreaktor (joonis 17.24) on pikk silinder, mille läbimõõt on 2,5–3 m ning maht 30–500 m³. Kompostitavat massi segab aeglaselt pöörlev trummel, mille sees olevad labad tõukavad massi aegapidi tühjendusluugini. Eestis on trummelreaktorid Põlva, Võru ja Keila reoveepuhastitel.



Joonis 17.24. Põlva reoveepuhasti trummelreaktor (Foto: M. Kriipsalu)

Kompostimist mõjutavad tegurid

Kompostimisel kulgevate bioloogiliste, keemiliste ja füüsikaliste protsesside edukaks toimumiseks on vaja täita teatud nõudeid, mis võivad iga reoveepuhasti sette ja iga tugimaterjali jaoks olla pisut erinevad.

Niiskus. Kompostitav mass peab olema parajalt niiske. Kuivas keskkonnas mikroorganismid elada ei saa, liigne vesi tõrjub aga pooridest õhu ning muudab massi anaeroobseks. Massi suhteline niiskus peab olema vähemalt 30 %, soodne on 45–65 %. Kui see on vaid 12–25 %, bioloogiline lagunemine lakkab. Et kompost aja jooksul kuivab, peaks algne kompostisegu olema osutatust niiskem. Kompostitava materjali niiskus on paras, kui pihku pigistatud mass teeb käe märjaks, aga vett välja ei saa. Liigse vihmavee eest on mõistlik aunad kinni katta, kuivamise vältimiseks neid kastetakse. Valmiskomposti suhteline niiskus peaks olema 35–45 %, sest siis ta ei lähe laos hallitama.

Vesi aitab reguleerida protsessi soojusbilanssi. Osa soojusest kulub vee aurustamisele (ühe grammi orgaanilise aine lagunemisel aurustub 10 g vett). Kui vett on vähem, võib lagunemisel tekkida ülearust soojust. Siis on aunu vaja jahutamiseks segada või niisutada.

Kompostitava massi suhtelist niiskust saab arvutada valemist 18.6 [10, 13]:

$$M_{ks} = \frac{M_t G_t + 100 G_j}{G_j + G_t} (\%) , \quad (18.6)$$

kus M_{ks} on segu kompostimiseelne ja M_t tugiaine suhteline niiskus %, G_j – kompostitavate jäätmete ning G_t – tugiaine märgmass tonnides.

Reoveesete võib tahendatuna küll kuiv tunduda, ent rakkudes on rohkesti vett, mis rakustruktuuri lagunemisel vabaneb ning komposti liigniiskeks muudab.

Hapnik. Kompostitavas massis peab olema piisavalt õhuhapnikku. Sobiva poorsusega aunades on õhustus loomulik: soojad lagugaasid tõusevad üles ja altpoolt tuleb välisõhk asemele. Värskele kompostile on vaja rohkem hapnikku kui vanale. Komposti aitab õhustada korrapärane läbisegamine, kuigi sellega kaasneb soojuskadu. Segamine aitab aunast välja lasta ka lagugaase. Kuigi kompostiaunu võib ka sundõhustada, ei asenda see kompostimassi kobestamist.

Poorsus. Mida koredam on kompostitav materjal, seda paremini liigub selles õhk. Massi poorsust aitab suurendada tugiaine. Massi poorsus peaks olema 20–35 %. Kompostimist kiirendab tugiaine peenestamine, sest siis on selle eripind suurem, protsessid kiiremad ning kompost soojeneb kiiremini. Jäätmete peenestamiseks on mitmesuguseid seadmeid, kuid eelistama peaks haamerveskeid, mis jäätmeid ei lõika, vaid rebivad – karedat lõikepinda asustavad mikroorganismid kiiremini kui siledat. Et materjal kompostimise kestel kokku vajub, on vaja seda poorsuse taastamiseks kobestada.

Süsiniku ja lämmastiku suhe (C/N). Orgaanilist ainet lagundavad bakterid vajavad energiaallikana süsinikku ning valkude moodustamiseks lämmastikku kindlas vahekorras, soodne C/N = (20–30):1. Kui lämmastikku on liiga palju, tekib protsessi inhibeeriv ammoniaak, bioloogiline aktiivsus langeb ning kompostiaun hakkab haisema. Orgaanilise aine lagunemine aeglustub ka siis, kui lämmastikku on liiga vähe, sest siis jääb temperatuur auna sees madalaks ning tõuseb vajaliku tasemeni aeglaselt. Kompostisegu õigest C/N-suhtest siiski alati ei piisa – kui süsinik või lämmastik ei ole omastatav, võib tekkida energiapuudus ning ei vabane piisavalt soojust.

Kompostimise kestel massi lämmastikusisaldus tavaliselt ei muutu, süsinikku jääb aga vähemaks. Valmiskomposti C/N = (12–20):1. Kui see suhe on suurem, jätkub komposti orgaanilise aine lagunemine ka mullas ning sellega kaasneb mullalämmastiku kadu.

Inhibiitorid ja mürgid. Kompostitav segu ei tohi sisaldada bioloogilisi protsesse pidurdavaid aineid (inhibiitoreid) ega mürke, seetõttu ei kõlba selle hulka värvitud ja immutatud lammutuspuit, hakitud vineer ega puitlaastplaadid. Värvide ja kemikaalide koosseisus olevad raskmetallid akumulereuvad kompostis ning kui nende hulk ületab piirväärtusi, muutub kogu kompostipartii kõlbmatuks.

Kompostielustik. Kompostimises osalevad bakterid, seened ja muud mullaasukad (nt vihmaussid). Mikroobid saavad energiat ja toitaineid orgaanilisest ainest ning hapnikku kompostitükikeste vahele jäävast õhust. Seened, kes on võimelised lagundama hemitselluloosi, tselluloosi ja ligniini, ei talu hapnikupuudust ega kuumust ning elavad vaid küpsemas kompostis.

Temperatuur. Temperatuuri, mis on bioloogilise aktiivsuse olulisemaid tegureid, on vaja jälgida selleks, et olla veendunud komposti ohutuses, aru saada aunades kulgevatest protsessidest ning teha otsuseid aunade segamisvajaduse või komposti küpsuse kohta. Kui komposti soovitakse sertifitseerida ja tootena turustada, peab kompostimise kulgu tingimata jälgima ja dokumenteerima [9].

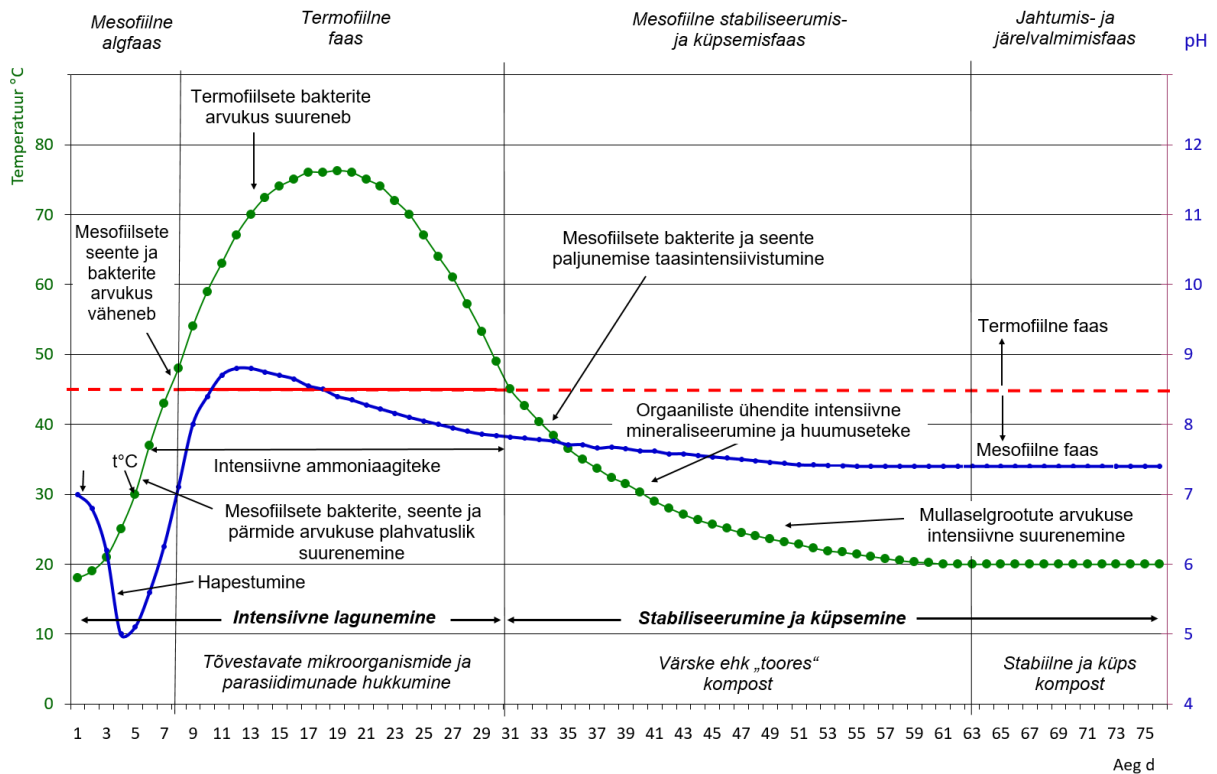
Kompostitav materjal soojeneb bakterite elutegevusega kaasnevate eksotermiliste reaktsioonide tulemusel iseenesest. Külmas (alla 5 °C) kompostiaunas elutegevus soikub ning on loid seni, kuni temperatuur tõuseb 20 °C-ni. Soojenevas keskkonnas mikroorganismide aktiivsus peaaegu kahekordistub iga kümne kraadiga. Eesti kliimas on otstarbekas aunad soojuskao vähendamiseks ja liigse vihmavee vastu külmal ajal kinni katta.

Temperatuuri kulg on kompostimise põhifaasides isesugune (joonis 17.25) [10]:

- **mesofiilses algfaasis** hakkavad orgaanilist ainet lagundavad bakterid intensiivselt paljunema, kompostitav mass soojeneb ning pH alaneb;
- **termofiilses faasis**, mille kestel temperatuur tõuseb ühe-kahe päevaga 60–70 kraadini, hukkub enamik jäätmeis leiduvatest tõvestavatest organismidest, taimekahjureist ja parasiitidest ning umbrohuseemned hävivad. Komposti kasutada veel ei saa, sest nii lühikese aja jooksul jõuavad laguneda ainult kergesti lagunevad orgaanilised ained;
NB: Reoveesette puhul sõltub temperatuuri tõus otseselt kompostitava sette omadustest ja selle eelnevast stabiliseerimisastmest (vt ka joonist 17.17). Liiga kaua vedelfaasis stabiliseeritud sette puhul võib termofiilne faas kompostimisel saavutamata jääda.
- **mesofiilses küpsemisfaasis** püsib temperatuur vahemikus 35–55 °C ning hakkab siis toitainete ammendumise tõttu alanema. Raskesti lagunevate ühendite (nt vahad ja vaigud)

sisaldus ajapikku väheneb. Mõne kuu pärast võib komposti kasutada, ehkki huumus moodustub ja taimetoitesoolad muutuvad kättesaadavaks alles järgmises faasis;

- **jahtumis- ja järelvalmimisfaasis** väheneb mikrobioloogiline aktiivsus veelgi. Temperatuur ei tõuse enam üle 40 °C isegi siis, kui kompostimass läbi segada. Komposti ilmuvad vihmaussid. Järelvalmimise ajal kompost küpseb ning moodustub komposti hinnatuim osa – huumus. Komposti väetusväärtus suureneb, sest toitesoolad muutuvad taimedele kättesaadavaks.



Joonis 17.25. Temperatuuri ja pH muutumine kompostimise kestel [10]

Eri jätmete kompostimisel kehtivad temperatuuri ja selles viibimise aja suhtes eri nõuded:

- reoveesette aunkompostimisel peab temperatuur ≥ 55 °C püsima vähemalt kümme või ≥ 65 °C vähemalt kolm ööpäeva, reaktorkompostimisel ≥ 60 °C vähemalt kolm ööpäeva [1, 9]
- loomsete kõrvalsaaduste, mille tükisuurus ei tohi olla üle 12 mm, kompostimisel peab temperatuur tõusma 70 °C-ni ning püsima üks tund [14]. Sellised jätmed on näiteks rasvapüüniste rasv.

Temperatuuri mõõdetakse auna sees, mitmes kohas ümber auna ning vähemalt 60 cm sügavusel, sest kogemuste kohaselt ulatub nii sügavale ilmastiku mõju. Termomeetri varras peaks olema meetri pikkune.

Liiga kuumaks kompost minna ei tohi, sest temperatuuril 75–80 °C mikrobioloogiline tegevus lakkab ning kompostitav mass kuivab.

pH. Kompostimisel on oluline massi pH. Enamikule bakteeridele sobib vahemik 6–7,5 ning seentele, kes taluvad pH kõikumist paremini, vahemik 5,5–8. Kui hapnik otsa saab, siis lagunemine jätkub hapnikuvaeses keskkonnas, kus tekivad lenduvad rasvhapped ning pH alaneb (joonis 17.25). Kompostitava massi pH-d on aunas raske reguleerida. Kui juba reoveesete ise on happeline, siis tugivahendina happelist turvast kasutada ei ole mõistlik. Lubja ja tuha lisamine muudab massi küll aluseliseks, ent pidurdab mikroorganismide tegevust. Tuhka soovitatakse segada vaid valmiskomposti hulka.

Keskkonnahäiringud

Kuigi kompostimine ei ole keskkonnaohtlik tegevus, võib see põhjustada keskkonnahäiringuid. Haisu, tolmu, müra ja õhku pääsevate aerosoolide vähendamiseks või vältimiseks ning lindude, näriliste ja putukate tõrjumiseks tuleb rakendada kõiki asjakohaseid meetmeid, kui nendega seotud kulud ei ole ilmselgelt ülemäärased. Tolmu ja pori vastu aitab kõvakattega kompostimisplatsi harjamine. Närilisi tõrjutakse mürgi abil.

Reoveesete kompostimisplatsilt valguv ja kompostist nõrguda võiv vesi (**valgvesi**) on kange, bakterioloogiliselt saastunud, sisaldab rohkesti orgaanilist ainet, lämmastikku ja fosforit ning tuleb reoveepuhastisse juhtida.

Haisu põhjustavad peamiselt aunades aegajalt tahtmatult tekkivast anaeroobsest keskkonnast pärit vahelagusaadused – lenduvad orgaanilised happed, aldehüüdid, alkoholid ja estrid, amiinid, indool, väävelvesinik, merkaptaanid ja ammoniaak. Lahtisel kompostimisplatsil haisu tavaliselt ei tõrjuta, küll on aga soovitatav aunade segamise ajal jälgida tuule suunda, et hais asula poole ei kanduks. Haisu vähendab oluliselt aunade sage läbisegamine.

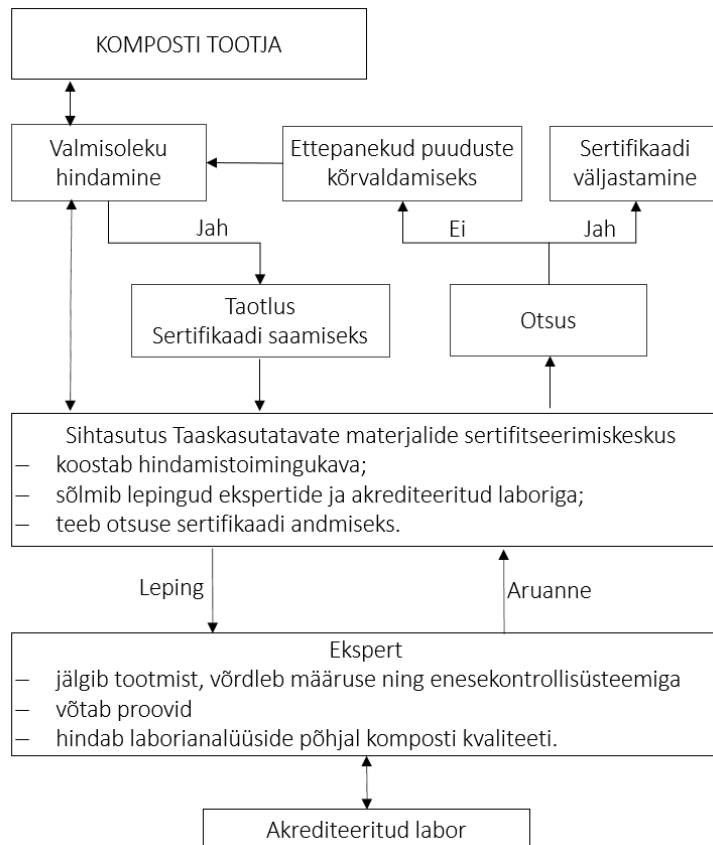
Aunakatte alt ja reaktoritest tulevat ventilatsiooniõhku on võimalik puhastada komposti, turba, hakkpuidu, kookoskiu vms loodusliku koreda materjaliga täidetud 1,5–2 m paksuses (koormus 100–150 m³/m² tunnis) õhubiofiltris.

Komposti sertifitseerimise käik

Kui eesmärgiks seatakse toote valmistamine, tuleb nii tootmiskorraldus kui ka kompost sertifitseerida keskkonnaministri määruse [9] kohaselt, mille põhiseisukohad on järgmised:

- komposti kui toodet saab ainult reoveesetest ja teatud tugimaterjalist;
- kompostist saab toode vaid siis, kui sertifitseeritud on nii kompost kui ka komposti tootev ettevõte.

Valmiskomposti kui toote sertifitseerimiskorraldus, nii nagu soovitab seda sihtasutus *Taaskasutatavate Materjalide Sertifitseerimiskeskus*, on kujutatud joonisel 17.26.



Joonis 17.26. Reoveesetekomposti kui toote sertifitseerimise korraldus Eestis

Komposti kasutamine

Valmiskompost on peaaegu must, kore ning väetusainerohke ja tasakaalustatud huumusetaoline aine, mis sisaldab põhiväetusaineid ja mikroelemente. Toores kompost seevastu on kasutuskõlbmatu, sest see seob taimedele vajalikku lämmastikku, vähendab mulla hapnikusisaldust ning võib taimedele isegi toksiline olla. Valmiskompostis ei tohi olla liigselt raskmetalle. Põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutatava settekomposti raskmetallisaldus peab jääma alla ametlikult kehtestatud piirväärtuste [1], kuid tootena kasutatava settekomposti raskmetallisaldus peab olema veelgi väiksem [9].

Komposti kuivaines peab olema vähemalt 15 % orgaanilist ainet ning ei tohi olla üle 0,5 % vööriseid. Kompostiliitris ei tohi leiduda üle kahe idanemisvõimelise umbrohuseemne ning 25 grammis kuivas

kompostis ühtki bakterit *Salmonella*. Teada peab olema komposti üldlämmastiku-, üldfosfori- ja üldkaaliumisisaldus (% kuivainest), mahumass (g/l), veesisaldus (g/l) ning pH. Soolsus (elektrijuhtivus) peab taimekasvatustes kasutamise korral jääma alla 3 mS/m. Raskmetallide piirväärtusi saab teada ametlikest dokumentidest. Üks reoveesette ja sellest valmistatud toote kvaliteedinäitajaid on stabiilsus, mis iseloomustab materjali bioloogilist aktiivsust ja orgaanilise aine lagunemise määra. Stabiilne kompost on selline, milles suurema osa orgaanilise aine biolagunemine on lõppenud ning mikrobioloogilised protsessid aeglustunud. Seda näitab temperatuuri pöördumatu alanemine (joonis 17.25), mida ei muuda ka komposti läbisegamine, ning hapnikutarbe kahanemine. Stabiilsus on oluline, sest ebastabiilse komposti kasutamine võib olla kahjulik taimedele selles leiduda võivate mürgiste ühendite tõttu, põhjustada mullas hapnikupuudust või ladustamisel tekitada anaeroobse keskkonna, mis emiteerib keskkonda metaani.

Komposti head omadused ilmnevad aeglasemalt kui mineraalväetiste omad. Harrastusaianduses tuleb kompost kindlasti segada mineraalmullaga – seemneid puhta komposti sisse külvata ei maksa, sest selles on liiga palju taimetoitesooli. Kompost parandab mulla struktuuri – suurendab poorsust, õhustatust ja veejuhtivust ning vähendab tihenemist ja erosiooniohtu. Muld muutub kergemini küntavaks, mis väljendub väiksemas kütusekulus. Kompost muudab mullaelustiku arvukamaks – mikrobioloogilist biomassi on oluliselt rohkem kui kompostiga väetamata mullas ning see suurendab vastupanuvõimet taimehaigustele. Kompost lisab mulda väetusaimeid, mis peavad olema taimedele kättesaadavad. Selles suhtes on reoveesetekompostil puudus – kui fosfor on reoveest kõrvaldatud keemiliselt, läheb kaua aega, kuni see taimedele omastatavaks muutub.

Kompost säilib pikka aega, ent mitte igavesti. Ära tuleks ta kasutada ühe aasta jooksul, sest ajapikku ta väetisväärtus langeb. Kvaliteetkomposti tuleks hoida varjul nagu muidki kaupu. Niiske komposti laotamiseks on vaja sõnnikulaoturit, kuiva saab laotada ka mineraalväetiselaoturiga. Settekomposti **kasutamist** kitsendavad nõuded kehtivad nii komposti valmistaja kui ka tarbija suhtes.

17.3.3 Reoveesette anaeroobne stabiliseerimine

Anaeroobne kääritamine (ka metaankääritamine, biogaasistamine) on üks levinumaid reoveesette stabiliseerimise mooduseid. Kääritamine toimub metaantankis ehk kääritis hapnikuvabas keskkonnas, kus settes olevad orgaanilised ühendid järkjärgult lagunevad. Laguprotsessi neli põhilist keemilist ja biokeemilist reaktsiooni on hüdroolüüs, atsidogenees, atsetogenees ja metanogenees. Nende protsesside tulemusena tekib biogaas ning järele jääb käärimisjääk ehk digestaat.

Anaeroobse kääritamise peamised eelised ja puudused võrreldes aunkompostimisega on kirjas tabelis 17.15 **Error! Reference source not found.**

Tabel 17.15. Sette anaeroobse käitlemise eelised ja puudused [7, 15]

Kääritamine	Aunkompostimine
<p>Eelised</p> <ul style="list-style-type: none"> • Käärimine toimub kinnises reaktoris, kust haisu ei levi. • Metaan on energiaallikas. • Reaktor ei võta palju ruumi. • Piisavalt pika viibeaja korral on muda stabiliseerumine tagatud aasta läbi. • Sette kuivainesisaldus väheneb ja tahenemisomadused paranevad. 	<p>Puudused</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aunkompostimine toimub lahtistes aunades, mis läbisegamisel haisevad. • Kompostimisel eralduvaid lagugaase ei saa ära kasutada. • Aunad võtavad palju ruumi. • Talvel aunad külmuvad ning lahtistes aunades kompostimine võib talvel võimatu olla. • Setet tuleb segada suure hulga tugimaterjaliga. See on kallis ja suurendab valmiskomposti hulka.
<p>Puudused</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kallis rajada. • Käärimisel sete ei soojene, vaid reaktoreid tuleb kütta • Temperatuur on vaid 35–37 °C (mesofiilne), millest ei piisa tõvestavate organismide hävitamiseks. • Käärimissaadus (digestaat) on vedel ning vajab tahendamist ja mõnikord ka järelkompostimist, et ta oleks paremini kasutatav. • Seadmed ja protsessid on keerukad. käitamisvigade parandamine võib olla keeruline ja aeganõudev. • Plahvatusoht (ATEX-tsoonid) ja sellega kaasnevad piirangud tekitavad vajaduse eriseadmestiku ja ohutusega seotud tegevuste järele. • Metaankääritatud sette tahendamisel tekkiv settevesi sisaldab rohkesti ammooniumi, mis annab bioloogilisse puhastusse jõudes märkimisväärse lämmastikukoormuse. • Inhibeerivad ühendid või käitamisvead (nt reaktorite ülekoormamine) võivad rikkuda happemoodustajate ja metanogeenide omavahelist tasakaalu, viies lõpuks substraadi hapestumiseni ja biogaasi tekkimise lakkamiseni. 	<p>Eelised</p> <ul style="list-style-type: none"> • Odav rajada. • Aunad soojenevad ise. • Temperatuur tõuseb 70 °C-ni, millest piisab tõvestavate organismide hävitamiseks. • Valmiskomposti saab kohe kasutada. • Aunkompostimine on lihtne ja arusaadav. Käitusvigu on lihtne parandada ja ära hoida. • Lagugaaside süttimise ohtu ei ole.

Sette stabiliseerumiseks peab viibeag olema piisavalt pikk. Mesofiilses režiimis (35–37 °C) on see ligikaudu kolm nädalat, termofiilses (50–55 °C) poole vähem [15] Eestis kehtivate normide alusel loetakse sete stabiliseerunuks, kui lenduvate rasvhapete sisaldus on alla 0,43 g KHT/gKAL või kui biogaasi jääkpotentsiaal on alla 0,25 l/gKAL. Biogaasi on võimalik kasutada soojuse või elektrienergia tootmiseks, kuid arvestama peab seda, et osa gaasist kulub reaktorite kütmiseks.

Kääriti (metaantanki) rajamise otstarbekus sõltub nii kliimatilistest teguritest kui ka reoveepuhasti suuruselt ja vastu võetavate lisajätmete (kui neid on) kogusest. Anaeroobset settekäitlust tasub kaaluda puhastites koormusega alates 50 000 ie-st (joonis 17.15), sest õhukindlate metaantankide rajamismaksus on üsna suur ning muda tuleb soojusvahetite abil soojendada. Seetõttu on majanduslikel kaalutlustel enamlevinud (sh Eestis) mesofiilne kääritus, kus temperatuuri hoitakse 35–37 °C juures.

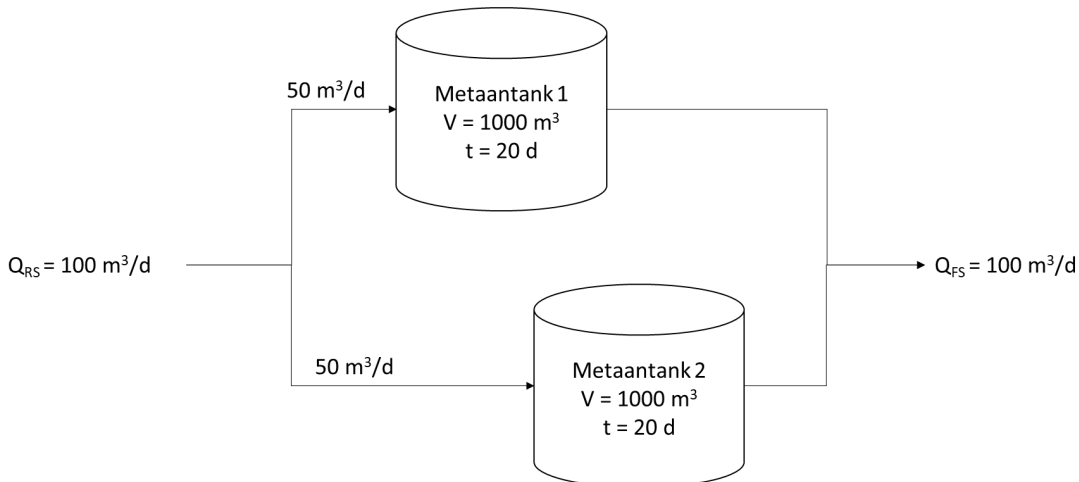
Eestis on anaeroobset settekäitlust rakendatud vaid suuremates reoveepuhastites (Tallinnas, Tartus, Narvas ja Kuressaares). Nendest suurima koormusega on Tallinna reoveepuhasti kääritid (2 x 10 000 m³), millesse juhitakse keskmiselt 36 tKA/d ning Tartu reoveepuhasti metaantank – 7 tKA/d.

Metaantankide käitamine

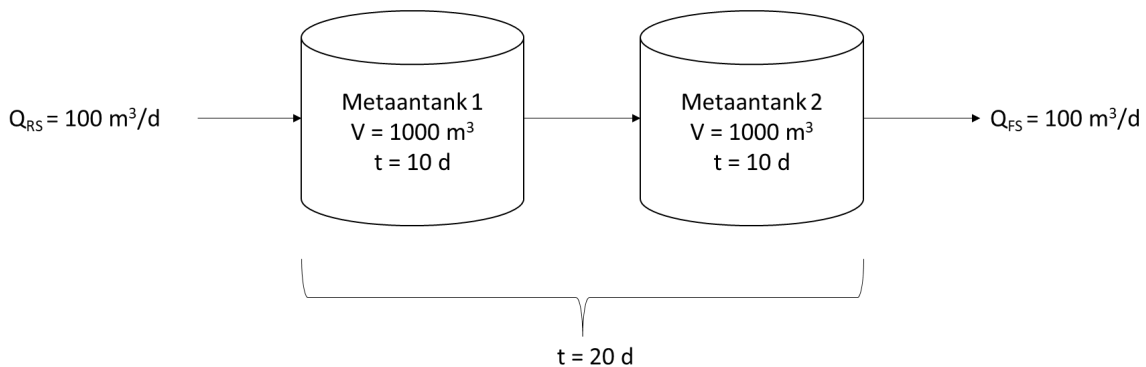
Suurtes reoveepuhastites, kus on vähemalt kaks metaantanki, on võimalik kasutada kaht käitamisviisi: üheastmelist ehk paralleelset ning kaheastmelist ehk jadakäitust.

- Üheastmelise puhul koormatakse mõlemat liini võrdselt (joonis 17.27) ning kõik kääritusetapid toimuvad samas mahutis. Üheastmelist süsteemi on võrreldes kaheastmelisega mõnevõrra lihtsam käitada, sest et mõlemad metaantankid on võrdselt koormatud, on nii nende koormusnäitajad kui ka seadmete käitamine ühesugused. Selle käitamisviisi puhul jaotatakse sisendmuda kahe metaantanki vahel võrdselt, mistõttu on mõlemas võrdse mahuga metaantankis muda viibeag sama.
- Kaheastmelise ehk jadamisi käitusviisi puhul juhitakse kääritatav muda esmalt esimesse ja seejärel teise metaantanki, mistõttu esimene on teisest rohkem koormatud (joonis 17.28 **Error! Reference source not found.**). Kaheastmelise käitamise korral toimub esimeses metaantankis reoveesette hüdrolüüs ning osaline atsidogenees ja metanogenees (vt jaotist 12) ning teises täiendav atsetogenees ja metanogenees. Kaheastmelise süsteemi eelised on sama mahuti suuruse juures suurem orgaanilise koormuse taluvus ja orgaanilise aine tõhusam lagundamine. Kuna metaantanki sisu on täielikult segunenud, on ka otsest läbivoolu vähem. Biogaasi tekib rohkem ja selle metaanisaldus suurem. Kaheastmelist käitussüsteemi soovitatakse rakendada suurtes puhastites ning eriti madalamatel temperatuuridel ja

väiksema mudavanuse korral. Väikeste puhastite kohta kehtivad samad eelised, ent sageli ei tasu kahe metaantanki rajamine majanduslikult ära.



Joonis 17.27. Metaantankide üheastmeline ehk paralleelne käitamine.



Joonis 17.28. Metaantankide kaheastmeline ehk jadamisi käitamine

Metaantanki töötingimusi on mõistlik siduda välisõhu ja toormuda temperatuuriga. Kõige turvalisem on töötada ühtlasel temperatuuril, ent kuna metaantankide tööks sobiva temperatuuri tagamine on talvel külmaga settekäitluse suurim kuluartikkel, on mõistlik alandada protsessi töötemperatuur 30 °C-ni, vähendades seeläbi oluliselt kulutusi reaktori kütmiseks. Talvel enda toodetud biogaasist kütmiseks ei piisa ja tarvitama peab muid energiaallikaid (maagaasi või kütteõli). See-eest jääb suvel biogaasi üle ning protsessi temperatuuri võiks tõsta 40 °C-ni [16].

Temperatuuri peab käärítés reguleerima sujuvalt, nädalas maksimaalselt 1–2 °C. Sealjuures tuleb käärítésprotsessi näitajaid pidevalt jälgida, et võimalikule inhibitsioonile kiiresti jälile saada.

Metaantankide dimensioneerimine

Metaantankide peamised dimensioneerimisnäitajad on mudakoormus (nii metaantanki mahu kui ka selles töötava bakterimassi suhtes) ja hüdrauliline viibeaeg, mis on võrdne muda viibeajaga. Hüdrauliline viibeaeg sõltub kavandatud käärítustemperatuurist ja vajalikust stabiliseeritusastmest.

Tabelis 17.16 on näidatud vajalik hüdrauliline viibeaeg sõltuvalt temperatuurivahemikust. Kui tegelik viibeaeg on lühem kui vajalik minimaalne hüdrauliline viibeaeg, siis ei ole bakteritel piisavalt vajalikku kasvuaega, saadakse vähem biogaasi ning muda stabiliseerumine ei ole tagatud.

Levinum on mesofiilne kääritamine, sest sellega saavutatakse piisav stabiliseerituse aste, ent sette soojendamiseks ei kulu nii palju energiat kui termofiilse käärituse korral. Kui setet on vaja põhjalikumalt või kiiremini hügieniseerida, tuleb valida termofiilne käärimine.

Tabel 17.16. Reoveesette anaeroobse kääritamise tüüpilised temperatuurivahemikud ja viibeajad [16]

Temperatuurivahemik °C		Soovitav temperatuur kääritis °C	Muda hüdrauliline viibeaeg (HRT _{kääritis}), d
Psührofiilne	< 25	ei soojendata	< 150
Mesofiilne	25–45	35–37	16–25
Termofiilne	45–60	50–55	12–15

Üldjuhul juhitakse metaantankidesse korraka nii eelsetitiset (primaarmuda) kui ka bioloogilistest puhastusest pärit tihendatud liigmuda. Settesegu kuivainesisaldus võiks jääda vahemikku 4 kuni 7%, siis on muda hästi pumbatav ja segatav ning reaktorite maht ja vee soojendamiskulu väiksem.

Biogaasitoodangu suurendamiseks võib metaantank vastu võtta ka muid vedelaid substraate. Reeglina sobivad paljud kõrvalsaadused ja jäätmed (rasvapüünisisu, flotomuda, vadak jms) reoveesetega kooskääritamiseks, ent sellegipoolest tuleks hoolt kanda, et:

- suure orgaanilise aine sisaldusega lisa-substraat oleks kergesti lagunev;
- lisa-substraat ei sisaldaks reoaineid (nt raskmetalle);
- lisa-substraat sisaldaks võimalikult vähe lämmastikku, sest bioloogilisse puhastusse juhitud settevesi koormaks puhasti üle;
- lisa-substraat oleks pumbatav (KA 6–7%) ning ei sisaldaks võõriseid (kive, pikki kiude jms).

Kui metaantanki kavatakse peale oma sette vastu võtta ka võõrast setet või lisajäätmeid, peab neid arvesse võtma juba alguses. Arvestada tuleb näiteks 3. kategooria loomsete kõrvalsaaduste käitlemisel rahuldada tulevate nõuetega, et jäätmete temperatuur peab olema 70 °C vähemalt ühe tunni jooksul ning osakeste suurus ei tohi ületada 12 mm. Võõrsete arvel suureneb ka voolululk. Seega võrdub dimensioneerimisel kavandatav päevane vooluhulk $Q_{AN,SV}$ primaarmuda (Q_{PM}), liigmuda (Q_{LM}) ja lisajäätmete ($Q_{j\ddot{a}ätmed}$) vooluhulkade summaga:

$$Q_{AN,SV} = Q_{PM} + Q_{LM} + Q_{j\ddot{a}ätmed} \left(\frac{m^3}{d} \right). \quad (18.7)$$

Metaantanki mahu arutamisel on peamised projekteerimisnäitajad toormuda päevane vooluhulk $Q_{AN,dim}$ ja muda hüdrauliline viibeaeg ($HRT_{kääríti}$), mis valitakse sõltuvalt kääritustemperatuurist ja puhasti suuruselt. Väiksemates puhastites kõigub toormuda hulk palju rohkem kui suurtes ning kääriti toimimist on võrreldes suurte puhastitega (>100 000 ie) oluliselt keerulisem optimeerida. Seetõttu pikendatakse väikestes puhastite metaantankides hüdraulilist viibeaega, korrutades seda varuteguriga. Soovitav hüdrauliline viibeaeg olenevalt puhasti suuruselt ja rakendatavat temperatuurist on kirjas tabelis 17.17. Kui on kavas rakendada kaheastmelist kääritamist, võib paremate hüdrauliliste tingimuste tõttu tabelis 17.17 esitatud viibeaegu vähendada 25% võrra.

Tabel 17.17. Muda soovitatavad hüdraulilised viibeajad sõltuvalt metaantanki suuruselt ja kääritustemperatuurist [16]

Kääritustemperatuur	Muda hüdrauliline viibeaeg [d], kui reoveepuhasti suurus [ie] on:		
	< 50 000 ie*	50 000 – 100 000 ie**	>100 000 ie
20 – 24 (°C)	51 – 64	41 – 51	34 – 43
25 – 29 (°C)	36 – 44	29 – 35	24 – 30
30 – 34 (°C)	29 – 34	23 – 28	19 – 23
35 – 40 (°C)	20 – 28	18 – 25	16 – 22

* temperatuuril 35–40 (°C) on varutegur 1.25 ning temperatuurivahemikus 20–34 (°C) 1.5

** temperatuuril 20–34 (°C) on varutegur 1.15 ning temperatuurivahemikus 20–34 (°C) 1.2

Metaantanki vajalik ruumala:

$$V_{AN} = HRT_{kääríti} \cdot Q_{AN,SV} (m^3) \quad , \quad (18.8)$$

kus $Q_{AN,dim}$ on muda päevane vooluhulk (m^3/d) ja $HRT_{kääríti}$ – muda hüdrauliline viibeaeg (d).

Kuna hüdrauliline viibeaeg ei võta arvesse lagundatava sette orgaanilise aine sisaldust, tuleb arvesse võtta ka sette orgaanilise aine koormus ning kontrollida, kas see vastab kavandatava metaantanki mahule. Kui andmed kääritatava sette orgaanilise aine sisalduse kohta puuduvad, saab selle koormuse arvutada tabelis 17.18 leiduvaid andmeid setete keskmise orgaanilise aine sisalduse kohta. Maksimaalsed lubatud orgaanilise aine koormused sõltuvalt käitusviisist (tabel 17.19) kehtivad peale reoveesette ka muude substraatide kohta.

Tabel 17.18. Setete orgaanilise aine sisaldus, lagundatavus ja gaasi tootlikkus

Sette tüüp	Orgaaniline aine	Bioloogiliselt kergesti lagundatav orgaaniline aine	Lagundatav osa	Lagundatav osa	Gaasi-kogus	Biogaasi metaanisaldus
	%	% OA-st	% OA-st	% KA-st	l/kg OA	%
Eelsetiti-sete	75	70	60	45	570	60 – 70
Liigmuda	72	45	38	29	330	60 – 70
Settesegu	73	57	48	35	440	60 – 70

Tabel 17.19. Soovitav maksimaalne orgaanilise aine koormus ja mahukoormus sõltuvalt metaantanki käitusviisist

Reoveepuhasti suurus (ie)	Ühik	Käitusviis	< 50 000 ie	50 000 – 100 000 ie	>100 000 ie
Orgaanilise aine koormus	kgOA/kgOA· d	Üheastmeline	0,05 – 0,06	0,05 – 0,07	0,06 – 0,07
		Kaheastmelise I aste	0,11 – 0,14	0,12 – 0,15	0,14 – 0,16
		Kaheastmelise II aste	0,04 – 0,06	0,04 – 0,07	0,05 – 0,08
Orgaanilise aine mahukoormus	kgOA/ m ³ · d	Üheastmeline	1,0 – 1,4	1,1 – 1,5	1,2 – 1,7
		Kaheastmelise I aste	2,9 – 3,9	3,2 – 4,2	3,6 – 4,5
		Kaheastmelise II aste	0,8 – 1,3	0,9 – 1,4	1,1 – 1,6

Metaantanki soojusbilanss

Mesofiilses temperatuurivahemikus tuleb tagada, et metaantankis oleks stabiilselt 35–37 °C. Kuna sette temperatuur sõltub suuresti välisõhu temperatuurist, on vajaliku käärimestemperatuuri saavutamiseks vaja süsteemi lisada soojusenergiat, milleks kasutatakse soojusvaheteid. Vajaliku soojusenergia arvutamine põhineb eeldusel, et toormuda soojendamiseks vajalik erisoojus on võrdne vee erisoojusega: ühe m³ vee soojendamiseks 1K võrra kulub 1,16 kWh soojusenergiat. Teades metaantanki juhitava muda vooluhulka $Q_{RS,d}$ ning kääriti töötemperatuuri ja sellesse juhitava sette temperatuuri vahet ΔT , saab muda soojendamiseks vajaliku soojusenergia hulga arvutada valemist:

$$E_{AN-soojus} = 1.16 \cdot \Delta T \cdot Q_{AN,SV} \left(\frac{kWh}{d} \right), \quad (18.9)$$

kus $E_{RS-heat}$ on muda soojendamiseks vajaliku soojusenergia päevane hulk (kWh/d), ΔT – metaantanki ja sellesse juhitava sette temperatuuride vahe (°C või K) ning $Q_{AN,SV}$ – metaantanki juhitava muda vooluhulk (m³/d).

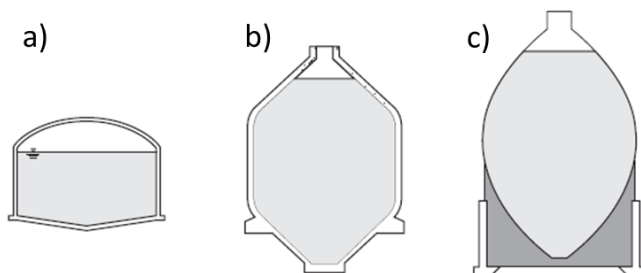
Arvesse tuleb võtta ka soojuskadu läbi metaantanki seina, mis sõltub nii reaktori soojustusmaterjalidest kui ka kääriti pinna suurusest. Soojuskadude arvutamisel tuleb arvestada nii mahuti soojustust kui ka ehituslikke ja tehnoloogilisi külmasildu (nt torustike läbiviike) ning seadmete vahelisi soojuskadusid. Lisades kõik soojuskadud muda soojendamiseks vajaliku soojusenergia hulga saab metaantankide käitamiseks vajaliku soojusenergia hulga, mille järgi projekteeritakse soojusvahetid.

Metaantankid ja nende peamised komponendid

- **Reaktor**

Enamik metaantanke on silindrilised, munakujulised või (kõige rohkem levinud) koonilise põhja ja ülaosaga silindrilised mahutid (joonis 17.30). Raske anorgaaniline sete vajub mahuti põhjakoonusesse, mille kaldenurk on 45–60, kust ta kõrvaldatakse. Lihtsama konstruktsiooniga silindrilise mahuti eeliseks on väiksem ehitusmaksumus, ent selle sisu vajab oluliselt intensiivsemat segamist, et sete mahuti põhja ei koguneks. Munakujuline mahuti oleks kõige parem, sest mahuti geomeetria tõttu on seinapaksus kõige väiksem, massi läbisegamine tõhusam ning nn „surnud tsoone“ on vähem, ent keeruka konstruktsiooni tõttu on see kõige kallim.

Reoveepuhastite metaantankid on enamasti raudbetoonist. Gaasikupli ülemine osa soovitatakse teha plastist või katta plasti või muu korrosioonikindla materjaliga.



Joonis 17.29. Metaantankide reaktoreid: a – silindriline, b – koonilise ülaosa ja põhjaga silindriline, c – munakujuline [6]

- **Seadmestik**

Kuna biogaas on plahvatusohtlik, tuleb selle käitlemiseks kasutatavate seadmete juures seda arvestada ning nad jagada ohu tekkimise tõenäosuse alusel eri ATEX-tsoonidesse, millele tugineb kogu jaama ohutus. Tsoonide järgi peab projekteerija valima vastava ATEX-klassiga seadmestiku. ATEX-direktiivid on kaks EL direktiivi, mis kirjeldavad minimaalseid ohutusnõudeid töökohtadele ja plahvatusohtlikus keskkonnas kasutatavatele seadmetele. Nimetus pärineb prantsuskeelsest terminist *Appareils destinés à être utilisés en ATmosphères EXplosibles*. Suurema

plahvatusohutsoonidega jaamad vajavad täiendavat järelevalvet koos ohutus- kontrolli- ja juhtimisseadmetega.

- **Segamine**

Üks olulisemaid tegureid kääritusprotsessi optimaalse jõudluse saavutamiseks on hea segamistöhusus. Läbisegamisjõudlus olgu pigem üle- kui aladimensioneeritud ning peaks võrduma vähemalt kümnekordse metaantanki mahuga [15]. Metaantanki sisu läbisegamise eesmärgid on:

- substraadi kiire ja ühtlase jaotumise tagamine;
- sisaldus- ja temperatuurigradientide vältimine;
- soojusülekanne kiirendamine;
- surnud tsoonide ja sette kuhjumise vältimine;
- sisendmuda väljavoolu (ingl *short-circuits*) vältimine.

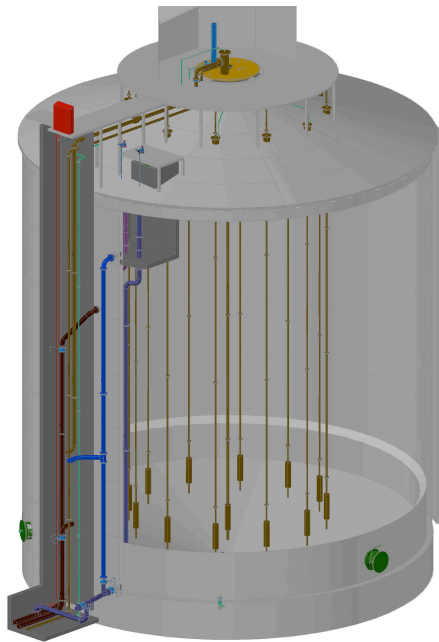
Metaantanki sisu segamiseks on palju lahendusi, millest peamised on:

- mehaaniline segamine labasegurite abil;
- vedeliku ringipumpamine;
- vedeliku läbisegamine biogaasimullide abil;
- torusegur (ingl *draft tube*).

Segamislahendus sõltub suuresti kääriti kujust ja suurusest. Mõnikord kombineeritakse eri lahendusi, nt vedeliku ringipumpamist koos gaasimull-segamisega või metaantanki keskosas torusegurit ning äärtes segamist gaasimullide abil.

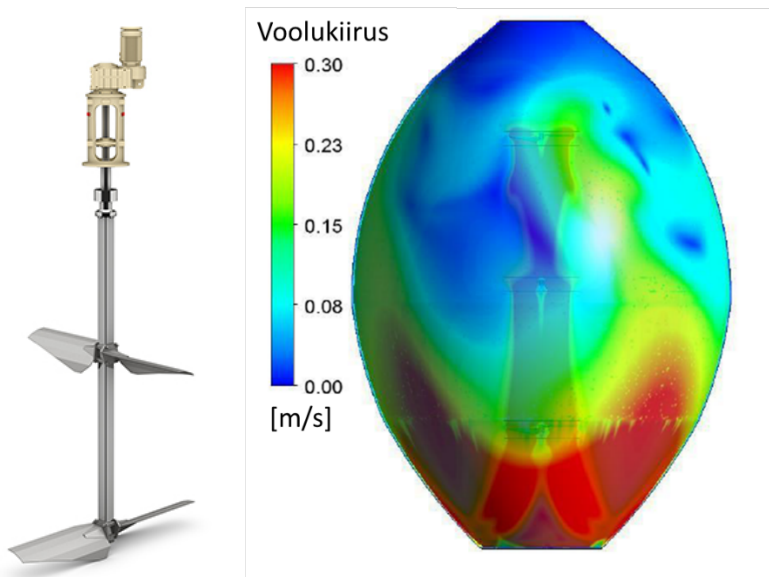
Läbisegamisest pumpamise teel piisab üksnes kuni 500 m³ suurustes koonilise põhjaga metaantankides. Kui temperatuuri tagamiseks soojusvahetite abil on vaja segada vaid kord päevas, siis muda normaalseks kääritamiseks peaks seda segama vähemalt kümme korda päevas. Pelgalt pumpamisega ei ole võimalik vältida surnud tsoonide tekkimist. See ei ole ka energiatõhus, sest enamik pumpamiseks kuluvast energiast kulub survekadude ületamiseks.

Gaasiga segamine seisneb käärimisel tekkinud gaasi mullide tõusmises metaantanki pinnale. Gaasi võidakse kääriti eri punktidesse juhtida ka vertikaalsete gaasisestustorude või põhjadifuuserite kaudu. Viimase miinus on kerge ummistumine, mistõttu seda tehnoloogiat peetakse aegunuks ja eelistatakse gaasisestustorusid. Sisestatava gaasi kogus võiks olla 0,0045 kuni 0,005m³/m³·min [6]. Eestis on gaasiga segamine sisestustorude kaudu kasutusel Tartu reoveepuhastis (joonis 17.30).



Joonis 17.30. Tartu reoveepuhasti metaantanki gaasiga segamise süsteem, mis koosneb 12-st ringikujuliselt paigutatud jaotus- ja ühest keskpunktis olevast gaasisestustorust.

Segurid koosnevad peamiselt kahest vertikaalteljel asetsevast allapoole suunatud suhteliselt suure läbimõõduga labakomplektist (joonis 17.31).



Joonis 17.31. Vasakul vertikaalne segur ja paremal voolukiirus metaantanki eri kõrgustel (CFD) 6% kuivainesaldusega sette puhul [17].

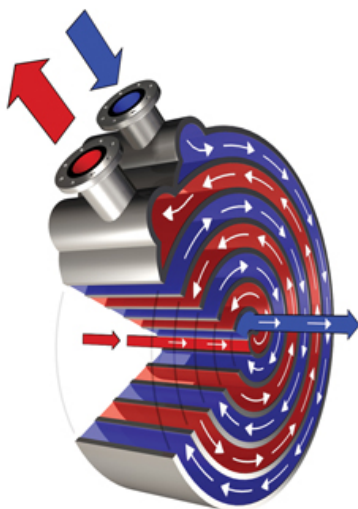
Seguri eelised on väike energiatarve, minimaalne hooldusvajadus ning mahuti sisu põhjalik segamine. Seguri võimsus sõltub peamiselt segatava sette mahust, mahuti geometriast ning sette viskoossusest, mis omakorda on seotud sette liigist ja KA-sisaldusest. Seguri segamisjõudluse määravad nii laba kaju kui ka läbimõõt, pöörlemiskiirus ja tekitatav tõukejõud. Saksa standard DWA-M 368 kohaselt on seguri võimsus 3–10 W/m³. Suurematel metaantankidel võib see olla oluliselt väiksem, kuid seda tuleks kontrollida detailsemate arvutuste ja analüüsidega, näiteks vedeldünaamika

analüüsiga (CFD), mis näitab kui suur on voolukiirus metaantanki eri osades (joonis 17.32). Tuleb jälgida, et reaktori põhja lähedal oleks voolukiirus vähemalt 0,3 m/s, et liiv põhja ei setiks. Reeglina toodetaksegi segureid erilahendusena vastavaks metaantanki omadustele ja geomeetrialet. Eestis on segurid kasutusel Tallinna ja Narva reoveepuhastite metaantankides.

- **Soojusvahetid**

Metaantanki töötemperatuuri tagamiseks tuleb sellesse lisada soojusenergiat. Reeglina kasutatakse selleks soojusvahetiteid, millest levinumad on spiraal- ja toru-toru-soojusvahetid. Soojusvahetite käitamisel tuleb silmas pidada, et nendesse juhitava kuuma vee temperatuur oleks alla 68 °C, et sete torustikus ei tahkestuks [6]. Soojusvahetiteid peaks läbima sisenev muda, kaheastmelisel kääritamisel ka ringlev muda. Soojusvaheti valik oleneb soojusvõimsusest (vt soojusbilanss) ning konkreetse ruumi eripärast, et seade oleks piisavalt kompaktne ja mugav hooldada. Soojusvahetite projekteerimisel tuleb arvestada ka nn ummistumistegurit, s.o torustiku sisekülgedele sadestunud materjali põhjustatud soojusülekanne vähenemist.

Spiraalsoojusvaheti on kahest ühesuguse ristlõikega voolukanalist koosnev seade, millest soojendatav sete ja soojust üle kandev vesi läbi voolavad (joonis 17.32). Spiraalsoojusvaheti eelisteks peetakse head soojusülekanne ja kompaktsust. Soojusülekanne on suur vaid puhta sisepinnaga torudes ning praktikas esineb sageli soojusülekanne vähendavaid ummistumisi. Soojusvaheti lahti võtmine ja puhastamine on tülikas ja aeganõudev.



Joonis 17.32. Alfa Laval spiraalsoojusvaheti tööpõhimõte [17]

Toru-toru-soojusvahetis (joonis 17.33) liigub sisemist toru pidi soojendatav muda ning mööda välimist toru küttevesi. Toru-toru-lahendus on ummistumiskindel, sest muda liigub torus, mitte kitsas kanalis, nagu spiraalitorustikus. Ka hooldus on lihtsam, sest torustiku läbipesuks tuleb avada vaid soojusvaheti otstes paiknevad käänakud.



Joonis 17.33. HRS Heat Exchangers Ltd DTR seeria toru-torus-soojusvaheti [18]

Metaantanke ei soovitata soojendada väljuva muda soojust arvel. Nii oleks küll teoreetiliselt võimalik vähendada reaktorite soojatarbimist, kuid praktikas ei pruugi selline lahendus olla jätkusuutlik. Nimelt kipuvad need süsteemid kergesti ummistuma, sest kääritatud reoveesete sisaldab palju lämmastikku ja fosforit ning piisavalt magneesiumit, mis õiges vahekorras põhjustavad MAP-i (magneesiumammooniumfosfaadi) ehk struviidi iseeneslikku teket ning sadestumist mõlema toru seinale. See vähendab oluliselt soojusülekannet ja suurendab hoolduskulusid.

Kui siiski soovitakse väljuvale kääritatud settele panna soojusvaheti, on soovitatav kasutada kaheastmelist süsteemi, s.o muda-vesi- ja vesi-muda-soojusvaheteid. Sellise lahenduse puhul kantakse soojus väljuvalt mudalt pehmendatud veele ning teises astmes kannab sama vesi soojusenergia metaantanki sisenevale settele. Kuigi see lahendus on suhteliselt vastupidav, on hooldusvajadus märkimisväärne, sest struviidi tekkimist soojusvahetis ei saa välistada. Kaheastmelises süsteemis tekib struviit vaid sisemises torus, mida on lihtsam hooldada ja puhastada kui välimist (s.o kahe toru vahelist osa).

Struviit tekib siis, kui kääriti turbulentses tsoonis või väljundtorustike ja -seadmete sisepindadel tõuseb kergesti lenduva CO₂ tõttu pH (pH >7.5), mis koos kaasneva temperatuurimuutuse ja õige Mg²⁺, PO₄³⁻ ja NH₄⁺ vahekorraga põhjustab struviidi iseeneslikku sadestumist (joonis 17.34). See põhjustab torustike, pumpade, soojusvahetite ja teiste setteveega kokku puutuvate pindade ummistumist ja rikkeid [19].



Joonis 17.34. Näide struviidi sadestumisest kääríti torus [20]

- **Homogeniseerimine**

Nagu mujalgi settekäitluses kasutatakse metaantankides reeglina kruvi- või rootorlabadega (ingl *rotary lobe*) pumpasid, mis on ette nähtud viskoosse sette pumpamiseks nõutavale kõrgusele. Kasutusel on ka purustid, mis jahvatavad kiulise ja tükilise materjali homogeenseks massiks, et vältida seadmete ummistumist või materjali mähkumist ümber pöörlevate osade.

- **Metaantanki seiresüsteemid**

Käärimise jälgimiseks ja juhtimiseks on soovitatav varustada süsteem:

- pH-anduritega;
- temperatuurianduritega metaantanki temperatuuriprofiili saamiseks;
- vedeliku rõhu anduritega metaantanki sisu taseme mõõtmiseks;
- kuivaineanduritega metaantanki sisendil ja väljundil;
- gaasirõhuanduritega, sh ala- ja ülerõhuklappi rakendavatega.

Mööta tuleb ka vedeliku ja gaasi kogused.

- **Kääritatud sette käitlemine ja kasutamine**

Nii nagu sette sissevool metaantanki toimub ka stabiliseeritud sette ehk digestaadi väljavool kääritist enamasti ühtlase voona, mis juhitakse ühtlustusmahutisse. Digestaadi ühtlustusmahuti suurus määratakse vastavalt settekäitluse edasistele etappidele. Tavapäraselt järgneb sette tahendamine ning sete viibib ühtlustusmahutis tahendusseadmete võimsusest olenevalt paar päeva.

Kuna orgaaniline materjal metaantankis 100%-liselt ei lagune, tuleb digestaadi hoiustamisel vältida metaani lendumist atmosfääri. Selleks on setteühtlustusmahutid tavaliselt varustatud

jämemullõhustusega, mille rakendamine võimaldab vältida edasist gaasiteket. Metaanitekke lõpetamine on oluline ka ohutuse seisukohast, et digestaadi edasisel töötlemisel plahvatusi vältida. CO₂ lendumise tõttu hakkab struviid ühtlustusmahutis sadestuma ning negatiivselt mõjutama settetahendusseadmeid (trumlile kleepumine ja vibratsioon).

Eestis on levinud reoveesette digestaadi järelvalmimine kompostiaunades, et seda saaks kasutada nt haljastuses või põllumajanduses ning pikemat aega hoiustada. Kui metaankääritus setet piisavalt ei stabiliseeri, saab seda jätkata (järel)-kompostimisega, arvestades seda, et digestaadi orgaanilise aine sisaldus on märksa väiksem kui sette oma.

17.3.4 Humifitseerimine

Humifitseerimiseks nimetatakse reoveesette looduslähedast stabiliseerimist, laotades seda õhukese kihina väljakule või basseini ning külvates settekihile taimi (nt raiheina *Lolium perenne* L). Taimed kasutavad oma elutegevuses settes sisalduvat vett ja taimetoitaineid ning aitavad lagundada orgaanilist ainet. Reoveesette bioloogilisele stabiliseerumisele ja mineraliseerumisele aitavad kaasa taimejuured, mis kobestavad setet, tõhustavad hapniku ligipääsu ja mikroorganismide elutegevust, kiirendavad vee vabanemist settesosakeste vahelt ning soodustavad vee liikumist aluskihti, kust see ära juhitakse. Et reoveesette orgaanikasisaldus väheneb, väheneb oluliselt ka reoveesette hulk. Pika töötlemisaja tõttu loetakse humifitseerimist tõhusaks mooduseks nii ravimijääkide lagundamisel kui ka patogeenide hävitamisel [21, 22]. Taimed võivad reoveesetest siduda ka raskmetalle. Taimede toime reoaine(te) kõrvaldamisel põhineb mõne taimeliigi võimel omastada orgaanilisi või anorgaanilisi reoaineid (fütoekstraktsioon), neid oma rakkudesse koguda (fütoakumulatsioon ehk taimladestamine) ning teatud juhtudel mõnda neist rakkudes osaliselt lagundada (fütoegradatsioon ehk taimlagundamine). Kaudselt võivad taimed reoaineid pinnasest kõrvaldada sel moel, et nad soodustavad mikroobide kasvu reoaineid sisaldavas settes oma juurestiku kaudu (risodegradatsioon ehk juurestiklagundamine) [10].

Humifitseerimine on tehnoloogia, mis võimaldab reoveesetet käidelda ilma keeruliste mehaaniliste seadmete ning kemikaalideta. Tehnoloogia on odav ja lihtne ning ei vaja sagedast ja kulukat hooldamist, arvestada tuleb aga selle väga väikest tõhusust, sest protsess on aeglane. Seetõttu kasutatakse seda piirkondades, kus muude mehaaniliste seadmete ning tööjõu kasutamise võimalused on majanduslikel kaalutlustel piiratud. Vaja läheb vaid vettpidava kattega (betoon, geomembraan) väljakuid või basseine, et settevesi ei jõuaks pinna- ega põhjavette.

Uuringud näitavad, et reoveesette tahendamise tõhusus humifikatsioonibasseinides on võrreldav mehaanilise tahendamisega – kuivainesisaldus on olnud kuni 40% [22] või isegi kuni 70% [23]. Basseinid võtavad väljakutest vähem ruumi (settekihi paksus on suurem). Kui setet ei ole eelnevalt tahendatud, siis ta ei sisalda ka polümeere. Nõrgvesi, mis sisaldab palju lämmastikku, tuleb alati juhtida tagasi reoveepuhastisse. Kuigi humifikatsioonibasseinidesse võib juhtida vedelat setet (nt järelsetitist, kus on kuivainet ca 1%), aitab tõhusust suurendada selle tihendamine ja tahendamine. Tahendamine on kasulik, sest:

- töötlemiseks kulub vähem maad;
- tahendatud settes areneb juurestik kiiremini ning seetõttu on ka haisu vähem;
- väheneb toitainete väljaleostumine settest;
- settest ei eraldu metaani ning välditakse „mullitavate basseinide“ tekkimist.

Tuleb arvestada, et kui vedel sete valgub ise ühtlaselt laiali, siis taheda sette peab käitaja laiali ajama.

Kuna setet kihtide kaupa üha juurde lisatakse, siis aja jooksul hakkavad raskmetallid humifitseerumas settes kontsentreeruma (orgaaniline aine laguneb, raskmetallid aga jäävad). Samas on täheldatud, et see leiab aset pigem esimese aasta jooksul, seejärel hakkab aga vähenema, sest osa neist leostub dreanaživette.

Humifikatsioonitehnoloogiat hakati arendama 1990-ndatel, esimene pilootprojekt on teada 1998. aastast. Boliiviast on teada, et suurima humifikatsioonitehnoloogiat rakendava reoveepuhasti jõudlus on 150 000 ie, kuid üldjuhul nii suurtes reoveepuhastites seda suure ruumivajaduse tõttu siiski ei kasutata. Eestis humifitseeritakse setet rohttaimedega kaetud väljakutel vähemalt neljas reoveepuhastis. Neis kogetu põhjal on soovitatav [24]:

- kanda sete väljakule võimalikult õhukeste (ca 10–15 cm) kihtidena;
- madala aastakeskmise temperatuuri ja vähese aurumise tõttu piirduda väikese koormusega – 30–60 kg KA/(m²·a), suurema korral peaks tsükkel pikem olema;
- väljaku settekoormus peaks olema talvel väiksem, sest vee loovutamine ja sette mineraliseerumine on siis aeglane;
- väljaku koormamist reoveesetega tuleks alandada ka siis, kui sademete aastahulk ületab 800 mm, aurumine on alla 500 mm või keskmine õhutemperatuur alla 13°C;
- raiheina tuleks külvata 20–25 g seemet ruutmeetri kohta (külvamiseks võib suurte basseinide puhul kasutada nii tuule kui näiteks drooni abi);
- hariliku maltsa ülekasvamist raiheinast saab vältida/vähendada maltsa varajase niitmiseega;

- enne järgmise settekihi lisamist humifikatsiooniväljakule on vaja veenduda, et eelmine kiht on muutunud ühtlaselt pruuniks, lõhnab huumuse järgi ning sellel ei ole anaeroobsetele oludele viitavaid musti alasid;
- taimestiku niitmine ei mõjuta oluliselt sette raskmetallisisalduse vähenemist – taimede kõrvaldamine vähendab seda vaid 0–6%;
- Eesti peaks setet stabiliseeritusnõuete rahuldamiseks väljakul hoidma vähemalt 2–3 aastat;
- reoveesettes olevate lipiidide lagundamiseks võib settele lisada bakterikultuure (nn „rasva söövaid baktereid“).

Humifikatsioon väljakutel

Eelnevalt tahendatud reoveesete laotatakse kõva kattega (nt asfalteeritud) väljakutele ja neile külvatakse kohe taimeseemned. Praktikas on levinud võtte katta asfalt esmalt õhukese liivakihiga, et vähendada sette kleepumist selle külge ja hõlbustada sette kuivamist. Suve jooksul võib väljakule lisada teise kihi ning taas külvata seemned. Väljak peab olema piisava languga, et settevesi saaks selle põhja mööda ära valguda. Settevesi tuleb kokku koguda ja reoveepuhastisse juhtida.

Pärast aastast stabiliseerimist lükatakse tunduvalt õhemaks muutunud settekiht kokku ning viiakse järelvalmimisele. Seal ladustatakse sete түsedama, kuni 1,3 m paksuse kihina, ning taas külvatakse taimed. Järelvalmimine kestab 1–2 aastat. Lõpuks on settekihil võimalik sisse vajumist kartmata kõndida ning taimi niita. Sete saab kasutusküpsiks tavaliselt 2–4 aastaga.

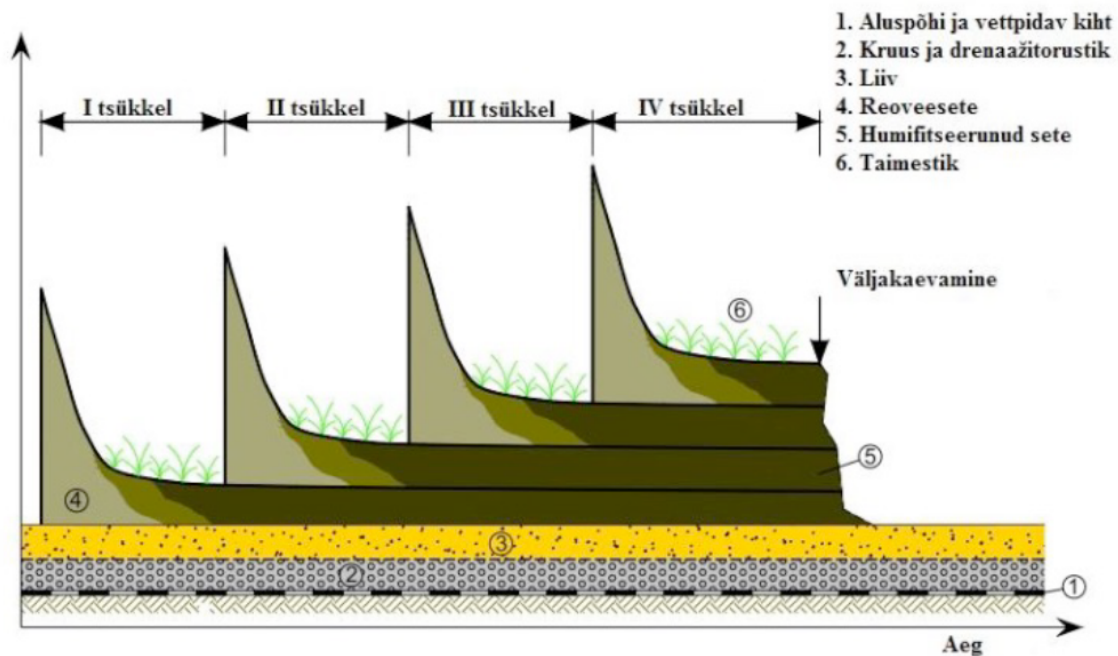
Humifikatsioon basseinides

Basseinid tehakse tavaliselt ca 1 m sügavused, kui on kavas kasvatada rohttaimi, või sügavamad, kui kasvatatakse pilliroogu. Arvestatakse, et tsükli kestus esimesest settekihist kuni basseini tühjendamiseni võib ulatuda isegi kümne aastani.

Basseinid tehakse betoonist või kaevatakse maasse ning muudetakse veetihedaks PE-geomembraani abil. Betoonbasseini saab laaduriga vabalt sisse sõita, ent geomembraanist voodriga basseini tühjendamisel tuleb olla ettevaatlik, et ei vigastataks membraani. Geomembraani all peaks olema nn kontrollidrenaaž, mis võimaldab hinnata membraani seisukorda (lekke korral on reoained drenaaživees tuvastatavad).

Basseini veekindla põhja peal paikneb kruusakiht ja drenaaž, mille kaudu juhitakse settevesi basseinidest välja. Järgneb liivakiht, mille peale laotatakse humifitseeritav reoveesete (joonis 17.35). Basseinidesse juhitav sete on tavaliselt vedel, tahedat on tülikam laiali ajada.

Esimese, umbes 20–30 paksuse kihi laotamise järel külvatakse sellele seeme (nt raihein) ning iga kahe nädala tagant (või vastavalt vajadusele) kaetakse taimestik uue õhukese settekihiga. Enamik külvatud taimi siis kärub ja kõduneb. Igale settekihile külvatakse uued seemned. Tavaliselt kestab humifikatsioonitsükkel neli kuni kuus aastat, misjärel sete basseinist välja kaevatakse.



Joonis 17.335. Humifitseerimisbasseini lõige [24]

17.3.5 Lubistabiliseerimine

Lubistabiliseerimist nimetatakse ka reoveesete keemiliseks (aluseliseks, ingl *alkaline*) stabiliseerimiseks. Tegemist on puhtkeemilise protsessiga, milles sette pH tõstetakse lubja lisamisega 12-ni. Siis mikroorganismid hävivad ja orgaaniline aine ei lagune. Seetõttu kirjeldatakse seda tehnoloogiat ka kui hügieniseerimist võimaldavat.

Lubi on vees vähelahustuv valge aine, mida saadakse kaltsiumkarbonaati sisaldava kivimi (lubjakivi, dolomiidi, kriidi) kuumutamisel (nn põletamisel). Kaltsiumkarbonaadist eraldub siis süsinikdioksiid ning tekib kaltsiumoksiid CaO , s.o kustutamata lubi, mille reageerimisel settes oleva veega tekib kustutatud lubi – kaltsiumhüdroksiid Ca(OH)_2 ning sete kuumeneb eksotermilise reaktsiooni tõttu. Patogeenide hävitamiseks on vaja, et sette pH oleks 12 vähemalt kahe tunni kestel [6]. Vajalik lubjaannus on kirjas tabelis 17.20.

Lubistabiliseerimiseks on võimalik kasutada nii kustutatud kui kustutamata lubja ning töödelda on võimalik nii vedelat kui tahendatud setet. Kuna kustutamata lubja ja vee reaktsioonil moodustub kustutatud lubi, siis saavutatakse suure veesisaldusega sette stabiliseerimisel kustutatud lubjaga

sama efekt, mis kustutamata lupja kasutades, kuid väiksema kemikaalikogusega. Ometi kasutatakse kustutamata lupja selle keerulise käsitlemise tõttu vaid suuremates settekäitlusettevõtetes.

Tabel 17.20. Lubjaannus (Ca(OH)_2 hulk), mida on vaja, et sette pH tõuseks 30 minuti kestel 12-ni [6]

Sette liik	Kuivainesisaldus %		Lubjaannus g Ca(OH)_2 /kg KA	
	Vahemik	Keskmine	Vahemik	Keskmine
Eelsete	3–6	4,3	60–170	120
Aktiivmuda	1–1,5	1,3	210–430	300
Septikusete	1–4,5	2,7	90–510	200

Lubja lisamisel toimub kaks sette keemilist koostist mõjutavat reaktsiooni [6]:



Esineb ka teisi reaktsioone, näiteks hüdrolüüsuvad polümeerid (proteiinid ja süsivesikud) ja aminohapped [6]:



Lubistabiliseerimisse juhtimiseks mõeldud sete hakkab esmalt lagunema bioloogiliselt. Tekivad mitmed pH alanemist põhjustavad ühendid, nt orgaanilised happed ning CO_2 . Bioloogilised protsessid püütakse lubja lisamisega maha suruda, lisades lupja pigem liiaga.

Lubistabiliseerimise puhul eristatakse eeltöötlust ja järeltöötlust. Eeltöötlemise puhul lisatakse lupja enne sette tihendamist ning stabiliseeritud sete laotatakse põllule. Vedela sette transportimise kulukuse tõttu tuleb see kõne alla peamiselt väikestes reoveepuhastites. Järeltöötlemise korral lisatakse settele lupja pärast tihendamist. Väga oluline on sete ja lubi korralikult läbi segada.

Sette lubistabiliseerimise eelised saab kokku võtta järgnevalt [25]:

- käidelda saab igat tüüpi setet (väga paindlik lahendus);
- hävitatakse patogeene;
- vähendatakse haisuprobleeme.

Lubistabiliseerimine võib osutada alternatiivseks settekäitlusviisiks siis, kui vajalikku stabiliseeritust või hügieeninõudeid ei õnnestu mingi muu bioloogilise töötlemisega saavutada.

Lubistabiliseerimise kahjuks räägib suur lubjakulu ja selle võrra suurenev reoveesette hulk ning see, et kõrge pH-ga setet saab kasutada ainult happelistel muldadel. Arvestada tuleb sedagi, et pH alanedes protsess pöördub ning orgaaniline aine hakkab jällegi lagunema. Kui see toimub põllumullas, on protsess siiski märksa aeglasem kui värske sette lagunemine, mistõttu keskkonnamõju (nt hapnikutarve, hais) on märksa väiksem. Arvestama peab ka lämmastiku osalist lendumist pH tõstmise ajal ning seda, et taimedele kergesti omastatava fosfori osakaal väheneb, sest fosfor seotakse kaltsiumfosfaadina [6].

Eestis ei ole lubistabiliseerimine levinud, ehkki Eesti põlevkivitööstusest pärineva lendtuha rohkus võimaldaks seda katsetada.

Viidatud allikad

- [1] Keskkonnaminister, Haljastuses, rekultiveerimisel ja põllumajanduses kasutatava reoveesette kvaliteedi piirväärtused ning kasutamise nõuded. 2019.
- [2] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., "DWA-M 381E - Sewage Sludge Thickening," 2007.
- [3] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., "DWA-M 366E Mechanical Dewatering of Sewage Sludge," 2013.
- [4] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., "ATV-DVWK-M 379E Drying of Sewage Sludge," Hennef, 2004.
- [5] G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, 1993.
- [6] G. Tchobanoglous, H. Stensel, R. Tsuchihashi, F. Burton, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed. New York: Metcalf & Eddy, Inc, 2014.
- [7] V. Lemmiksoo, T. Tenno, and E. Mölder, "Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta II osa aruanne," 2015.
- [8] "Jäätmeseadus," 2004. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006?leiaKehtiv> (Oct. 09, 2022).
- [9] Keskkonnaminister, Reoveesetest toote valmistamise nõuded. 2017.
- [10] M. Kriipsalu, A. Maastik, J. Truu, Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2016.
- [11] T. H. Christensen, Ed., Solid Waste Technology and Management, 1st ed. Wiley, 2010.
- [12] F. Amlinger, "Kuidas kompostida lihtsalt ja targalt," 2017. [WWW] http://www.maheklubi.ee/upload/Editor/Amlinger_AgriComposting-2%20EST.pdf (Apr. 04, 2023).
- [13] P. A. Vesilind, Wastewater Treatment Plant Design. Alexandria: Water Environment Federation, 2003.
- [14] Euroopa Parlament ja Nõukogu, määrus (EÜ) 1069/2009 milles sätestatakse muuks otstarbeks kui inimtoiduks ettenähtud loomsete kõrvalsaaduste ja nendest saadud toodete tervise-eeskirjad ning tunnistatakse kehtetuks määrus (EÜ) nr 1774/2002 (loomsete kõrvalsaaduste määrus). 2009.
- [15] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., "DWA-M 368 Biological stabilization of sewage sludge," 2014.
- [16] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., DWA-Topics T4/2016 - Design of wastewater treatment plants in hot and cold climates (EXPOVAL). 2019.

- [17] Alfa Laval Corporate AB, "How do spiral heat exchangers work." [WWW] <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/welded-spiral-heat-exchangers/how-it-works/> (May 17, 2023).
- [18] HRS Heat Exchangers Ltd, "Industrial double tube heat exchangers with removable tube." [WWW] <https://www.hrs-heatexchangers.com/heat-exchangers/double-tube-heat-exchangers/industrial-double-tube-heat-exchangers-with-removable-tube/> (May 17, 2023).
- [19] N. Palominos, A. Castillo, L. Guerrero, R. Borja, C. Huiliñir, "Coupling of Anaerobic Digestion and Struvite Precipitation in the Same Reactor: Effect of Zeolite and Bischofite as Mg²⁺ Source," *Front Environ Sci*, vol. 9, Dec. 2021, doi: 10.3389/fenvs.2021.706730.
- [20] I. Urdalen, "Phosphorus recovery from municipal wastewater." Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [21] S. Nielsen and N. Willoughby, "Sludge treatment and drying beds in Denmark," *Water and Environment Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 296–305, Dec. 2005, doi: 10.1111/j.1747-6593.2005.tb00566.x.
- [22] K. Kotecka, M. Gajewska, P. Stepnowski, and M. Caban, "Spatial distribution of pharmaceuticals in conventional wastewater treatment plant with Sludge Treatment Reed Beds technology," *Science of The Total Environment*, vol. 647, pp. 149–157, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.439.
- [23] H. Pabsch, *Batch Humification of Sewage Sludge in Grass Beds*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2004.
- [24] Eesti Maaülikool and Tartu Ülikool, "Reoveesette tootestamise uuring. Lõpparuanne," Tartu, 2020.
- [25] A. D. Andreadakis, "Treatment and disinfection of sludge using quicklime. ," in *Proceedings of the Workshop on Problems around sludge, 18-19 November 1999, Stresa (Italy)*. 2000.
- [26] Kleine Solutions GmbH, „Sludge water“ [WWW] <http://www.kleine.de/en/tas-automatic-sludge-water-discharge-system/sludge-water/>
- [27] A. W. Mumbi, L. Fengting, F. Mwarania, B. Uuganchimeg, „An assessment of multi-plate screw press in dewatering process of sludge treatment (the best option?)“ *Int. J. of Adv. Res.* 5 (Dec). 740-747