



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

REOVEESETTES OLEVA VABAVEE SISALDUSE MÄÄRAMINE TERMOGRAVIMEETRILISE MEETODIGA

FREE WATER CONTENT MEASUREMENT IN SEWAGE SLUDGE BY
THERMOGRAVIMETRIC METHODOLOGY

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Daisi Rist

Üliõpilaskood: 176572NAEM

Juhendajad: Dotsent Taavo Tenno (Tartu Ülikool)
Lektor Egge Haiba (Tallinna Tehnikaülikool)

Tartu 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Tallinna Tehnikaülikool Tartu Kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Daisi Rist, 176572NAEM
Õppekava, peeriala: NAEM06/15 - Tööstusökoloogia
Juhendajad: Dotsent, PhD, Taavo Tenno, +372 737 5179
Lektor, PhD, Egge Haiba, +372 620 4806

Lõputöö teema:

Reoveesettes oleva vabavee sisalduse määramine termogravimeetrilise meetodiga

Free water content measurement in sewage sludge by thermogravimetric methodology

Lõputöö põhieesmärk:

1. Välja töötada meetodika, millega on võimalik määrata reoveesettes oleva vabavee sisaldust.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjandusega tutvumine ja kirjanduse ülevaate koostamine	30.04.19
2.	Katsete läbiviimine ja meetodika väljatöötamine	15.05.19
3.	Saadud tulemuste analüüsimine ja lõputöö viimistlemine	27.05.19

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "28" mai 2019.a

Üliõpilane: Daisi Rist "....."201....a
/allkiri/

Juhendaja: Taavo Tenno "....."201....a
/allkiri

Juhendaja: Egge Haiba "....."201....a
/allkiri

SISUKORD

EESSÖNA.....	6
SISSEJUHATUS	7
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
1.1 Reoveesete.....	9
1.1.1 Reoveesete parameetrid.....	9
1.2 Reoveesete liigid.....	11
1.2.1 Primaarmuda ehk eelsetitise ehk toorsete	12
1.2.2 Sekundaarmuda ehk bioloogiline sete ehk jääkaktiivmuda	13
1.2.3 Segamuda	13
1.2.4 Tertsiaalmuda ehk järelpuhastise ehk keemiline muda.....	13
1.2.5 Stabiliseeritud sete	14
1.3 Reoveesete käitlemine	14
1.4 Reoveesete veetustamine	16
1.4.1 Veetustamist mõjutavad parameetrid	17
1.5 Veetustamise tehnoloogiad	18
1.5.1 Settetahendusväljakud	18
1.5.2 Mudatahendustsentrifuugid	19
1.5.3 Lintfilterpressid.....	21
1.6 Eesti reoveepuhastusjaamade veetustamise tasemed	22
1.7 Reoveesettes oleva vabavee sisalduse määramine.....	24
1.7.1 Termogravimeetrilise analüüsi põhimõte	24
2 Materjal ja meetodika	27
2.1 Reoveesete proovid.....	27
2.2 Katseseadme kirjeldus	28
2.3 Analüüsimeetodid	29
2.3.1 Kuivainesisaldus.....	29
2.3.2 Põletuskadu ja -jääk.....	30
2.3.3 Muda settivus	30
2.3.4 Filtreerimistest.....	31
2.3.5 Pressikatse	31
3 Tulemused.....	33
3.1 Meetodika väljatöötamiseks läbiviidud parameetrite kirjeldus	33

3.1.1 Reoveesette olek	34
3.1.2 Muda kogus	34
3.1.3 Temperatuur.....	35
3.1.4 Ajaline intervall.....	35
3.1.5 Vabavee sisalduse punkti määramise meetodikad	35
3.2 Erinevate mudade võrdluskatsete tulemused	37
4 Arutelu.....	39
4.1 Tulemuste analüüs ja järeldused	39
4.2 Soovitused ja ettepanekud	46
5 Kokkuvõte.....	47
6 Summary	49
Kasutatud kirjandus.....	51
LISAD	56
Lisa 1 Kasutatud töövahendid ja läbiviidud katsete fotod.....	57
Lisa 2 Kuivamisgraafikud.....	59
Lisa 3 Vedelal kujul ja eelnevalt filtreeritud katse tulemuste omavaheline võrdlus	61
Lisa 4 Erinevate mudaliikide ja meetodikate saavutatud vabavee sisalduse väärtused	62

EESSÕNA

Lõputöö valdkonna valik tulenes autori poolsest huvist reovee temaatika vastu ning konkreetse teema pakkus välja juhendaja Taavo Tenno. Lõputöö teema oli innovaatiline ning reovee valdkonda uut informatsiooni andev. Uurimuseks läbiviidud katsed teostati Tartu Ülikooli Kolloid- ja keskkonnakeemia õppetooli reovee laboris ajaperioodil veebruar-mai 2019.

Autori poolsed tänusõnad lähevad lõputöö juhendajale Taavo Tennole kaasamõtleva ja igakülgse juhendamise eest ning kaasjuhendajale Egge Haibale mõistva suhtumise ja motiveerimise eest. Lisaks tänab autor ettevõtte OÜ Aqua Consult Baltic töötajaid, Tartu Ülikooli, Tartu Ülikooli laborante ja reoveesette proove andnud ettevõtteid.

Töö eesmärgiks oli leida meetodika, millega on võimalik määrata reoveesettes oleva vabavee hulka. Selleks teostati katsed, mille põhjal hinnati kolme erineva meetodikaga saavutatud vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtuseid, nende standardhälvet ning pressikatsega saadud tulemuste omavahelist kokkulangevust. Katsed teostati viie erineva mudaga, mis pärinesid ühest olmereoveepuhastusjaamast ja kahest toiduainetööstusettevõttest. Lisaks uuriti sette erinevate parameetrite seost settes oleva vabavee hulgaga ning anti ülevaade Eesti reoveepuhastusjaamades saavutatud veetustamise tasemest ja kasutamata potentsiaalid.

Märksõnad: reoveesete, vaba vesi, veetustamine, termogravimeetriline analüüs, magistritöö

SISSEJUHATUS

Vesi on üks olulisemaid igapäevaselt tarbitav loodusressurss, mida iga inimene ühes kuus tarbib ligikaudu 2600 liitrit [1]. Selle kasutamise tulemusena tekib reovesi, mis enne loodusesse tagasi suunamist läbib reoveepuhastusjaamades mitmete protsesside jada ning mille peamisteks väljundvoogudeks on heitvesi, liiv, rasv, võrepraht ning reoveesete.

Viimane neist on edasist töötlemist vajav kõrvalprodukt, mis koosneb peamiselt veest ja tahketest osakestest, sisaldades muuhulgas ka suurel hulgal taimede kasvuks vajalikke lämmastiku ja fosforiühendeid. Lisaks sisaldab reoveesete toksilisi saasteaineid tänu millele on sette nõuetekohane kõrvaldamine lahutamatu osa reoveepuhastusprotsessis. Eestis tekkis 2016. aastal 18 342 tonni töödeldud reoveesetet, mis arvutuslikult teeb ühe inimese aastaseks settekoguseks umbes 14 kg [2, 3].

Reoveesette mahtu on võimalik vähendada settest vee hulga vähendamise kaudu, selleks on settekäitluses kasutusel tihendamise ja veetustamise protsessid. Settemahu vähendamine on oluline, et setet tekiks koguseliselt vähem ning seeläbi suureneks kogu tekkiva sette taaskasutamise suunamise võimalus vältimaks sette ladustamist prügilasse. Arvestades sellega, et pärast reoveepuhastusprotsessi läbimist on reoveesette vedelmassi kuivainesisaldus vaid 1-2%, on vee eemaldamine väga oluline, kuid suhteliselt kulukas etapp settekäitluses [4]. Veetustamisprotsessi käigus on võimalik eemaldada reoveesetest 65-85% vett [5].

Reoveesettes olev vesi jaguneb üldiselt neljaks, milleks on vaba vesi, rakkude vaheline vesi, rakkude pinnalähedane vesi ja seotud vesi [6]. Nendest liikidest on võimalik veetustamisprotsessi käigus eemaldada peamiselt vaid esimest. Selleks et tõsta veetustamis protsessi efektiivsust on oluline teada settes olevat vee jaotust, et saaks optimeerida seda protsessi ja teadmise kui palju vabavett on võimalik settest eemaldada. Kuna iga reoveepuhasti reoveesete on mõnevõrra erineva koostise ja omadustega, puudub reoveepuhastusjaamadel ülevaade reoveesette veetustamise võimalikust potentsiaalset. Töö autorile teadaolevalt ei ole Eestis varajasemalt antud teemat uuritud, seega lõputöö käigus väljatöötatud meetodika põhjal oleks võimalik reoveepuhastusjaamadel saada teada reoveesette maksimaalne vabavee sisaldus ning selle põhjal vajadusel oma settekäitlusprotsessi optimeerida.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on leida meetodika, millega on võimalik määrata reoveesettes oleva vabavee sisaldust ning analüüsida setteomaduste seost, mis võivad seda tulemust mõjutada.

Vabavee sisalduse määramiseks kasutatakse termogravimeetrilisel tööpõhimõttel kasutatavat mõõteseadet. Lõputöö ülesanneteks on:

- anda ülevaade reoveesette veetustamisest ning meetoditest, millega on võimalik mõõta reoveesettes oleva vabavee sisaldust;
- välja töötada meetodika, mis määrab kindlaks reoveesettes oleva vabavee sisalduse lõpp-punkti;
- analüüsida ja võrrelda meetodikatega saavutatud tulemusi;
- hinnata erinevate reoveesette parameetrite seost saavutatava vabavee sisalduse väärtusega;
- saada ülevaade Eesti reoveepuhastusjaamade veetustamise tasemest.

Töö esimeses peatükis kirjeldab töö autor üldiselt reoveesetet, toob välja erinevate reoveesette liikide erinevused ning annab ülevaate veetustamisest ning seal kasutatavast tehnoloogiast. Lisaks toob välja Eesti suurte ja keskmiste reoveepuhastusjaamade saavutatud sette kuivainesisalduse väärtused. Peatüki lõpetuseks antakse ülevaade meetoditest, millega on võimalik määrata reoveesette vabavee sisaldust ning kirjeldatakse termogravimeetrilise analüüsi põhjal Kopp (2001) välja töötatud meetodika põhimõtet, kuid mille rakendamise kohta puudub teaduskirjanduses täpsem informatsioon, mis tuli käesoleva lõputöö raames välja töötada. Teises peatükis tuuakse välja töö raames kasutatud mudaliigid, kirjeldatakse kasutatud katseseadet ning võrdluskatsete analüüsimiseks kasutatud analüüsimeetodeid. Kolmandas peatükis esitatakse rakendatud meetodika kirjeldus ning tuuakse välja erinevate katsetuste ja analüüsimeetodite tulemused. Viimases peatükis analüüsib töö autor erinevate sette parameetrite seost saavutatava maksimaalse vabavee punktiga ning toob välja enda poolsed soovitusel ja edasised uurimisvõimalused.

Töö kirjutamisel on autor kasutanud eesti-, inglise ja saksakeelset kirjandust, mis pärinevad teemakohastest teadusartiklitest, raamatutest, õigusaktidest, standarditest, veebilehekülgedelt ning internetis leiduvatest dokumentidest. Töös on kasutatud IEE (2006) viitamissüsteemi.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Esimeses peatükis antakse ülevaade reoveepuhastusprotsessi käigus tekkivast reoveesetest, selle liikidest ja omadustest. Seejärel on välja toodud sette võimalikud käitlemisviisid ning täpsemalt veetustamise protsess ja selle rakendamine Eestis. Kirjanduse ülevaate lõpetab reoveesettes oleva vabavee sisalduse määramise meetodite kirjeldus.

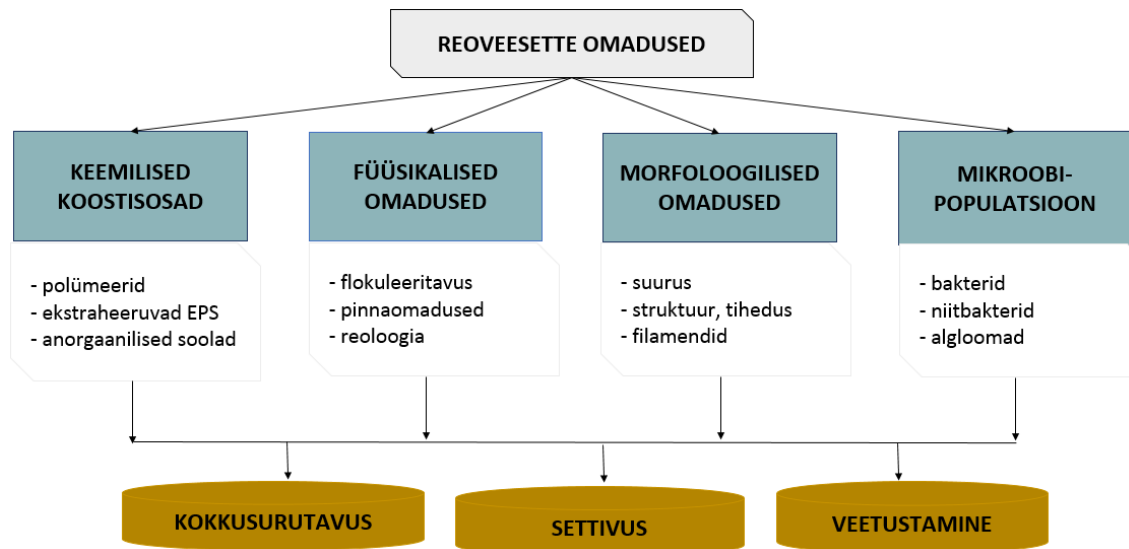
1.1 Reoveesete

Reoveesete on vältimatu ja üks peamistest kõrvalsaadustest, mida tekib igapäevaselt reoveepuhastusprotsessis ligikaudu 1-2% kogu olmereoveepuhastamisel tekkinud reoveemahust [7]. Sete on vee ja tahke aine segu, mis on eraldatud reoveest füüsikaliste, bioloogiliste või keemiliste meetoditega [8]. Protsessist väljunud reoveesete sisaldab 98-99% vett ning ülejäänud osa moodustavad suspendeerunud, kolloidsed ja lahustunud aineid [4, 9]. Seega reoveesete vedel faas pärineb töödeldavast reoveest ning tahke osa moodustavad puhastusprotsessi läbiviinud mikroorganismid ja reovees olev heljum [10].

Kuna reoveepuhastusjaama tuleva reovee kontsentratsioon ja heterogeensus on muutlik puudub reoveesetel kindel koostis. Reovee omadused sõltuvad mitmetest aspektidest, näiteks toorreovee algkoostis, sademevee hulk, tööstuste reovesi, reoveepuhasti tehnoloogia jne [11, 12]. Peamiselt koosneb reoveesete orgaanilisest ainest, 60-80%, mille moodustavad mikroorganismid ja nende laguproduktid (aminohapped, valgud, lipiidid, süsivesikud) [10, 13]. Lisaks on reoveesettes rohkesti toitaineid (fosfor, lämmastik, kaalium, kaltsium ja mikroelemendid), mis annavad sellele head omadused kasutada seda väetisena ja mullaomaduste parandajana [9, 14]. Samas sisaldab reoveesete ka erinevaid toksilisi saasteaineid (raskemetallid, patogeenid, ravimijäägid, mikroplastik), mis on ohtlikud nii keskkonnale kui ka inimese tervisele [7, 11, 14].

1.1.1 Reoveesete parameetrid

Reoveesete keemilistest, füüsikalistest, morfoloogilistest ja mikrobioloogilistest omadustest sõltub sette edasise töötlemise efektiivsus ja kvaliteet. Üldiselt võib öelda, et reoveesete on raskesti töödeldav materjal, kuna selles sisalduvat vedelikku ja tahket ainet on teineteisest raske eraldada tänu reoveesete vett-siduvale olekule [15]. Lisaks on kõik reoveesete helbed ehk flokid ebakorrapärase kuju ja suurusega [16]. Järgneval joonisel on välja toodud erinevad parameetrid, mis mõjutavad reoveesete kokkusurutavust, settivust ja veetustamist (Joonis 1.1).

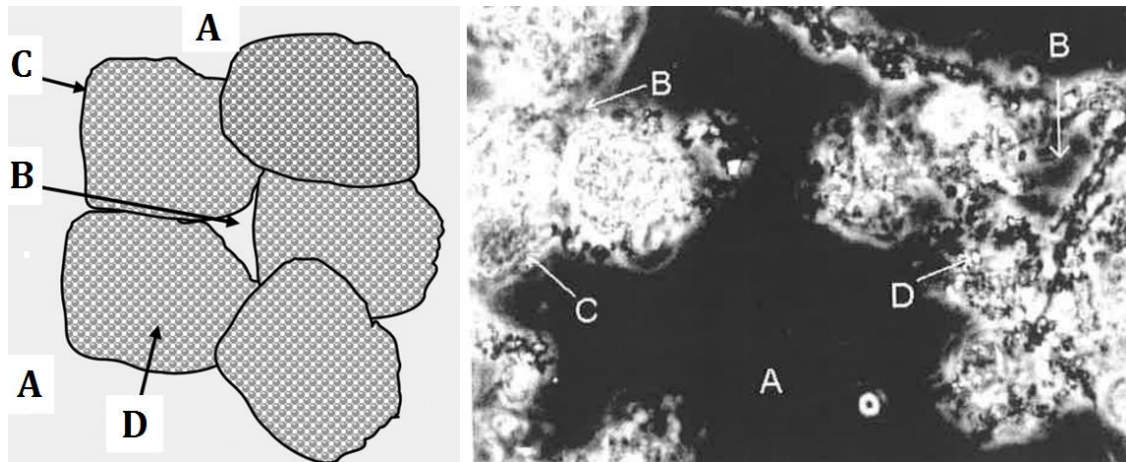


Joonis 1.1. Reoveesette omadused [17]

Reoveesette üheks olulisemaks parameetrik on selles sisalduva vee omadused, mis ühtlasi mõjutavad ka üldiseid muda omadusi. Reoveesettes olevate tahkete ainete ümber on ühendid, millel on võime siduda vett, seega mõjutab tahkete ainete kontsentratsioon vee omadusi settes [15]. Kõige sagedamini jaotatakse reoveesettes olev vesi omavahelise füüsilise seotuse alusel neljaks (Joonis 1.2) [6]:

- rakuväline vesi ehk vaba vesi (*ingl. free water*) on reoveesettes olev vesi, mis ei ole seotud teiste osakestega, vesi liigub üksikute mudaosakeste vahel vabalt ringi ning see ei ole adsorbeerinud teiste mudaosakestega [4, 18]. Vaba vee sisaldus on reoveesettes kõige suurem ning üldiselt jääb see vahemikku 65-85% [7]. Vaba vesi on kergesti eemaldatav mehaanilise tihendamise ja veetustamise teel [4, 7].
- rakkudevaheline vesi ehk interstitsiaalne vesi (*ingl. interstitial water, capillary water*) on reoveesettes tahkete osakeste ja mikroorganismide vahel olev vesi, mis püsib seal kapillaarjõuga [15, 18]. Vahevett on reoveesettes 15-25% [7]. Rakkudevahelise vee sisaldus sõltub sette osakeste suurusest, kujust ja asetuse tihedusest [15]. Vahevett on teatud määral võimalik eraldada polümeeride lisamisel ja mehaanilise töötlemise teel, kuid selle käigus lõhutakse reoveesette flokid, mille tulemusena on rakuedelik kättesaadavam [4].
- rakkude pinnalähedane vesi (*ingl. surface water, vicinal water*) on reoveesettes olev tahkete osakestega seotud vesi, kus veemolekulide kihid hoiavad end vesiniksidemetega tihedalt vastus tahkete osakeste pinda [4]. Seega on pinnavesi füüsiliselt seotud ning see ei liigu vabalt ringi. Samuti on keemiliselt seotud ühendid pinnavee osaks [18]. Pinnapealse vee sisaldus on ligikaudu 7% [7]. Seda liiki vett ei ole võimalik mehaaniliselt reoveesetttest eraldada [4].

- rakusisene vesi ehk intratsellulaarne vesi (*ingl. intracellular water, water of hydration, chemically bound water*) on osakeste struktuuriga seotud vesi [4]. Rakusisest vett on reoveesettes ligikaudselt 3% [7]. Rakusisest vett on võimalik eraldada reoveesetest üksnes termo-keemilise töötlemise käigus [4, 7].



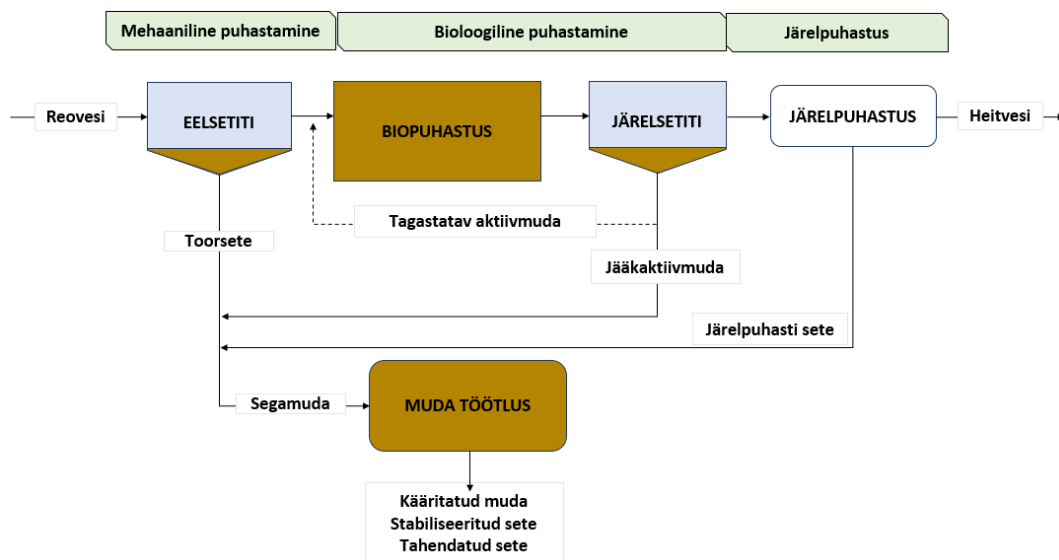
Joonis 1.2 Reoveesettes oleva vee jaotus: A- vaba vesi, B – rakkudevaheline vesi, C – rakkude pinnalähedane vesi ja D- rakusisene vesi [13, 19]

Erinevad reoveesette omadused on teineteisest sõltuvad. Näiteks seotud vee osakaalu tõstavad reoveesettes olevad ekstratsellulaarsed polümeersed ained, mis on võimelised siduma veemolekule sette flokkidega [20]. Rakuväliste polümeersete ainete põhikomponentideks on proteiinid ja polüsahhariidid [7]. Samuti mõjutavad reoveesette käitumist tahke ja vedela faasi eraldamisel settes olevate tahkete osakeste suurus. Osakeste suurused võib jagada neljaks, milleks on üle 100 μm suurused settivad osakesed (liiv, sette flokid), 1-100 μm suurused kolloidsed osakesed (bakterid, suspenseerunud tahked ained), 0,001-1 μm suurused peenkolloidsed osakesed (kolloidid, viirused) ja <0,001 μm suurused lahustunud osakesed (soolad, orgaanika) [21, 22]. Mida rohkem on settes väikseid osakesi seda suurem on sette spetsiifiline filtratsioonikindlus [16]. Lisaks on oluline parameeter ka tihedus, mille alusel on võimalik hinnata reoveesette settivust, kuna osakeste suurus ja tihedus on peamised mõjutajad tsentrifugaalsete omaduste üle [18]. Tähtis omadus on ka reoveesette voolavus, mis mõjutab sette töötlemise, utiliseerimise ja kõrvaldamise etappe. Reoveesette olek jaguneb valdavalt vedelaks, pool-vedelaks (pasta laadne) ning tahkeks [16].

1.2 Reoveesette liigid

Reoveesete on üldnimetus kõigile reoveepuhastusprotsessis tekkivatele reoveesette liikidele, mis tekivad primaarsetest, sekundaarsetest ja tertsiaarsetest töötlustappidest. Reoveesetteks ei loeta

eelkäitlemisel tekkinud jääke (liiv, rasv, võrepraht) [23]. Sõltuvalt reoveesette tekkekohale võib käitlemata ehk stabiliseerimata reoveesette liigitada kolmeks, milleks on toormuda, jääkaktiivmuda ja keemiline muda (Joonis 1.3) [12, 24]. Kõik need mudaliigid erinevad teineteisest omaduste, koguste ja puhastustehnoloogia poolest [25]. Sõltumata sette eraldusfaasist töödeldakse kõiki mudaliike (nn segamuda) hiljem ühiselt reoveesette töötlemisprotsessis.



Joonis 1.3. Reoveesette liigid (autori joonis)

1.2.1 Primaarmuda ehk eelsetitise ehk toorsete

Toorsete (*ingl. primary sludge*) on mehaanilise puhastuse käigus tekkiv sete, mis saadakse selitamise (setitamine, flotatsioon) või filtrimise teel [26]. Seda liiki setet tekib olmereovee puhastusjaamas ühe elaniku kohta ööpäevas 0,5-2,0 liitrit [27]. Protsessi eesmärgiks on reoveest kätte saada tahked hõljuvained ning selles etapis eemaldatakse 50-70% heljumist ja ujupraht [11, 12]. Eraldatud heljum aitab tagada järgnevate puhastusseadmete tööefektiivsuse [24]. Sellest etapist väljuva reoveesette tahkeaine sisaldus jääb vahemikku 2-7% [12].

Mudas olevate tahkete osakeste suurus varieerub ning see võib sisaldada isegi kergesti äratuntavat prahti (nt tualettpaber) [11, 12]. Toormuda osakesed on 50-80% alla 1 mm ning umbes 5% osakestest on suuremad kui 7 mm [12]. Toormuda värvus võib olla hallikas mustast kuni hallikaspruunist kollaseni [11]. Kuna toormuda on stabiliseerimata võib see omada ebameeldivat lõhna selle protsessist eemaldamisel [11]. Üldiselt on toormuda kergesti veetustatav muda võrreldes teiste mudatüüpidega, kuna selle osakesed ja ujupraht nõuavad vähest konditsioneerimist [12, 13].

1.2.2 Sekundaarmuda ehk bioloogiline sete ehk jääkaktiivmuda

Bioloogiline sete (*ingl. secondary sludge, biological sludge, waste activate sludge*) on bioloogilise puhastamise käigus tekkiv biofiltrisete või liigaktiivmuda, mis tekib mikroorganismide kaasabil [25]. Biopuhastus protsessi viivad läbi bakterid, kes kasutavad oma elutegevuseks lahustunud ja mittelahustunud orgaanilisi aineid ning millest moodustuv biomass seob kokku kolloidse heljumi [12, 28]. Seega bioloogiline sete koosneb mikroorganismidest ning mehaanilises puhastuses kinnipeetud heljumist [13, 28]. Aeroobse puhastusprotsessi käigus võib kuni 40% lahustunud orgaanilisest ainest koguneda mikroorganismide biomassi [24].

Protsessi siseselt jaguneb jääkaktiivmuda kaheks, millest üks osa suunatakse protsessist välja muda töötlusesse ning teine osa juhitakse tagasi bioloogilisse puhastusprotsessi. Koguseliselt tekib olmereovee puhastusjaamades bioloogilist setet elaniku kohta ööpäevas 0,5-5,2 liitrit [27]. Orgaanilise aine sisaldus bioloogilises settes jääb vahemikku 60-80%, mis sarnaneb tugevasti reostunud veega [13, 24].

Jääkaktiivmuda värvus on tavaliselt pruunikas ning see on tunduvalt homogeensem ja vähem tihedam kui toormuda, kuna see koosneb suhteliselt sarnastest, võrdse suuruse ja koostisega helvestest. Reoveesette osakesed on 90% ulatuses väiksemad kui 0,2 mm ning vaid 0,4% osakekestest on suuremad kui 3 mm. Aktiivmuda tahkeaine sisaldus kuivaines on 0,4-1,5%. Liigaktiivmuda on omaduste poolest aeglasti settiv ning raskesti käideldav, kuna pärast puhastusprotsessi jääb sete kohevaks ja vesiseks tänu millele on sellel aeglane raskustihenemine (kerged bioloogilised helbed, elusorganismide rohkus). [12, 25]

1.2.3 Segamuda

Segamuda (*ingl. mixed sludge*) on tekkinud toorsette ja bioloogilise muda ühinemisel, kus toorsetet on 35-45% ning bioloogilist muda 65-55%. Seda reoveesette liiki on kergem veetustada, kuna selle muda omadused on omavahel ühinenud. [29]

1.2.4 Tertsiaalmuda ehk järelpuhastisete ehk keemiline muda

Keemiline muda (*ingl. tertiary sludge, chemical sludge*) on mudaliik, mis pärineb keemilisest sadestamisest või filtreerimisest [12]. Antud protsess viiakse täiendavalt läbi lisaks sekundaarsele töötlusele, kui soovitakse eemaldada reoveest soovimatud toitained, milleks üldiselt on lämmastik ja fosfor [23]. Sadestusprotsess võidakse läbi viia koos primaarse või bioloogilise reoveepuhastuse etapiga mitte eraldiseisva protsessina [11]. Keemilise muda värvus sõltub tekkivatest

ainereaktsioonidest ning koostiselt sisaldab see tavaliselt keemilisi sademeid [12]. Muda oma omadustelt on stabiilne ning ei tekita ebameeldivat lõhna [11].

1.2.5 Stabiliseeritud sete

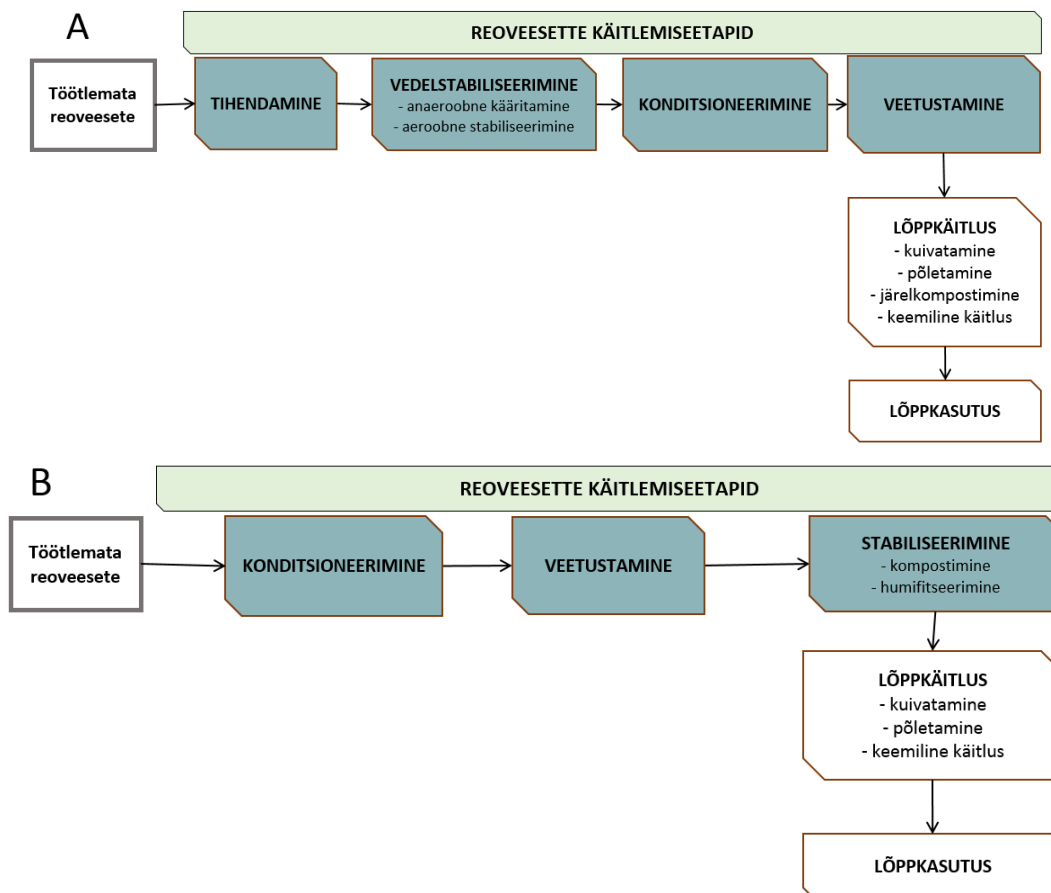
Pärast settekäitlust jaguneb reoveesete valdavalt kaheks, vastavalt sellele kas sete on stabiliseeritud aeroobselt või anaeroobselt. Aeroobselt stabiliseeritud sete on tumepruun suhteliselt inertne helbeline mass, mille kuivainesisaldus on 1-2%. Sete tekib kestval õhutamisel, mille tulemusena suur osa orgaanilisest ainest lendub gaasina õhku ning kuivainesisaldus on isegi madalam kui enne stabiliseerimist. Anaeroobselt kääritatud sete on gaasimulle sisaldav püdel mass, mis on metaantankist tulnud. Kääritatud sette kuivainesisaldus on tavaliselt 6-12%. [25] Üldiselt on kääritatud reoveesetel head veetustamisomadused ning selle keskmine saavutatav veetustamise kuivainesisaldus on teiste mudaliikidega võrreldes kõrgem [29, 30].

1.3 Reoveesete käitlemine

Enne reoveesete kõrvaldamist või taaskasutamist tuleb sete eelnevalt käidelda, et vähendada selle kui jäätmete hulka ning muuta see keskkonnale ja inimesele ohutumaks ilma keskkonnahäiringuid tekitamata ja tervist ohustamata [14, 25]. Settekäitluse töötlemisviisi valik sõltub mitmetest aspektidest, näiteks reoveesete edasisest kasutusvaldkonnast, lõppärastuspaiga piirangutest, reoveepuhasti suurusel, sette omadustel, maksumusel ja käituskuludel [25]. Reoveepuhastusjaamades on reoveesete töötlemine ja kõrvaldamine üks kallimaid tegevusi ning see moodustab kuni 50% jaama tegevuskuludest [13, 16]. Seega on spetsialistide üks keerulisemaid ülesandeid valida majanduslikult kõige teostatavam reoveesete töötlemisviis arvestades sette stabiliseerituse astet, energeetilisi ning keskkonnavalaseid aspekte [7, 31].

Reoveesete käitlemist võib tehnoloogiliselt jagada kolmeks põhitegevuseks: veetustamine, stabiliseerimine ja hügieniseerimine. Veetustamise eesmärgiks on settest vee eraldamine, stabiliseerimisel orgaanilise aine sisalduse vähendamine ning hügieniseerimisel vähendada reoveesettes olevate patogeenide (viirused, bakterid, helmintide munad) sisaldust [14]. Seejuures tuleb arvestada, et Eesti seaduse mõistes ei ole reoveest vee eraldamine piisav settekäitlusmeetod, mis tähendab, et sellele peab järgnema reoveesete lõppkäitlus [8]. Sette lõppkäitluse meetoditeks on näiteks kompostimine, kuivatamine ning põletamine [25]. Pärast lõppkäitlust toimub reoveesete lõppärastus, milleks võib olla prügilasse ladestamine, kasutamine põllumajanduses, haljastuses või rekultiveerimisel või hoopis kasutuselevõtt ehitusmaterjalide tootmises [2, 7, 25]. Järgneval

joonisel on välja toodud reoveesete töötlemisel kasutatavad käitlusmeetodid vedelstabiliseerimise (A) ja kompostimise (B) korral (Joonis 1.4).



Joonis 1.4. Reoveesete käitlemisetapid vedelstabiliseerimise (A) ja kompostimise (B) korral (autori joonis)

Tihendamine on tavaliselt üks esmane reoveesete töötlemisviis, mille eesmärk on suurendada reoveesete kuivainesisaldust ja vähendada käideldava sette mahtu [12]. Töötlemisprotsessi käigus eemaldatakse settest teatud osa vaba vett ning reoveesete kuivainesisaldus jääb vahemikku 2-12%, mis soodustab selle edasist käitlemist [25]. Tihendamiseks kasutatakse füüsikalisi meetodeid, nendeks võivad olla raskustihendamine, floteerimine, tsentrifuugimine, selitamine või mõni muu meetod [25, 31].

Stabiliseerimine on käitlusviis, mille eesmärk on muuta orgaaniline aine inertsemaks, vähendada orgaanilise aine üldmassi ja patogeenide sisaldust. Lisaks on stabiliseerimise tulemuseks reoveesete parem tahendatavus [12, 25]. Tavaliselt kasutatakse reoveesete stabiliseerimiseks ühte järgnevatest meetoditest: anaeroobne kääritamine, aeroobne stabiliseerimine, lubistabiliseerimine, kuumutamine, pastöriseerimine [25]. Lenduvate ainete sisaldus langeb anaeroobse kääritamise käigus 40-50% ning aeroobsel stabiliseerimisel 30-40% [32].

Konditsioneerimine on käitlusviis, mille eesmärk on muuta sette struktuuri ja parandada selle edasist töötlemist ehk muuta sete nõrutatavaks, filtritavaks või tsentrifuugitavaks kemikaalide abil [23, 25]. Selles etapis lisatakse vedelsetele kemikaale tahkete ainete koaguleerimiseks ja äravoolu parandamiseks [33]. Protsessi tulemusena koonduvad setteosakesed helvesteks [25].

Tahendamine ehk veetustamine on mehaaniline käitlusmeetod, mille eesmärk on vähendada reoveesettes veesisaldust [31]. Selles etapis väheneb oluliselt sette maht ning suureneb kuivainesisaldus, mis tavaliselt on 20-45% sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast [11, 12]. Olenemata sellest, et reoveesettesse jääb alles märkimisväärne kogus vett, sageli kuni 70%, ei käitu reoveesete enam vedelikuna vaid seda on võimalik käsitleda kui pool-tahket materjali [33].

1.4 Reoveesette veetustamine

Üldiselt on reoveesette halvasti veetustatav reovee jääkprodukt, millest on keeruline vett kätte saada tänu sette kolloidse iseloomu ja tugeva hüdrofiilsuse tõttu [7, 13]. Veetustamisprotsessi parandamiseks reoveesete eelnevalt konditsioneeritakse, mille tulemusena tõuseb veetustamisprotsessi efektiivsus [12]. Veetustamise käigus eraldatakse settest vabavesi ja osa rakkudevahelisest veest, kuna mehaaniliste töötlemisviiside abil ei ole võimalik kätte saada settest seotud vett [13].

Veetustamise protsess avaldab selle rakendamise korral märkimisväärset mõju sette edasisele käitlemisele. Reoveesette saavutatav kuivainesisaldus sõltub kasutatavast tehnoloogiast, reoveesette olemusest ja konditsioneerimisest. Selle etapi vajalikkus ja olulisus sõltub sette edasisest kasutusvaldkonnast ning sette transpordi vajalikkusest. [11] Esialgelt võib veetustamise tehnoloogia rakendamine kaasa tuua kõrgema rajamis maksumuse ja suuremad tegevus- ja polümeerikulud, kuid valdavalt toob see protsessi osa endaga kaasa mitmesuguseid positiivseid aspekte:

- vähendab reoveesette mahtu, mida tuleb kõrvaldada või töödelda [18, 25, 32];
- soodustab sette ladustamist ja transporti [11];
- parandab reoveesette käitlemistingimusi (suurem kuivainesisaldus) [11, 12, 25];
- alandab transpordikulusid [12, 25];
- madaldab reoveesette kõrvaldamise kulusid [7];
- suurendab reoveesette soojusvõimust, mis muudab põletamise tulusamaks ning tõstab reoveesette kütteväärtust [11, 12];
- aitab vältida reoveesette vedeliku äravoolu pinnasesse selle kasutamisel väetisena [34];

- kahandab kompostimiseelse tugiaine vajadust [25];
- muudab sette atraktiivsemaks, selle kasutamisel väetisena [13].

1.4.1 Veetustamist mõjutavad parameetrid

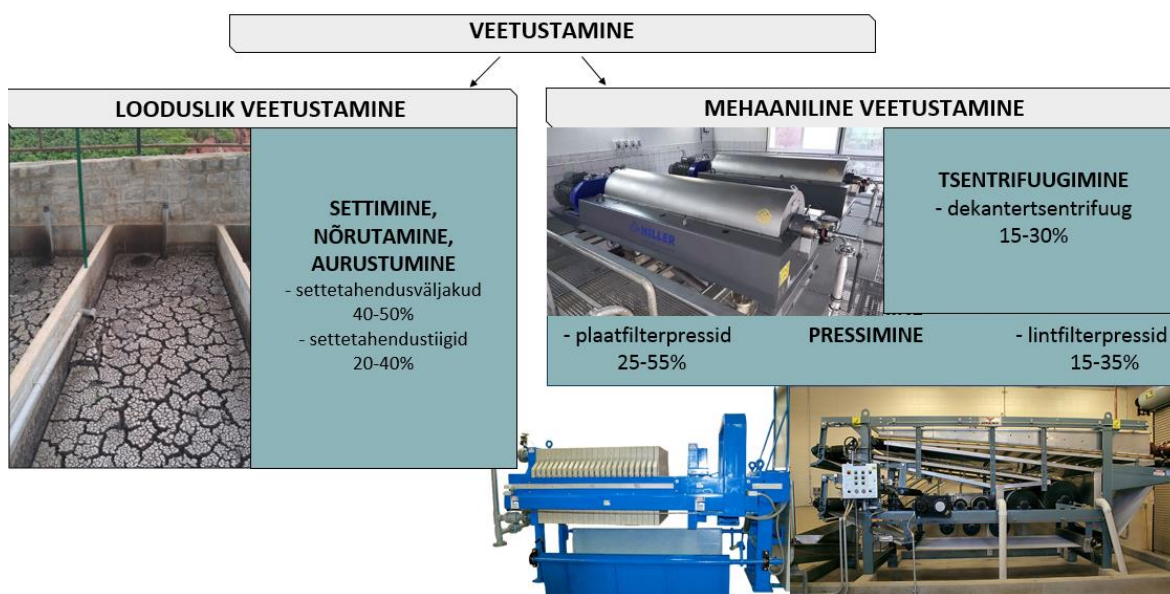
Veetustamise protsessi käigus reoveesetest kättesaadava veekogus sõltub mitmetest vedelike, osakeste ja reoveesete omadustest, mis muudavad sette paremini või halvemini tahendatavaks [35]. Mitmete allikate põhjal mõjutavad veetustamise tulemust järgnevad omadused:

- tahkete osakeste suurus – suured kompaktsed helbed settivad kiiremini, väiksemad osakesed seevastu kehvemini. Veetustamise tulemust mõjutavad kõige rohkem kolloidsed osakesed, mille suurus on vahemikus 1-100 µm [12, 35];
- osakeste tihedus – tihedad ja suured flokid on hea settivuse ja veetustamise näitajaga, kuna need ei ummista settekoogis pooride struktuuri ning on halva vee sidumis võimega [4];
- lenduvate tahkete ainete sisaldus – madalama kontsentratsiooniga sete on kergemini veetustatav ning lõpptulemuseks on suurema tahke settekoogi saavutamine. Lenduvate orgaaniliste ainete sisaldus on toorsetes 55-60%, jääkaktiivmudas 70-80% ja kääritatud mudas ligikaudu 50% [4, 7, 29];
- tahkete ainete kontsentratsioon ja vee jaotus - seotud vee osakaal reoveesettes halvendab veetustamise tingimusi ning mida rohkem on settes tahkeid aineid, seda rohkem sisaldab see seotud vett [12, 35];
- ekstratsellulaarsed polümeersed ained (*ingl. lühend EPS*) - mida rohkem on settes lahustuvaid EPS seda suurem on reoveesete sidumisvõime ehk kõrgema EPS väärtuse korral on seotud vee osakaal settes suurem [7, 12];
- kolloidsed osakesed – mida rohkem on settes silmale nähtamatuid ja halvasti settivaid osakesi seda raskemini on see veetustatav. Reoveesete kolloidne järjestus madalast kõrgemaks on toorsete, segamuda, kääritatud muda ning bioloogiline muda [18, 29];
- viskoossus – kõrgema viskoossusega reoveesetteid on keerulisem veetustada. Näiteks lahustuva EPS eemaldamisega reoveesettes väheneb muda viskoossus ja sellega paraneb veetustamise tase [7];
- aktiivmuda protsessi efektiivsus – kehvades tingimustes reoveesettes tekkiv pundunud aktiivmuda (*ingl. bulking sludge*) põhjustab aktiivmuda halba settivust ja veetustamise taset ning sellega kaasneb sette kergesti välja kandumine järelsetitist [4, 27];
- protsessiaeg ja muda vanus – reoveesete protsessis viibimise ajast sõltub sette kvaliteet ning selle tulemusena paraneb sette flokulatsioon [13, 18].

Turovskiy ja Mathai (2006) on leidnud, et parima veetustamise tulemuse saab keemilise ja mehaanilise töötlemise teel [12]. Seetõttu on oluline rakendada kõige efektiivsemat tehnoloogiat vastavalt reoveesette edasisele kasutusvaldkonnale ja soovitud kuivainesisaldusele.

1.5 Veetustamise tehnoloogiad

Veetustamise läbiviimiseks on võimalik kasutada erinevaid tehnoloogiad, mille valikul tavaliselt lähtutakse tahendamist vajava sette kogusest, saavutatavast kuivainesisaldusest ja protsessi ruumivajadusest [10]. Veetustamise läbiviimiseks on võimalik kasutada vabas õhus toimuvaid käitlusviise või mehaanilisi töötlemisvõtteid [16]. Levinumad meetodid, mida veetustamiseks kasutatakse on settetahendusväljakud, tsentrifuugid ja filterpressid [7, 12]. Järgneval joonisel on välja toodud maailmas põhiliselt kasutatavad veetustamise tehnoloogiad (Joonis 1.5).

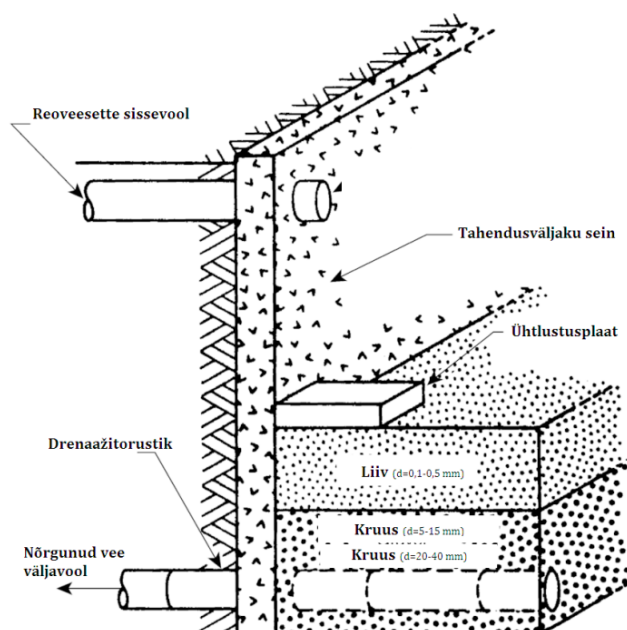


Joonis 1.5. Peamiselt kasutatavad veetustamise tehnoloogiad (autori joonis) [36, 37, 38, 39]

1.5.1 Settetahendusväljakud

Settahendusväljakud (*ingl. drying beds*) on üks lihtsam ja odavam veetustamise meetod, kus reoveesette kuivatamine toimub vabas õhus soojuseenergia toimel. Üldiselt kasutatakse tahendusväljakuid väikestes reoveepuhastusjaamadest, kui on olemas suur maa-ala ning soodne kliima aastaringseks töötamiseks. Tahendusväljakute rajamise eeliseks on väike energiakulu ja kemikaalitarve ning hooldustööde vähene vajalikkus. Meetodi puuduseks on potentsiaalselt tekkida võivad lõhnaprobleemid, suured tööjõukulud ja suur maa-ala vajadus. Peamiselt kasutatakse tahendusväljakuid kääritatud sette tahendamiseks. [23, 25]

Ülesehituselt jagunevad tahendusväljakud valdavalt neljaks, millest kõige vanem ja enim kasutatav väljakutüüp on liivalusväljak [40]. Settetahendusväljakud on umbes 800 mm sügavad, millest läbilaskev liivakiht moodustab 150-250 mm, kruusakiht 300 mm ning reoveesette kiht 200-300 mm [41,42]. Lisaks on enne liivakihti ühtlustusplaat, mis aitab vältida liiva erosiooni ja ühtlustada sette jaotumist [40]. Kruusakihtina kasutatakse üldiselt kahe erineva diameetri suurusega kruusa, et vältida väikeste osakeste poolt tekkida võivat ummistust [41]. Kruusakihi alla on paigaldatud дренаažitorustik, kuhu koguneb kihtidest läbi nõrgunud vesi, mis suunatakse tagasi reoveepuhastusjaama [25]. Settetahendusväljaku läbilõike ülesehitus on välja toodud järgneval joonisel (Joonis 1.6).



Joonis 1.6. Tahendusväljaku ülesehituse läbilõige [40, 41]

Väljaku kuivamisprotsessi põhimõte seisneb vedeliku äravoolul läbi liiva ja kruusa kihtide ning vee aurustumise kaudu sette pinnalt [33, 41]. Kuivamine toimub põhiliselt kahes osas, kus reoveesettes olev vabavesi nõrgub kiiresti läbi erinevate kihtide ning teises osas aurustub settest seotud vesi pikema aja jooksul [41]. Väljakute kasutamisega on võimalik saavutada 40-50% kuivainesisaldus, kuid Põhjamaades võib see väheneda 10%-ni seoses kliimatiliste tingimustega [23]. Kui settesse tekivad liivani ulatuvad praod on seda võimalik eemaldada käsitsi käsihargiga või mehaaniliselt esiosa laaduriga [25, 33].

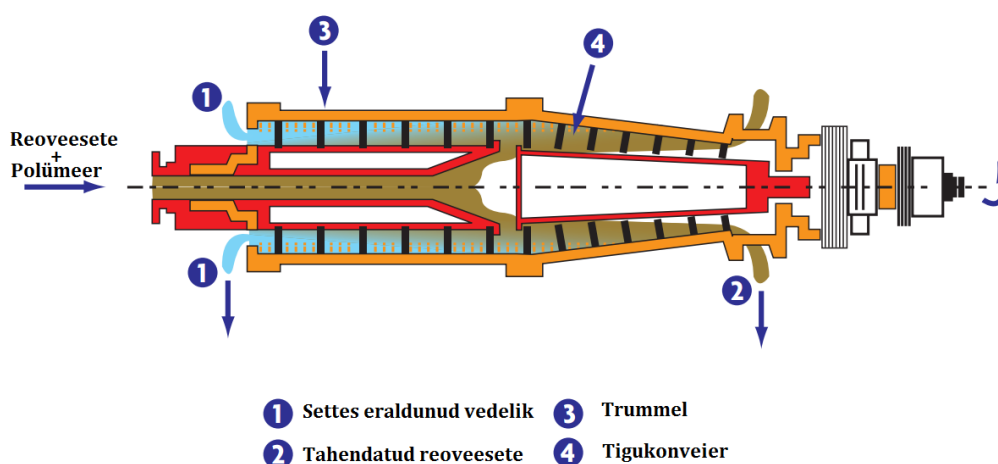
1.5.2 Mudatahendustsentrifuugid

Dekantersentrifuug (*ingl. solid-bowl centrifuge, decanter centrifuge*) on üks enam levinud seade, mida kasutatakse reoveesetest tahkeaine ja vedeliku eraldamiseks tihendamise ja tahendamise protsessi käigus [4, 12, 23]. Kahe protsessi erinevus seisneb selles, et tahendamisprotsessis

kasutatakse kõrgemat raskusjõudu, aeglasemat diferentsiaal kiirust (tahkematerjal püsib pikemaajalisemalt protsessis) ja kõrgemat ülevoolu seina vedeliku väljavoolus [16].

Tsentrifuugimisel kasutatava tehnoloogia positiivseteks aspektideks on nende kompaktsus, suur läbilaskevõime, lihtne ja vähene optimeerimise vajadus, protsessi kiirus ning süsteemi kinnisus ja puhtus. Negatiivseteks omadusteks on seadme müratase, vibratsioon, koolitatud personali vajalikkus ning suur energiatarve (25-80 kWh/t kuivaine kohta). [23, 43] Tsentrifuuge kasutatakse valdavalt toorsette ja jääkaktiivmuda veetustamiseks [12].

Dekantersentrifuug on horisontaalne tehniline seade, mis koosneb põhiliselt koonus-silindrilises trumlist, mille sisse on paigaldatud tigukonveier (Joonis 1.7) [44]. Seade töötab tsentrifugaaljõu toimel, kus tiheduse erinevuse tõttu eralduvad kaheks erinevaks kihiks vedelik ja tahkeaine [43].



Joonis 1.7. Tsentrifuugi seadme ülesehitus [29]

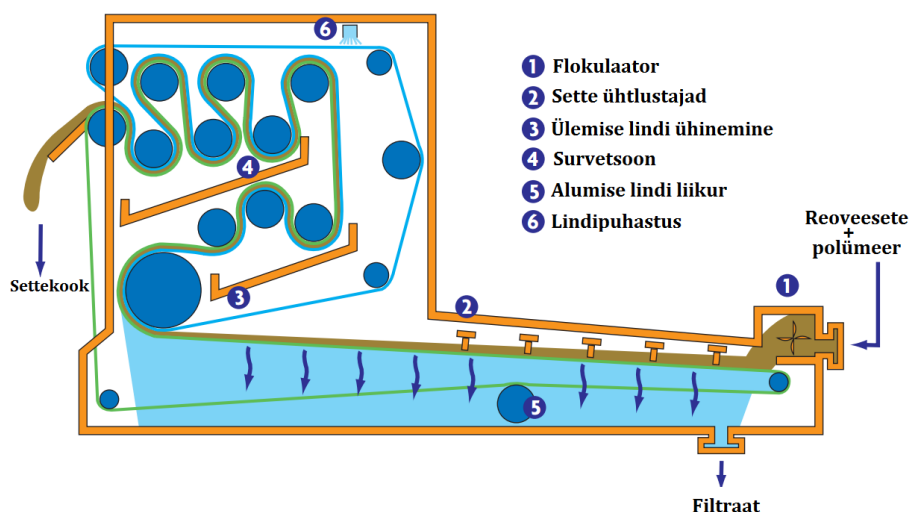
Tööpõhimõttelt juhitakse pideva voona protsessi reoveesete läbi statsionaarse sisendtoru, mille sissevoolu kiirus toimub vastavalt sisendrootori tööle [44]. Separeerimisprotsessi käigus pöörleb seade suure kiirusega, mille tulemusena tahked ained settivad vastu trumli seina, mis juhitakse tigukonveieriga seadme koonuselise osa poole [12, 44]. Protsess viiakse läbi kogu silindrilise osa ulatuses ning selle jooksul trummel ja tigukonveier liiguvad ühes ja samas suunas, kuid erineval kiirusel (tahkete ainete transport vajab madalamat kiirust) [43, 44]. Gravitatsioonijõust kõrgema kiiruse tulemusena settivad esmalt protsessist välja tahked osakesed ning hiljem tsentrifugaaljõu toimel, tihendamise käigus, eralduvad protsessist rakkudevahelise vee osakesed [12]. Tsentrifugaaljõud on 500-3000 korda suurem kui gravitatsioonijõud [45]. Reoveesettes eraldatud vedelik täidab trumli, mis täitub ülevoolu avani, milleni jõudmisel hakkab vedelik välja voolama. Protsessi tulemusena väljub seadme ühest otsast veetustamise käigus eraldanud filtraat ning teisest otsast suurema kuivainesisaldusega veetustatud settetekook [12, 44]. Tsentrifuugi seadmega on võimalik saavutada 15-30% kuivainesisaldusega reoveesete [4, 23].

1.5.3 Lintfilterpressid

Lintfilterpress (*ingl. belt filter press*) on maailmas üks laialdasemalt kasutatav veetustamise seade, kus reoveesettes olev vesi eraldatakse kahe lindi vahel rõhu rakendamise teel [12, 46]. Veetustamise tulemus sõltub sette omadustest, keemilise konditsioneerimise viisist ja toimeainest, rakendavast survest, masina ehitusest ning lindi poorsusest, kiirusest ja laiusest [25].

Seadme positiivseteks omadusteks on reoveesette pidev etteandmine, madalad käituskulud, väikesed ja keskmise suurusega seadmed, madal energiatarve (35 kWh/t kuivaine kohta) ning vähene kemikaalide vajadus [12, 23, 25]. Negatiivsed omadused on tundlikkus sissetuleva sette omaduste suhtes, suur puhastusvee vajadus ning potentsiaalne ebameeldiva lõhna levik [4, 25]. Tehnoloogiat kasutatakse nii toor kui kääritatud sette veetustamiseks [25].

Üldehituselt koosneb lintfilterpress kahest katkematust poorselt lindist, mis liiguvad rullikute vahel (Joonis 1.8). Selle tulemusena tekib reoveemudade vahel surve, mis aitab vähendada reoveesettes olevat veesisaldust [44]. Rullikud on valmistatud korrosioonikindlast materjalist ja kaetud kummist kattega, et takistada neil asetsevate lintide libisemist [44]. Töö põhimõttelt jaguneb protsess kolmeks, kus esmalt toimub konditsioneeritud sette raskustihendamine, seejärel rakendatakse lindile madalsurve settekoogi tekkimiseks ning sellele järgneb kõrgsurve tsoon, kus lint läbib mitmete rullikute seeria [12, 25].



Joonis 1.8. Lintfilterpressi ülesehitus [29]

Protsessi alguses juhitakse konditsioneeritud muda 0,5-3,0 meetrisele lindile, kus toimub selle ühtlane jaotumine [16, 29]. Seejärel jõuab märg reoveemuda raskusjõu tsooni, kus eraldub settes olev vabavesi ning veehulk väheneb ligikaudu poole võrra [44]. Eraldunud vedelik juhitakse läbi poorse lindi äravoolu torudesse, kus see juhitakse ühisesse kogumismahutisse [44, 46]. Järgmise

etapina jõuab sete survetsooni, kus surutakse kaks linti omavahel järk järgult kokku. Selle protsessi alguses on kiilutsooni, kus reoveesete jõuab kahe lindi vahele ning rihmade tihendamise tulemusena saavutab reoveesete „kooki“ kujutava vormi. Seejärel liiguvad kaks linti mööda rullikuid, kus kõrgsurve toimel vaba vesi reoveesette kihist välja pressitakse [44, 46]. Protsessi läbiviimiseks on võimalik kasutada erineva survega seadmeid, millest madala survega seade on 4 baari, keskmine 5 baari ja kõrge 7 baari [16]. Viimasel rullil eraldatakse rihmad üksteisest ning muda jõuab kraapimise tsooni, kus mudakook kukutatakse kraabitsate abil kogumismahutisse [44, 46]. Lõpus pestakse kõrgsurvepesuga mõlemad linnid puhtaks, et eemaldada nendelt tahked ained, mis on kogunenud pooridesse [29, 46]. Protsessi käigus saavutatav kuivainesisaldus on 15-35% [39].

1.6 Eesti reoveepuhastusjaamade veetustamise tasemed

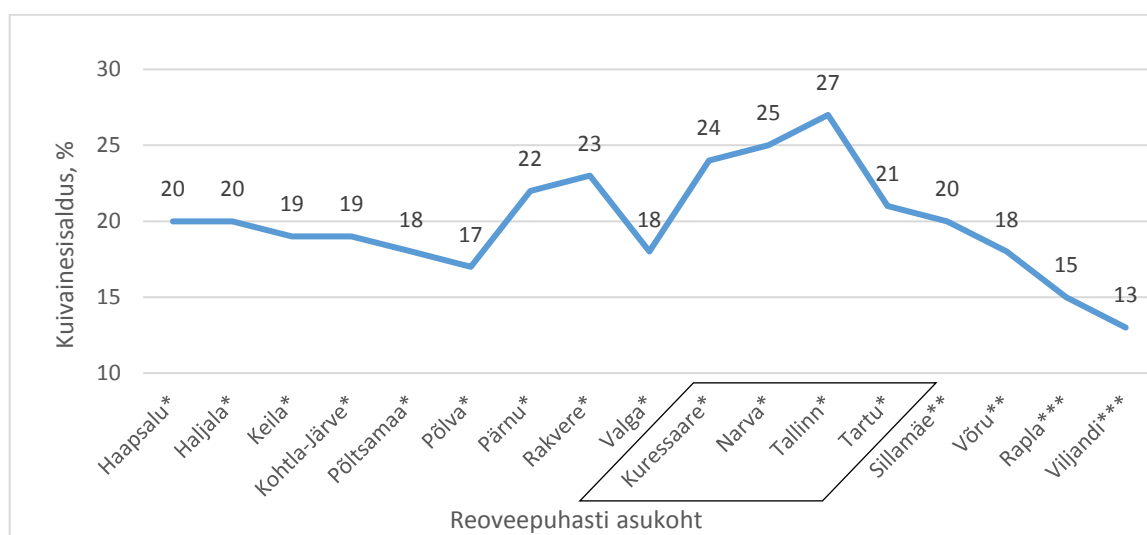
Eestis on kokku 525 reoveekogumisala, millest 22 on suured jaamad (<10 000 ie), 35 keskmise suurusega (2000-10 000 ie) ning 468 jaama on väiksed (>2000 ie) [2]. Ligikaudu 90% Eestis tekkivast reoveesetest pärineb üle 2000 ie puhastusjaamadest [47]. Valdavalt veetustatakse setet just nendes jaamades, kuna väiksemates puhastusjaamades ei ole settekoguse vähesuse ja tehnoloogia kalliduse tõttu neid mõistlik rakendada.

Eestis läbiviidud projekti „Regionaalsete reoveesete käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesete kohta“ andmete põhjal on analüüsitud reoveepuhastusjaamade poolt esitatud 2013. aasta andmeid reoveesete veetustamise keskmise kuivainesisalduse ja kasutatavate seadmete kohta. Andmed on saadud ettevõttelt OÜ Aqua Consult Baltic eelnevalt nimetatud projekti raames, mis esitati projekti tellijale töö lisana. Käesolevas töös on käsitletud 31 reoveepuhastusjaama andmeid, mis moodustab üle 2000 ie reoveepuhastusjaamadest 54%. Täpsemalt on analüüsitud 77% suurte jaamade ja 40% keskmiste jaamade veetustamistasemeid.

Vaadeldud Eesti reoveepuhastusjaamadest olid seadmetest kasutusel 68% dekantertsentrifuugid, 16% lintfilterpressid ja 16% kruvipressid. Kasutatavate seadmete keskmine vanus on umbes 6,5 aastat ning seitsme puhastusjaama seadmed olid vanemad kui kümme aastat (2015. aasta andmete põhjal). Dekantertsentrifuugide kasutamise populaarsust Läänemere piirkonnas kinnitab ka IWAMA projekti käigus teostatud uuring 2016-2017. aastal, kus 80% vastanud reoveepuhastusjaamadest olid kasutusel dekantertsentrifuugid ning 20% erinevad pressiseadmed (lintfilterpress, kamberfilterpress või kruvipress). [48]

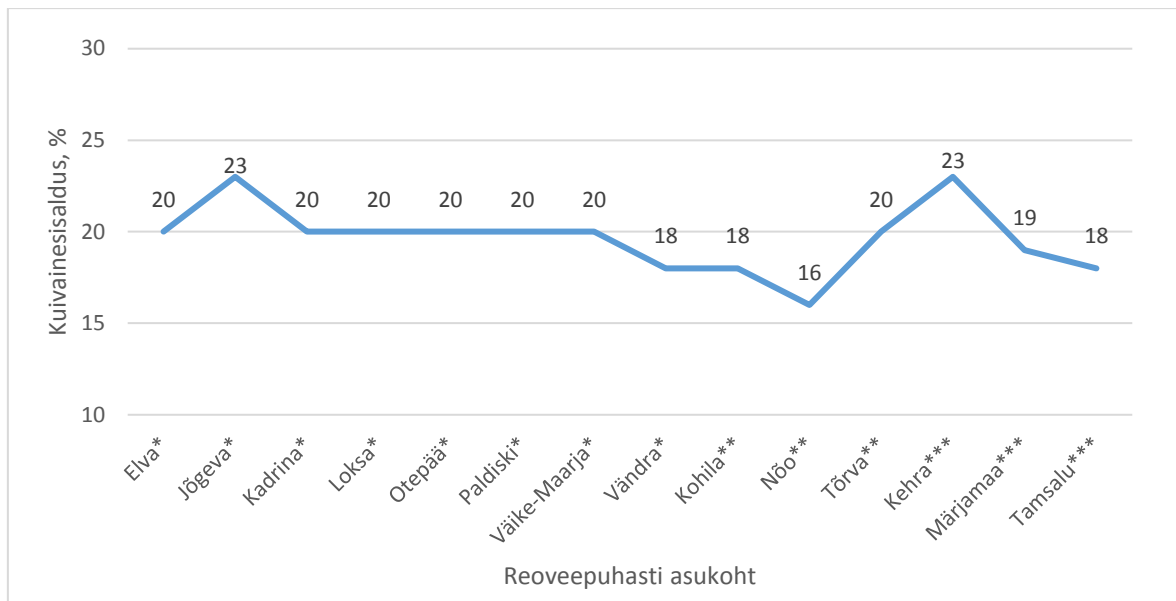
Läänemere piirkonna reoveepuhastusjaamades oli keskmine saavutatav kuivainesisaldus dekantertsentrifuugide kasutamise korral 22% ning presside kasutamisel 21%. Kuigi keskmine tulemus on sarnane, siis standardhälve on vastavalt 3,9% ja 9,1%, mis näitab, et dekantertsentrifuugide saavutatav kuivainesisaldus on ühtlasem. [48]

Sarnast tulemust näitavad ka Eestis saavutatavad kuivainesisaldused, kus suurtes jaamades on keskmine tahendatud sette kuivainesisaldus 19,9%. Vaadeldes eraldi seadme põhiselt saavutatud kuivainesisalduse näitajaid on dekantertsentrifuugidega saavutatud keskmine kuivainesisaldus 21%, kruvipressil 19% ja lintfilterpressil 14% (Joonis 1.9). Kõrgeima kuivainesisaldusega sette saavutatakse Tallinna, Narva ja Kuressaare reoveepuhastusjaamades, kus toimub anaeroobselt stabiliseeritud muda veetustamine. Metaantankiga varustatud reoveepuhastusjaamade keskmine saavutatud kuivainesisaldus oli 24,3%, mis on joonisel märgitud eraldi kastiga. [49]



Joonis 1.9. Reoveepuhastusjaamade (< 10 000 ie) saavutatud kuivainesisaldus 2013. aastal (autori joonis) [49]. Joonise tähistus: *dekantertsentrifuug, **kruvipress, ***lintfilterpress, □ metaantankiga jaamad

Keskmise suurusega puhastusjaamades oli keskmine tahendatud sette kuivainesisaldus 19,6%. Seadme põhiselt saavutati dekantertsentrifuugidega 20%, kruvipressiga 18% ja lintfilterpressiga 20% kuivainesisaldusega sette (Joonis 1.10). Keskmise suurusega jaamades on saavutatav kuivainesisaldus stabiilsem ning kruvi- ja lintfilterpressiga saavutatav kuivainesisaldus ei erine oluliselt dekantertsentrifuugidega saavutatavast tulemusest.



Joonis 1.10. Reoveepuhastusjaamade (2000-10 000 ie) saavutatud kuivainesisaldus 2013. aastal (autori joonis) [49]. Joonise tähistus: *dekantertsentrifuug, **kruvipress, ***lintfilterpress

1.7 Reoveesettes oleva vabavee sisalduse määramine

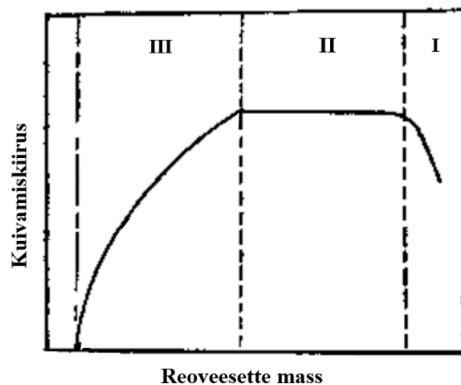
Reoveesettes sisalduva vabavee määramiseks on kasutusel erinevaid meetodeid, et hinnata settes oleva vabavee osakaalu, sette tahkeaine kontsentratsiooni ning potentsiaalselt saavutatavat veetustamise tulemust [50, 51]. Seotud vee sisaldust reoveesettes on võimalik määrata järgmiste meetoditega [52]:

- dilatomeetiline katse - põhineb settes oleva vee külmumisomadustel, kus seotud vesi ei külmu -20°C juures. Sellest tulenevalt on kogu vee ja vaba vee sisalduse vahe seotud vee osa settes [6];
- rõhu- ja vaakumtest - põhineb vaba vee surumisel (rõhu rakendamisel) läbi poorse materjali, mille pinnale jäävad tahked osakesed koos seotud veega [13, 52];
- tsentrifugaalne settimis katse - põhineb suurel pöörlemiskiirusel läbiviidaval katsel (3500-4000 rpm), kus settinud reoveesete moodustab seotud vee osa [6];
- kuivatamistest - põhineb kuivamiskõvera analüüsimisel, kus kriitiline niiskuse languspunkt on võrdne seotud vee osakaaluga settes [6, 52].

1.7.1 Termogravimeetrilise analüüsi põhimõte

Termogravimeetrilise analüüsi (*ingl. thermal gravimetry analysis*) tööpõhimõte seisneb reaajas niiskuse sisalduse mõõtmisel proovi massi muutuse kaudu [53]. Analüüsi tulemusena moodustub kuivamiskõver, millelt kajastub aurustumiskiiruse ja veesisalduse omavaheline seos [53]. Põhiliselt

võib kuivamisprotsessi jagada kolmeks etapiks, milleks on soojenemisefaas (I), püsiva kiirusega kuivamisfaas (II) ning kuivamisprotsessi aeglustumise (III) faas (Joonis 1.11) [53]. Protsess on lõppenud, kui kogu vesi on settest eraldunud [50].

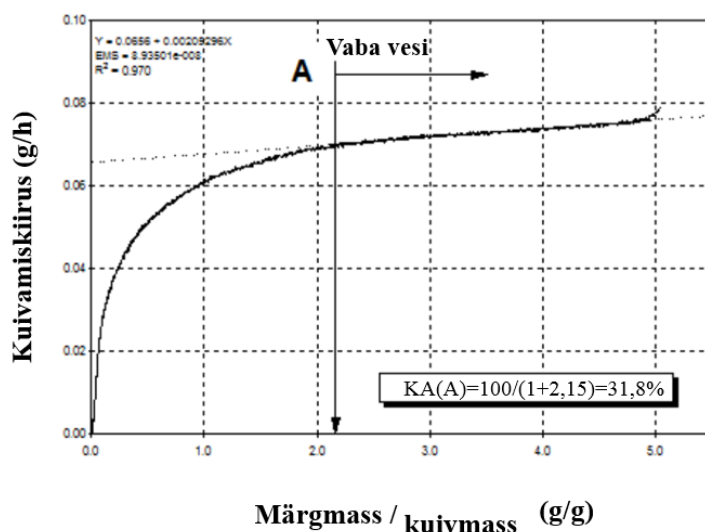


Joonis 1.11. Termogravimeetrilise analüüsi kolm kuivamisfaasi [53]

Vabavee sisalduse määramine graafiku põhiselt toimub punktis, kus muutub protsessi kuivamiskiirus, joonisel tähistatud punktiga A (Joonis 1.12). Sellel hetkel langeb oluliselt kuivamiskiirus tänu rakkudevahelise ja seotud veele, mille aurustumine on aeglasem. Kuni selle hetkeni aurustub settest vabavesi, mis graafikul langeb lineaarselt. Punkt KA_A on maksimaalne tahkete ainete sisaldus settekoogis, mis on võimalik mehaanilise veetustamise käigus saavutada [18, 50]. Punkti arvutamiseks kasutatakse valemit [19]:

$$KA(A) = 100/(1+m(A)), \quad (1.1)$$

kus, $KA(A)$ – kuivainesisaldus kuivamiskõvera punktis, %,
 $m(A)$ – massi väärtus punktis A, g/g.



Joonis 1.12. Vabavee sisalduse punkti määramine kääritatud muda kuivamiskõvera näitel [54]

Protsessi läbiviimisel on oluline, et katse viiakse läbi konstantsete tingimustes ja madala temperatuuril, millest viimane peaks jääma vahemikku 20-40°C, kuna kõrgema temperatuuri rakendamisel on oht, et lisaks vabale veele aurustuvad protsessist teised veeliigid kuigi vabavett on endiselt reoveesettes [19, 52]. Kopp (2001) on oma uuringus välja toonud, et kõrgema temperatuuri rakendamisel jõuab saavutatava punkti A väärtus kohale varem ning seoses sellega on reoveesettes oleva vabaveehulk väiksem [19]. Üldiselt on meetod lihtne ning selle kiirus sõltub peamiselt tahkete osakeste sisaldusest settes [6, 53]. Meetodi rakendamisel on leitud, et sellel on hea korrelatsioon vee ja tahkete ainete kontsentratsiooni vahel [35].

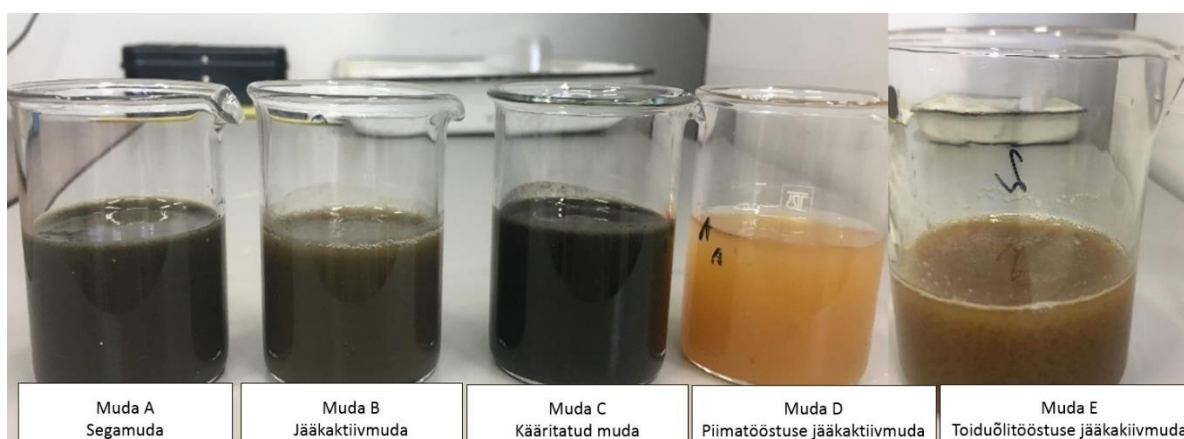
2 MATERJAL JA METOODIKA

Töö eksperimentaalne osa oli jagatud kaheks etapiks. Esmalt töötati välja metoodika, millega oli võimalik määrata reoveesettes oleva vabavee sisaldust ning töö teises osas viidi läbi katsed, kus kontrolliti saadud vabavee väärtust erinevate reoveesette parameetritega ja katsemeetodiga.

2.1 Reoveesette proovid

Töö raames kasutatud reoveesette proovid pärinesid ühelt olmereoveepuhastusjaamalt ja kahelt tööstusettevõttelt. Kokku teostati katsed viie erineva reoveesetega, mis on väljatoodud alloleval joonisel (Joonis 2.1). Järgnevas loetelus tuuakse välja kasutatud mudade päritolu ja muda iseloomustavad näitajad:

- muda A oli olmereoveepuhasti segamuda, mis võeti pärast eelsetiti ja jääkaktiivmuda ühinemiskohta;
- muda B oli olmereoveepuhasti puhastusprotsessist pärit jääkaktiivmuda, mille vanus oli 12-15 päeva enne sette stabiliseerimist;
- muda C oli olmereoveepuhasti kääritatud muda, mis pärines pärast anaeroobset stabiliseerimis etappi;
- muda D oli piimatööstuse jääkaktiivmuda, mis pärines aktiivmudapuhastist ning mille vanus oli 20-25 päeva;
- muda E oli toiduõlitööstuse jääkaktiivmuda, mis pärines aktiivmudapuhastist ning mille vanus oli 30-35 päeva.



Joonis 2.1. Katsete läbiviimisel kasutatud erinevad reoveesette liigid (autori foto)

Katse metoodika väljatöötamiseks teostati katsed olmereoveepuhastusjaama kääritatud mudaga, kuna see oli stabiliseeritud ning selle omadused olid vähem muutlikud. Võrdluskatsete

analüüsimisel viidi katsed läbi kolme liiki reoveepuhastusjaama mudaga (sega-, jääkaktiiv- ja kääritatud muda) ning kahe tööstusettevõtte protsessimudaga, et võrrelda saavutatud tulemuste erinevust ja meetodika rakendamise sobilikkust.

Laborisse toodi proovid 1-5 liitrites plastikpudelites ja -kanistrites, milles neid hoiustati kuni katsete läbiviimiseni. Sega- ja kääritatud muda säilitati külmakapis (temperatuuril 3°C) ning jääkaktiivmuda aereeriti ööpäevaringselt labori temperatuuril. Katsed teostati kuni nelja päeva jooksul pärast proovide võtmist arvestades asjaolu, et setteproovid ei ole stabiilsed ning ainete kontsentratsioonid võivad aja jooksul muutuda.

2.2 Katseseadme kirjeldus

Katsed viidi läbi Jaapani ettevõtte A&D Company, Ltd poolt toodetud niiskusemõõtjaga AND MS-70, mis on termogravimeetrilisel analüüsi meetodil põhinev katseseade (Joonis 2.2). Kasutatava niiskusemõõturi tööpõhimõte seisneb niiskusesisalduse mõõtmises selle kaalu muutuse kaudu [55]. Kuivatamis protsessi käigus kuumutatakse halogeenlambiga seadmesse asetatav proovipann vastavalt valitud temperatuurile, mille käigus hakkab proovist aurustuma vesi, proovimass väheneb ning katse lõpeb hetkel, kui proov on saavutanud konstantse väärtuse.



Joonis 2.2. Niiskusemõõtur AND MS-70 (autori foto)

Katseseade oli ühendatud „WinCT-Moisture“ tarkvara programmiga, mis koostas reaajas niiskusesisalduse muutumise graafiku ning registreeris andmed vastavalt valitud ajalisele intervallile. Mõõtmisperioodi hetkel kuvas mõõteseade proovi kuivamise ajal järjepidevalt niiskuse

sisaldust protsentides, mis oli väljendatud vee massiprotsendina proovi tahkes või vedelas olekus [55]. Niiskusemõõduri põhiandmed [55] :

- koosneb kaaluseadmest, proovipannist ja küttekehast;
- halogeenlambi võimsus 400 MW;
- temperatuuri vahemik 30-200°C, mida saab reguleerida ühe kraadi kaupa;
- andmete registreerimine alates 1 sekund;
- mõõtetulemuse täpsus 3 kohta pärast koma;
- minimaalne proovikogus 0,1 grammi.

Mõõteseadme standardhälve üle 1 grammise proovikoguse korral on 0,5% ning üle 5 grammiste proovikoguste korral 0,01%. Kaalu mõõtetäpsus on 0,0005 grammi. [55]

2.3 Analüüsimeetodid

Töö eksperimentaalse osa läbiviimiseks teostati katsed Tartu Ülikooli Kolloid- ja keskkonnakeemia õppetooli reovee laboris ajavahemikul 18. veebruar – 15. mai 2019. Praktilise töö käigus määrati katsetega reoveesette kuivainesisaldus, põletuskadu, muda settimis- ja filtreerimiskiirus ning viidi läbi rõhu all pressikatse. Andmete analüüsimiseks kasutati Microsoft Exceli tabelarvutustarkvara. Kasutatud mõõtevahendite, katseseadmete ja läbiviidud katsete fotod on esitatud lisas 1.

2.3.1 Kuivainesisaldus

Kuivainesisaldus näitab mudade tahkeaine kontsentratsiooni ja niiskusesisaldust. Katse läbiviimiseks pandi portselanumasse 20 ml reoveesetet, mis asetati kuivatuskappi 105°C juurde 24 tunniks. Proovi tulemus arvutati massierinevuse kaudu kolme paralleelse katse tulemuse põhjal. Katse viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 12880 [56]. Kuivaine sisalduse leidmiseks kasutati valemit [56]:

$$M_{KA} = \frac{(M_1 - M_0)}{V} * f, \quad (2.1)$$

kus, M_{KA} – kuivainesisaldus proovis, g/l,

M_0 – proovianuma tühikaal, g,

M_1 – kuivatatud proovi kaal koos proovianuma kaaluga, g,

V – proovi ruumala, ml,

f – teisendustegur, 1000=g/l.

2.3.2 Põletuskadu ja -jääk

Põletuskadu väljendab proovis oleva orgaanilise aine sisaldust, mis on väljendatud kuivaine ja põletusjäägi vahena [57]. Katse läbiviimiseks kuivatati reoveesete (105°C, 24 h), seejärel jahutati ja kaaluti proovid ning põletati 550°C juures 4 tundi. Katse viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN-15935 [58]. Kolme paralleelse proovi keskmine tulemus arvutati massierinevuse kaudu vastavalt valemile [58]:

$$M_{PK} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} * f, \quad (2.2)$$

kus, M_{PK} – proovi põletuskadu, %,
 M_1 – kuivatatud proovi kaal koos proovianuma kaaluga, g,
 M_2 – põletatud proovi kaal koos proovianumaga, g,
 M_3 – proovianuma tühikaal, g,
 f – teisendustegur, 100=%.

Põletusjääk näitab proovis oleva mineraalse osa, mis pärast proovi põletamist anumasse alles jääb. Tulemuse arvutamiseks kasutati valemit [58]:

$$M_{PJ} = 100 - M_{PK}, \quad (2.3)$$

kus, M_{PJ} – proovi põletusjääk, %,
 M_{PK} – proovi põletuskadu, %.

2.3.3 Muda settivus

Muda settivus väljendab mahuliselt reoveesettes sisalduva vee ja biomassi omavahelist suhet ning selle järgi on võimalik hinnata settes oleva tahkeaine suutlikkust eralduda vedelikust raskusjõu toimele [59]. Katse viidi läbi 30 minuti settimistestina, kus mõõtesilindrisse pandi 1000 ml reoveesetet. Katse ajal märgiti iga viie minuti tagant reoveesette poolt hõivatud ruumala 10 ml täpsusega. Settivustesti läbiviimisel lahjendati reoveesete vastavalt sette kuivaine kontsentratsioonile, et kõrvaldada algekstraktsiooni mõju settimis tulemusele. Lahjendus tehti vastavalt Stobbe (1964) poolt välja töötatud põhimõttele, et muda lõplik settimismaht oleks esialgselt mahust väiksem kui 25% ehk ligikaudu 200 ml/l kohta [22]. Settimistest viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 14702-1:2006 [59].

Settimismahu tulemuse põhjal arvutati välja lahjendatud mudaindeks, mis näitas ühe grammi reoveesette poolt hõivatud ruumala milliliitrites pärast 30 minutulist settimist [60]. Saadud

tulemuse põhjal on võimalik hinnata aktiivmuda settimist suurepäraseks (0-45 ml/g), heaks (45-95 ml/g), kehvaks (95-165 ml/g), halvaks (165-215 ml/g) või väga halvaks (üle 215 ml/g) [61]. Arvutamiseks kasutati valemit [59]:

$$DSVI = \frac{SV_{30}}{SS} \quad (2.4)$$

kus, DSVI - lahjendatud mudaindeks, ml/g,
SV₃₀ - reoveesette maht pärast 30 minutilist settimist, ml/l,
SS - sette tahke aine kontsentratsioon, g/l.

2.3.4 Filtreerimistest

Filtreerimistest näitab reoveesette vedeliku eraldumise kiirust, mille põhjal on võimalik hinnata tahkeaine kontsentratsiooni mõju saadud tulemusele. Testi üldpõhimõte seisneb reoveesette surumises läbi filterpaberi rakendades rõhku, mille tulemusena jääb tahke aine filtri pinnale takistades vedeliku läbivoolu. Testi läbiviimiseks valati Buncher lehrtrisse 200 ml reoveesetet, mis filtreeriti läbi 11 µm poorisuurusega filterpaberi rakendades rõhku 510-515 mbar. Katse läbiviimise ajal mõõdeti stopperiga 100 ml filtraadi kogumiseks kulunud aega iga 10 ml tagant, algusega 30 ml. Proovi tulemus väljendati kolme katse keskmisena. Katse teostati vastavalt American Public Health Association 2710H meetoodika järgi. [60]

Katse tulemuses tehti korrelatsioon lähtuvalt reoveesette tahkeaine kontsentratsiooniga, kus filtreerimiseks kulunud aeg jagati läbi sette kuivainesisaldusega. Katse tulemus väljendab ühe grammi kuivaine filtreerimiseks kulunud aega. [60]

2.3.5 Pressikatse

Pressikatse tulemus väljendab reoveesette kuivainesisaldust pärast settest vabavee välja pressimist. Katseseade ehitati käesoleva lõputöö raames, et hinnata välja töötatud meetoodika tulemust. Katseseadme tööpõhimõte seisnes reoveesette rõhu all pressimises, kus rakendatav rõhk jäi vahemikku 5-6 baari, mis on sarnane lintfilterpressis kasutatavale rõhule. Ühtlane ja püsiv rõhk saavutatakse seadmes kompressori kasutamisega.

Katse läbiviimiseks kasutati eelnevalt konditsioneeritud muda, mille jaoks valmistati ette kolm erinevat 0,1% polümeerilahust, mis segati reoveesetega ning mille seast valiti pressikatse läbiviimiseks moodustunud muda flokkide tekke põhjal parim variant visuaalse vaatluse põhjal. Polümeeridest oli kasutusel kaks pulber polümeeri Superfloc C-496 HMW ja Zetag 8190 ning üks vedelpolümeer Magnafloc LT-7991 (50%). Pressikatses kasutatav reoveesette kogus oli vastavalt

sette kuivainesisaldusele 100, 50 või 12,5 ml, millele lisatava polümeerilahuse kogus arvutati samuti sette kuivainesisalduse kaudu. Enne sette katseseadmesse asetamist eraldati tahkeosa ja eraldunud vedelik üksteisest.

Katse viidi läbi kahes etapis, kus esmalt toimus reoveesette eelpressimine, kus kasutati filtermaterjalina riie-filter-riie kihti ning pressist väljunud muda kõrgus oli ligikaudu 1 cm. Sellele järgnes settekoogi pressimine, milles kasutati lisaks riide- ja filterkihile umbes 1 cm paksuseid majapidamispaberi kihte, et parandada väljapressitava vedeliku imavust. Lõplik settekoogi paksus oli kuni 0,3 cm ning etappide kestvus ligikaudselt 5-8 minutit. Reoveesetest eraldunud vedelik eraldus katseseadme all olevate avade ning filtermaterjalide kaudu. Pressikatse läbinud sette kuivainesisalduse leidmiseks kasutati niiskusemõõturit AND MS-70, kus proov kuumutati 105°C juures ning tulemus arvutati alg- ja lõppkaalu kaudu.

3 TULEMUSED

Peatükis tuuakse välja meetoodika kirjeldus, mille abil on võimalik määrata reoveesette vabavee sisaldust ning kirjeldatakse teostatud katsetuste tulemusi ja valiku põhimõtteid. Samuti antakse peatükis ülevaade võrdluskatsete kokkuvõtivatest tulemustest, mida põhjalikumalt käsitletakse analüüsi ja arutelu peatükis.

3.1 Meetoodika väljatöötamiseks läbiviidud parameetrite kirjeldus

Termogravimeetrilise analüüsi kaudu leitava vabavee sisalduse lõpp-punkti meetoodika leidmiseks teostati kääritatud mudaga kokku 24 katset. Meetoodikate omavaheliseks võrdlemiseks analüüsiti nendest 18 katset, millest üheksa teostati reoveesette vedelas olekus ja teised üheksa eelnevalt filtreeritud pool-tahke settega. Ülejäänud viis katset viidi läbi filtreeritud settega, mis olid tahkes olekus. Katsed viidi läbi niiskusemõõturiga AND, kus kuivamisprotsess toimus konstantsetes tingimustes.

Parima meetodi välja selgitamiseks teostati katsed kasutades erinevaid algkontsentratsioone, andmete registreerimise intervalli, kuivatamis temperatuuri ja vabavee sisalduse punkti leidmiseks rakendatavaid valemid. Eelnimetatud parameetrite kirjeldused on esitatud järgnevatel punktides. Katsete põhjal leiti väikseima standardhälvega meetoodika. Järgnevas tabelis on esitatud teostatud katsete keskmised näitajad, kus meetoodikate poolt kuvatud tulemus väljendab punkti, millal reoveesetest saab otsa vabavesi (Tabel 3.1). Kõrgema näitaja korral sisaldab reoveesete vähem vabavett.

Tabel 3.1 Kääritatud mudaga teostatud katsete keskmised väärtused

Parameeter	Ühik	Vedelas olekus sette kuivatamine	Filtreeritud sette kuivatamine
Katsete arv	tk	9	9
Katse läbiviimise temperatuur	°C	40	40
Keskmine proovi kogus	g	4,1	1,4
Keskmine katse kestvus	min	235	113
Meetoodika 1 Standardhälve	%	31,0 6,8	31,5 18,4
Meetoodika 2 Standardhälve	%	32,5 2,4	31,5 3,8
Meetoodika 3 Standardhälve	%	31,0 2,6	30,0 1,7

3.1.1 Reoveesette olek

Katsete läbiviimisel katsetati kolme erineva niiskusesisaldusega sette kuivatamist. Üheks oli otse katse, kus reoveesete pandi proovipannile vedelal kujul, teised kaks olid pooltahke ja tahkem sete, kus reoveesete eelnevalt filtreeriti vaakumi all erineva ajalise kestvusega (Joonis 3.1). Filtreerimise eesmärk oli eemalda settest vaba vett, mis aitas lühendada katse läbiviimiseks kuluvat aega. Filtreeritud sette korral oli katse kestvus umbes kahe tunni võrra lühem kui reoveesette otsesel kasutamisel.

Samas tuli arvestada, et liigne filtreerimine võib eemaldada settest liiga palju vett, mis lühendab kuivamisgraafikut sedavõrd, et määratav lineaarne sirge jääb liialt lühikeseks ning selle põhjal ei ole võimalik leida sette usaldusväärset vabavee sisaldust. Läbiviidud katsete põhjal võis järeldada, et optimaalne märg- ja kuivmassi suhe peaks algama vähemalt 8 g/g. Sellest madalamate väärtuste korral oli keskmine vabavee sisalduse punkt ebareaalselt kõrge ehk 47% (standardhälve 7,1%, punktid vahemikus 36,7-56,5). Pooltahke proovikorral oli keskmine märg- ja kuivmassi algsuhe 13 g/g, mille korral esines kuivamiskõveral vähem hajuvuspunkte kui lühema graafiku põhjal.

Reoveesete peaks konsistentsilt pooltahke proovi korral olema visuaalselt niiske, seda peaks olema siidjas ja pehme proovipannile laiali määrida. Piisava niiskusesisaldusega proov sarnaneb oma konsistentsilt pasteedi või kohupiima laadse toote koostisele. Liiga kuiva proovi võib ära tunda selle järgi, et seda on keeruline laiali määrida, muda hakkab määrimisel ülesse kaarduma ning kergelt peale vajutades võtab see konkreetsema vormi.



Joonis 3.1. Reoveesette vedel, pooltahke ja tahkema konsistentsiga proov (autori foto)

3.1.2 Muda kogus

Katsetes kasutatud kääritatud muda kogus oli 4-5 ml, mis pandi proovipannile otse või eelnevalt filtreerituna. Pool tahke katse korral sõltus muda kogus filtreerimisaja kestvusest ja rakendatavast rõhust. Katsete analüüsimise käigus selgus, et muda kaal võiks filtreeritud katse korral olla üle 1,5 grammi ja vedelal kujul vähemalt 4 grammi, kuna suurem kogus tagab esinduslikuma

mõõtmistulemuse ja täpsuse. Läbiviidud katsete põhjal oli näha, et väiksema proovikoguse korral oli vabavett settes 0,5-1,0% vähem.

3.1.3 Temperatuur

Katsete läbiviimisel teostati vedelal kujul reoveesette katsed kahe erineva temperatuuriga, milleks üks oli 30°C ja teine 40°C. Peamine erinevus katsete läbiviimisel seisnes katse ajalises kestvuses, kus madalamal temperatuuril teostatud katse kestis 7h 15min, mis oli üle poole võrra kauem kui 40°C juures teostatud katse. Leitud vabavee sisalduse punkti väärtus erines 0,5-1,0% ning sellest lähtuvalt teostati katsed 40°C juures.

3.1.4 Ajaline intervall

Andmete registreerimiseks katsetati nelja erinevat intervalli, milleks olid 1, 5, 10 ja 30 sekundit. Katsetamise tulemusena osutus parimaks variandiks 10 sekundiline intervall, kuna lühema intervalli järel oli punktide hajuvus suurem ning suurema ajavahe tagant olid registreeritud punktid liialt hõredalt, mis võis mõjutada lõpptulemust sõltuvalt registreerimishetke tulemusest. Näiteks jäi otsitavasse vabavee punkti vahemikku (4,0-1,5 g/g) ühe sekundi andmete registreerimise korral 269 andmepunkti, viie sekundi jooksul 331, kümne sekundi järel 167 ja 30 sekundi puhul 70. Töös kasutatud kümne sekundilise intervalli põhjal oli kuivamiskõvera graafiku põhjal selge määrata lineaarse regressiooni alg ja lõpp-punkti. Lisa 2 on esitatud erinevad intervalli põhiste graafikute joonised, kus on näha, et ühe ja viie sekundi intervalli korral moodustavad kõrvuti asetsevad punktiread ning kümne ja kolmekümne sekundi jooksul on selgemini eristatav graafikult kuivamiskõvera languspunkt (Lisa 2.1).

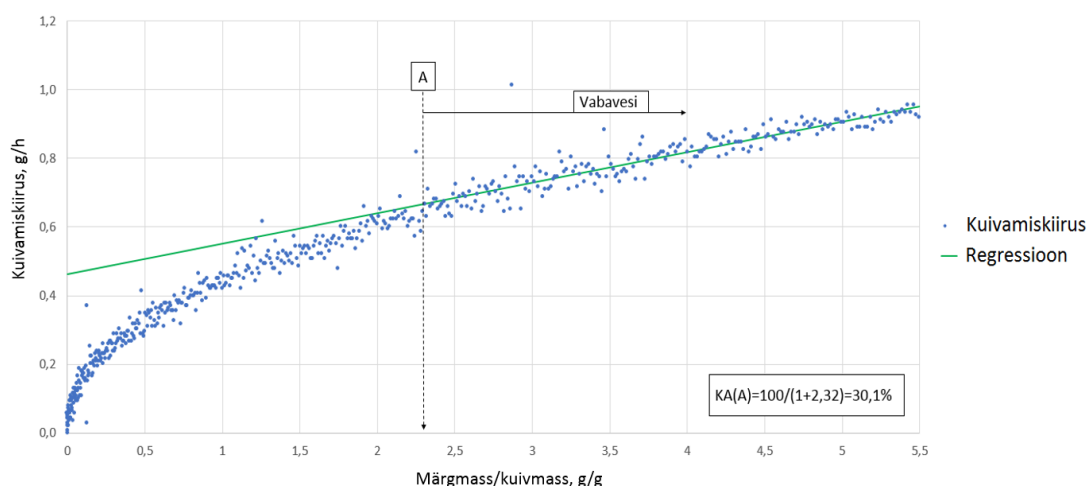
3.1.5 Vabavee sisalduse punkti määramise meetodikad

Vabavee sisalduse määramiseks tuli mõõteseadme poolt registreeritud andmed (aeg, niiskuse sisaldus, alg- ja lõppkaal) sisestada koostatud Exceli tabelisse, mis arvutas andmete põhjal kuivamisgraafiku ümber grammi põhiseks, leidis märg- ja kuivmassi suhte, kuivamiskiiruse ning erinevate parameetrite omavahelised seosed. Selle tabeli põhjal toimus edasine meetodikate rakendamine ja vabavee sisalduse lõpp-punkti arvutamine. Lõpp-punkt näitab kohta, kus reoveesetest saab otsa vabavee hulk ning kus kuivamiskõver hakkab oluliselt langema. Esialgselt oli kasutusel kolm erinevat meetodikat, mis igaüks leidis kõige suurema seosega punkti.

Meetodika 1 puhul oli kasutusel Pearsoni korrelatsioonikordaja, mis väljendas lineaarset seost märg- ja kuivmassi suhte ja kuivamiskiiruse vahel. Kõik näitajad jäid seal vahemikku -1 ja 1, kus positiivne väärtus näitas kasvavat seost tunnuste vahel [62]. Tulemuste põhjal leiti suurim väärtus

ehk tugevaim seos, mille kuvatud punkti põhjal arvutati välja reoveesettes oleva vabavee sisalduse lõpp-punkt. Antud meetodika oli tundlik erinevate kõikumiste suhtes, seega mõjutasid olulisel määral lõplikku tulemust ja keskmise kõverat mõõtmisperioodil registreeritud hajuvuspunktid. Meetodika rakendamisel jäeti andme analüüsist välja vedelal kujul katsete korral andmepunktid hetkeni, kui märg- ja kuivmassi suhte oli 9 g/g. Valiku põhjus seisnes erinevate katsete visuaalse hinnangu aluses, kus oli näha, et sirge jooksis sellest hetkest kuni kriitilise äralangemispunktini lineaarselt. Filtreeritud katsete korral jäeti välja esimese kümne minuti andmepunktid seoses kuivamiskõvera algusefaasiga.

Meetodika 2 ja 3 olid olemuselt sarnased ning seal fikseeriti konkreetne lineaarse regressiooni piirkond ehk määrati visuaalse vaatluse põhjal märg- ja kuivmassi suhte põhjal konkreetne algus ja lõpp punkt. Selles vahemikus võeti arvesse sinna jäävad punktid, mille põhjal joonistus lineaarne joon. Üldiselt jäi sirge määramise piirkond vahemikku 5,5 kuni 2,0 g/g. Sellest lähtuvalt ei võetud arvesse enne ja pärast neid punkte olevaid andmeväärtused. Meetodika rakendamisel joonistus sirge lõpust kujutatav joone pikendus, kust oli näha koht, kus sirgjoon enam kõverat ei puudutanud. Selle meetodi põhjal kasutati kahte erinevat meetodikat, millega otsiti kohta, kus teatud arv registreeritud punktidest jäid esimest korda allapoole lineaarset kõverat. Joonisel 3.2 on esitatud kuivamiskõvera ja lineaarse joone kaudu leitud vabavee punkt, mis leitakse välja töötatud Exceli kaudu (Joonis 3.2). Punktist A jääb paremale poole reoveesettes olev vaba vesi ning vaskakule see osa veest, mida mehaanilise veetustamise käigus ei ole võimalik settest kätte saada.



Joonis 3.2. Kääritatud muda kuivamiskõver ja vabavee punkti väärtuse leidmine (autori joonis)

Punkti A leidmiseks oli kasutusel kaks meetodikat, mis leiti ühe välja arvutatud seose alusel. Seose leidmiseks võeti arvesse kuivamiskiirust, märg- ja kuivmassi suhet, sirgjoone kaldenurka ja punktide lõikumiskohta. Leitud väärtused olid positiivsete või negatiivsete väärtustega.

Metoodika 2 korral vaadeldi väärtusi, mis olid väiksemad nullist nelja erineva andmelahtri põhjal, milleks olid 4, 6, 8 ja 10 järjestikkust punkti. Lähtuvalt negatiivsetest tulemustest saadi nendesse lahtritesse punktisumma, mille koondtulemuse põhjal leiti märg- ja kuivmassi suhte punkt, kus esines kõige rohkem järjestikkuseid negatiivseid väärtusi ehk punkte lineaarse joone all.

Metoodika 3 puhul võeti arvesse kümne sekundilise intervalli korral kümne järjestikkuse punkti väärtused, mille põhjal leiti arvud, mis olid 90% ulatuses väiksema väärtusega kui null. Selle metoodika põhjal oli samuti vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtuseks koht, kus esmakordselt olid kümnest punktist negatiivsed vähemalt üheksa väärtust. Töökäigus valiti usaldusväärse punktide arvuks 90%, kuna selliselt ei mõjuta tulemust lõpus esineda võivad üksikud hajuvuspunktid.

3.2 Erinevate mudade võrdluskatsete tulemused

Pärast metoodika väljatöötamist teostati viie erineva mudaga neli reoveesetet iseloomustavat analüüsi ning viidi läbi vähemalt viis samades tingimustes katset niiskuseanalüsaatoriga. Lisaks teostati iga mudaga pressikatseid, et hinnata saadud tulemuste kokkulangevust. Katsete läbiviimisel kasutatavad mudad olid kõik erinevate omadustega ning nende parameetrid on välja toodud allolevas tabelis (Tabel 3.2). Välistelt omadustelt olid segamuda (muda A) ja kääritatud muda (muda C) teistest muda liikidest tunduvalt paksema koostisega ning tumedama värvusega. Konsistentsi poolest erines teistest piimatööstuse muda (muda D), mis oli pärast filtreerimist geeljas mass, mida ei olnud võimalik proovipannile määrada, vaid tuli asetada sinna terve tükina.

Tabel 3.2 Reoveesetet kirjeldavate parameetrite tulemused

Parameeter	Ühik	Muda A	Muda B	Muda C	Muda D	Muda E
Sette kuivainesisaldus	%	4,1	1,5	3,9	0,5	0,7
Sette kuivainesisaldus	g/l	38,7	14,9	37,1	3,8	7,3
Orgaanilise aine sisaldus	%	72,8	66,9	60,9	57,2	62,9
Põletusjääk	%	27,2	33,1	39,1	42,8	37,1
Lahjendatud mudaindeks	ml/g	67,3	79,4	53,9	192,0	75,2
Filtreerimiskiirus	sek	1472,7	106,3	2181,3	54,8	77,3
Filtreerimiskiirus	g sek/l	41,8	7,5	58,8	10,5	10,6

Termogravimeetrilise meetodi põhjal teostatud katsete korral määrati kõigi kolme metoodikaga reoveesettes oleva lõpp-punkti väärtus, et hinnata tulemuste erinevust ja metoodika sobilikkust mudaliikide kaupa (Tabel 3.3). Teostatud katsete põhjal oli näha, et madalaima standardhälbe (väärtused 0,02-2,0%) metoodika oli kõigi viie mudaliigi korral metoodika 3. Saadud tulemuste korral oli muda A ja muda E korral võetud arvesse nelja katse tulemused seoses

ühe katse ebaõnnestumisega (lühike kuivamisköver). Muda D korral oli meetodika 1 tulemuse korral võetud arvesse kolme katse tulemused, seoses ülejäänud kahe katse saavutatud punkti väärtuse ebareaalne tulemuse tõttu (100%), mis oli tingitud väga kõrgete ja paljude hajuvuspunktide esinemisega (Lisa 2.2).

Tabel 3.3 Termogravimeetrilise meetodi kaudu leitud vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtused

Parameeter	Ühik	Muda A	Muda B	Muda C	Muda D	Muda E
Katse arv	tk	4	7	5	5	4
Metoodika 1	%	49,0	42,5	44,92	48,0*	47,6
Standardhälve		6,3	14,6	14,1	16,6	6,4
Metoodika 2	%	32,0	28,7	31,7	30,0	26,4
Standardhälve		1,6	1,8	4,3	3,6	1,5
Metoodika 3	%	31,8	28,9	29,8	26,7	26,2
Standardhälve		1,6	0,8	0,7	2,0	1,5

*kolme katse keskmine tulemus

Termogravimeetrilise meetodi kaudu saavutatud tulemuste kokkulangevuse hindamiseks teostati pressikatsed, mille tulemuste standardhälve oli vahemikus 0,1-2,4%. Järgnevas tabelis on välja toodud pressikatse teel saavutatud vabavee sisalduse lõpp-punkti ja standardhälbe tulemused (Tabel 3.4). Kõik pressikatsed viidi läbi polümeeriga Superfloc C-496HMW.

Tabel 3.4 Pressikatsega teostatud katsete tulemused

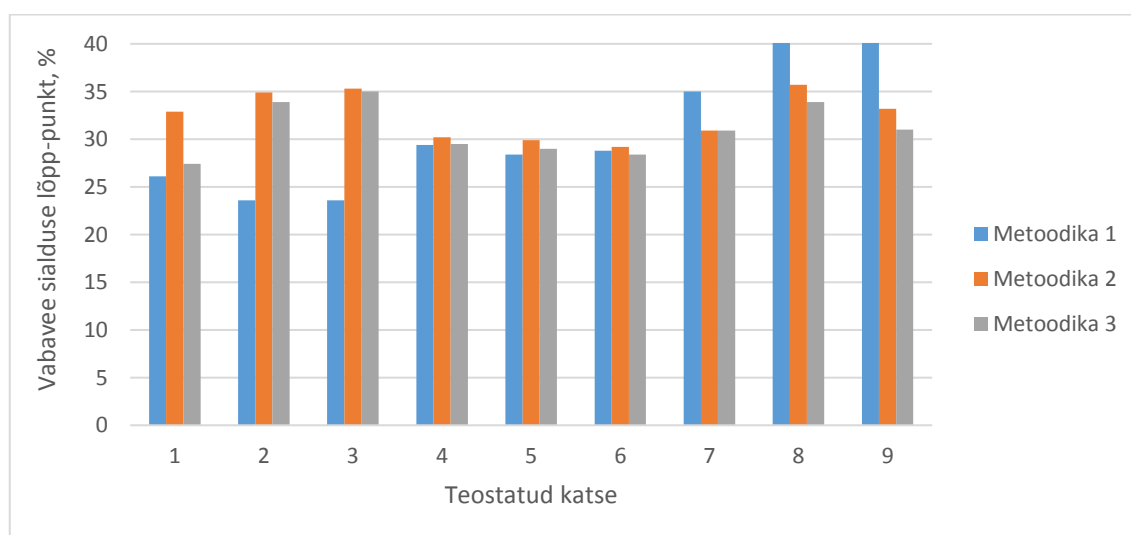
Parameeter	Ühik	Muda A	Muda B	Muda C	Muda D	Muda E
Katsete arv	tk	5	3	5	2	5
Pressikatse tulemus	%	33,2	29,6	32,4	27,8	27,7
Pressikatse standardhälve	%	0,7	0,1	2,4	1,0	1,4
Pressikatse ja KA(A) vahe	%	1,4	0,7	2,6	1,1	1,5

4 ARUTELU

Peatükis analüüsitakse väljatöötatud meetodika tulemuste erinevust ja pressikatse tulemustega kokkulangevust, hinnatakse saavutatud vabavee sisalduse lõpp-punkti sõltuvust sette parameetritega ning võtab kokku Eesti reoveepuhastusjaamade kasutamata potentsiaali seoses vabavee sisaldusega settes.

4.1 Tulemuste analüüs ja järeldused

Uurimuse käigus rakendatud meetodikatest parima välja selgitamiseks võrreldi omavahel vedelal ja filtreeritud kujul teostatud katsete saavutatud vabavee sisalduse väärtuseid. Vedelal kujul läbiviidud katsete korral oli selgelt näha, et meetodika 1 rakendamise korral oli tulemuste varieeruvus kõige suurem ning selle standardhälve oli 6,8%. Meetodikatega 2 ja 3 leitud väärtused olid stabiilsemad ning nende standardhälve erinevus oli teineteisest 0,2%. Järgneval joonisel on näha, et meetodikaga 2 saavutatavad vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtused on üldiselt kõrgemad kui meetodikaga 3 saavutatavad tulemused (Joonis 4.1). Keskmise tulemuse põhjal oli nende kahe väärtuste erinevus 1,5%. Vedelal kujul teostatud katse korral osutus parimaks meetodikaks 2, mille standardhälve oli 2,4%.

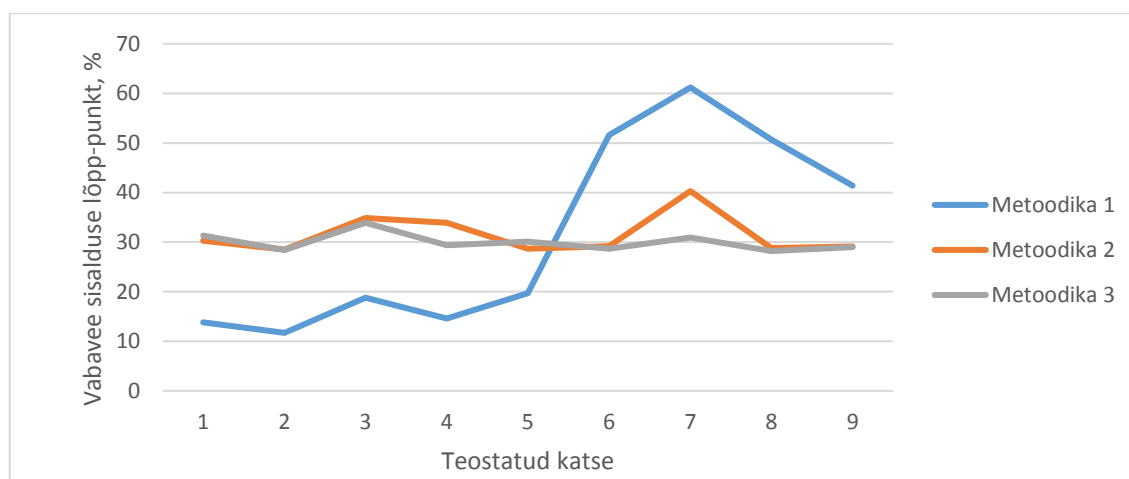


Joonis 4.1 Vedelal kujul teostatud katsete tulemused meetodika põhisel (autori joonis)

Sarnaselt vedelal kujul teostatud katsetele oli ka eelnevalt filtreeritud katsete läbiviimisel meetodika 1 kõige suurema standardhällbega (18,4%), kuid siin olid saavutatud tulemused väga kõrge või väga madala väärtusega. Samuti oli suurem erinevus meetodika 2 ja 3 vahel, kus meetodika 2 standardhällbe väärtus oli umbes poole kõrgem kui meetodika 3 tulemus. Kuid tegelikkuses mõjutas selle tulemust üks oluliselt kõrgem katsetulemus, mille puudumisel oleks

olnud standardhälve 2,3% (Joonis 4.2). Kuid sellegipoolest näitas kõige ühtlasemaid tulemusi meetoodika 3, mille standardhälve oli 1,7% (väärtused vahemikus 28,3-33,9). Seega osutus parimaks katse meetodiks eelnevalt filtreeritud katse, mille üheks suureks eeliseks oli ka katse lühem ajaline kestvus, mis suurendas ühel päeval teostavate katsete arvu.

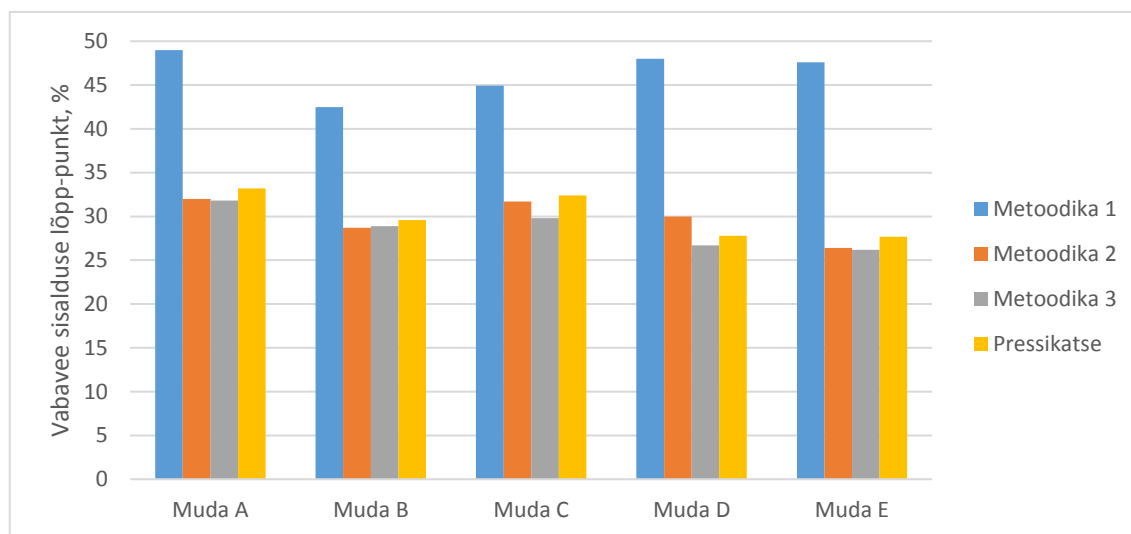
Metoodikate põhise võrdluse tulemusena oli meetoodikaga 3 saavutatavad väärtused väiksemate kõikumistega ja ühtlasemad mõlemal viisil teostatud katsete läbiviimisel ning nende omavaheline kokkulangevus hea. Võrreldes omavahel vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtuseid oli näha, et meetoodikaga 3 olid saavutatud tulemuste erinevus kolme katse korral teineteisest 3,9-5,7% ning kuue katse korral olid erinevus nende keskmisest väärtusest vaid 0,8%. Seevastu meetoodikaga 2 oli kuue katse tulemuse erinevus 2,6-9,4% ning meetoodikaga 1 erinesid punkti väärtused kaheksal korral teineteisest 4,8-26,2%. Metoodikate omavahelise võrdluse joonised on esitatud lisas 3. Lisaks oli analüüsi põhjal näha, et eelnevalt filtreeritud katsete korral oli meetoodikatega 2 ja 3 saavutatavad vabavee sisalduse väärtused 1% võrra väiksemad kui vedelal kujul teostatud katsetel.



Joonis 4.2 Eelnevalt filtreeritud kujul teostatud katsete tulemused meetoodika põhiselt (autori joonis)

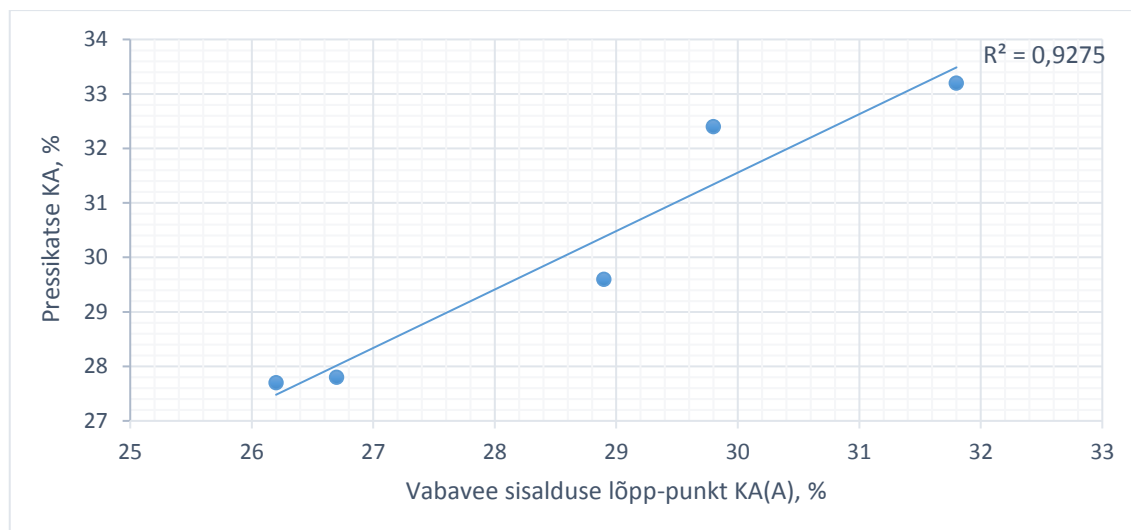
Metoodika 3 rakendamise sobilikkust kinnitasid ka viie erineva mudaga teostatud katsete tulemused, kus selgus, et meetoodika sobib nii olmereovee kui ka uuritud tööstusreevee vaba vee sisalduse lõpp-punkti määramiseks. Omavahelise võrdluse tulemusena oli selgelt näha, et meetoodika 1 ei ole sobilik otsitava punkti määramiseks, kuna selle väärtused erinesid olulisel määral ning meetodi maksimaalne standardhälve oli 16,6%. Seevastu meetoodikatega 2 ja 3 saavutatud tulemuste standardhälve erinevus oli segamuda (muda A) ja toiduõlitööstuse muda (muda E) korral vaid 0,2%. Suurem erinevus oli meetoodika 2 ja 3 vahel jääkaktiivmuda (muda B), kääritatud muda (muda C) ja piimatööstuse muda (muda D) korral, kus standardhälvete erinevus oli vastavalt 1,0%, 3,6% ja 1,6%. Piimatööstuse mudaga saavutatud väärtuste vahe võis tuleneda sellest, et muda erines filtreeritud olekus teistest mudadest ning kuivamiskõveral esines rohkem hajuvuspunkte.

Selle põhjal võis järeldada, et rohkemate hajuvuspunktide korral oli meetodikaga 2 saavutatav lõpp-punkti väärtus suurem ning kuivamisprotsess oli ühtlasem kui meetodikatega 2 ja 3 saavutatavad tulemused langevad omavahel paremini kokku. Erinevate mudaliikidega teostatud katsete meetodika ja vabavee sisalduse väärtused on esitatud lisa 4. Järgneval joonisel on välja toodud erinevate mudaliikide ja meetodikatega saavutatavad vabavee sisalduse lõpp-punkti ja pressikatse teel saadud kuivainesisalduse keskmised väärtused (Joonis 4.3). Pressikatsete põhjal hinnati erinevate meetodikate teel saavutatud vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtuse kokkulangevust.



Joonis 4.3 Saavutatud vabavee sisalduse lõpp-punkti ja pressikatse väärtused mudaliikide ja meetodikate kaupa (autori joonis)

Pressikatse ja niiskuseanalüsaatoriga teostatud katsed erinesid sellepoolest, et pressikatses sidus polümeer settes oleva vee välja, kuid kuivatamisprotsessis vesi aurustus välja. Saadud tulemuste põhjal võis järeldada, et katsetulemuste omavaheline erinevus oli 0,7-2,6%, mille põhjal võis eeldada, et erinevate meetoditega saavutatud tulemused võiksid jääda standardhälve ulatuse piirkonda. Termogravimeetrilise meetodiga teostatud katse standardhälve oli maksimaalselt 2,0% ning pressikatsel 2,5%. Pressikatses saavutatud tulemused olid stabiilsemad jääkaktiivmudaga katsete läbiviimisel ning suurema varieeruvusega olid tulemused segamuda ja kääritatud muda katsete korral (katsete põhised tulemused on esitatud lisa 4). Saavutatud tulemuste põhjal oli võimalik järeldada, et pressikatse ja meetodikaga 3 leitud vabavee sisalduse väärtus oli tugeva seosega, kuna selle korrelatsioonikordaja oli 0,9275 (Joonis 4.4). Korrelatsioonikordaja korral on seos seda tugevam, mida lähemal on selle väärtus arvule üks.



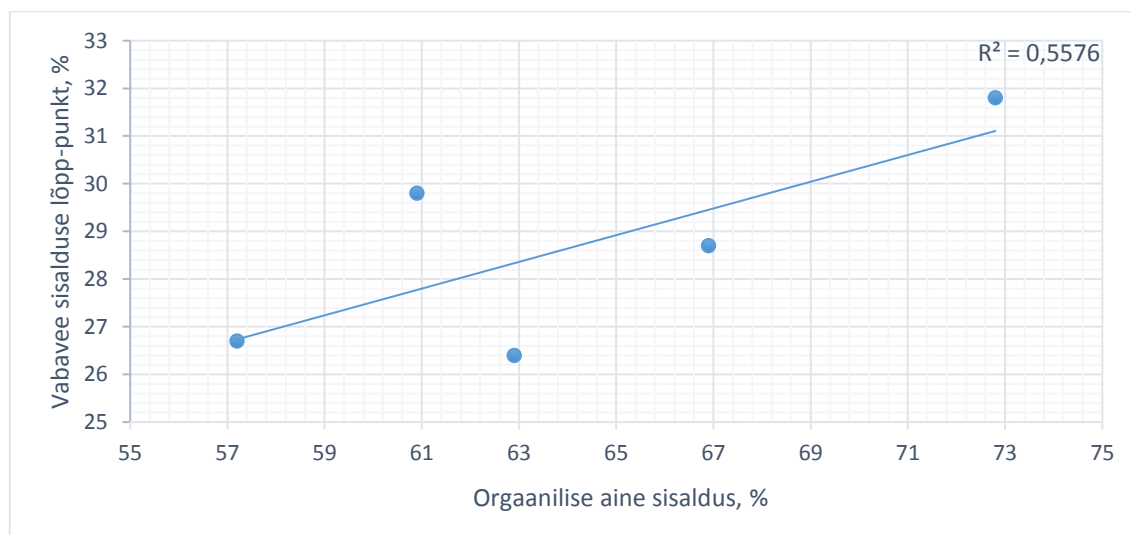
Joonis 4.4 Niiskuseanalüsaatoriga ja pressikatses teel leitud vabavee sisalduse lõpp-punkti korrelatsioon (autori joonis)

Läbiviidud katsete põhjal selgus, et uuritud mudaliikidest sisaldas kõige rohkem vabavett toiduõli- ja piimatööstuste jääkaktiivmudad, mille vaba vee sisaldused olid vastavalt 73,8% ja 73,3%. Sellele järgnesid olmereoveepuhastusjaama jääkaktiivmuda (71,3%), kääritatud muda (70,2%) ning kõige vähem sisaldas vaba vett segamuda (68,2%). Seega olid leitud väärtuste põhjal madalaima ja kõrgeima vabavee sisalduse vahe 5,4%. Samuti võib välja tuua, et rohkem vabavett sisaldasid jääkaktiivmudad, mille puhastusprotsessi mudavanus oli suurem.

Settes oleva vabavee sisaldus sõltus reoveesette parameetritest, milleks olid kuivaine- ja orgaanilise aine sisaldus. Vaadates lähemalt algkuivainesisaldust ja vabavee väärtust oli näha, et rohkem vabavett sisaldasid madala kuivainesisaldusega jääkaktiivmudad, mis koosnesid väiksematest helvestest ning mille kuivainesisaldus jäi vahemikku 0,5-1,5%. Tööstusreoveed sisaldasid vähem tahkeid aineid, kuna nende puhastusprotsess on üldiselt stabiilsem ning sinna ei jõua üldiselt suuremat prahti nagu olmereoveepuhastusjaamas. Kõige väiksema vabavee sisaldusega oli segamuda, mis koosnes lisaks jääkaktiivmudale eelsetiti käigus eemaldatud suurematest osaketest ning mille kuivainesisaldus oli 4,1%. Kuigi algkuivainesisalduse ja vabavee väärtuse põhjal oli korrelatsioonikordaja 0,8773 oli antud seos juhuslik, kuna sette kontsentratsioon sõltub mitmetest kõrvalistest asjaoludest ning üldiselt ei iseloomusta kuivainesisaldus muda täielikult.

Settes oleva orgaanilise aine sisalduse põhjal võis järeldada, et kõrgema orgaanilise aine sisaldusega settes oli vabavee sisalduse hulk väiksem ning lõpp-punkti väärtus suurem. Kõige rohkem sisaldas orgaanilist ainet segamuda (73%) ning kõige vähem piimatööstuse protsessimuda (57%) ja kääritatud muda (61%). Seoses orgaanilise aine ja põletusjäägi omavahelise seosega oli põletusjäägi ja vabaveehulga vahel teistpidine seos ehk kõrgema põletusjäägi väärtuse korral oli settes ka rohkem vabavett. Põletusjäägi ja orgaanilise aine sisalduse vahel olid korrelatsioonikordajad

vastavalt 0,6062 ja 0,5576. Antud kordajate põhjal võis järeldada, et orgaanilise aine sisaldusel oli veidi väiksem seos settes oleva vabavee saavutatava väärtusega, kuid mõlema parameetri seos oli keskmise juures (Joonis 4.5). Vaadeldes omavahel üksnes jääkaktiivmudade korrelatsioonikordajat oli see 0,766, mis näitas et ühte liiki mudade vahel esines tugevam seos.

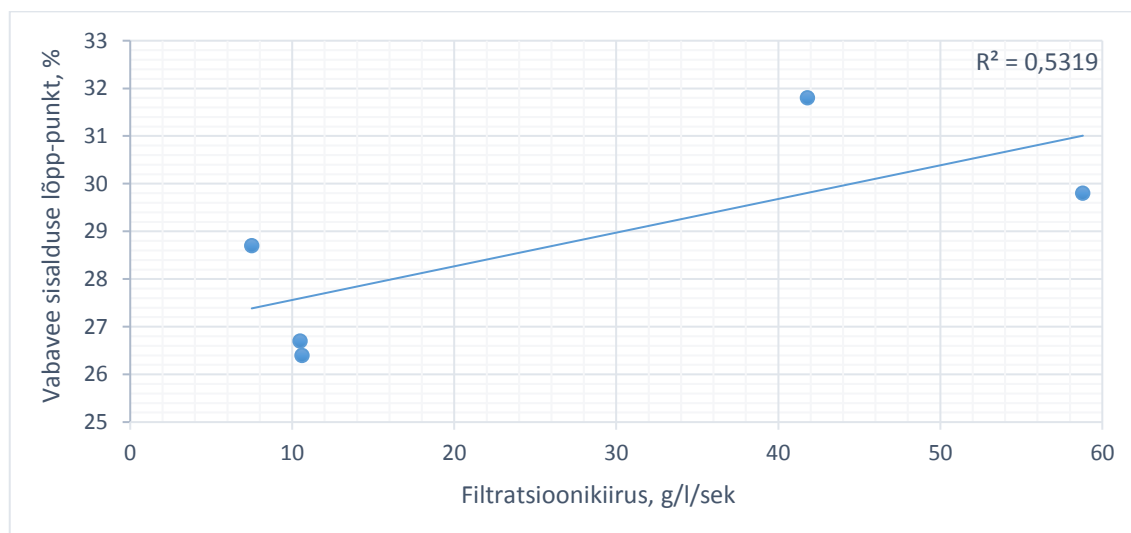


Joonis 4.5 Orgaanilise aine sisalduse ja vabavee sisalduse lõpp-punkti korrelatsioon (autori joonis)

Eelnevatest parameetritest olid üldjoontes sõltuvuses ka filtreerimis- ja settimistesti tulemused, kus tugevalt madalama kuivainesisaldusega sette filtreerimiskiirus oli kiirem ning mudaindeks kõrgema väärtusega (halvem settivus).

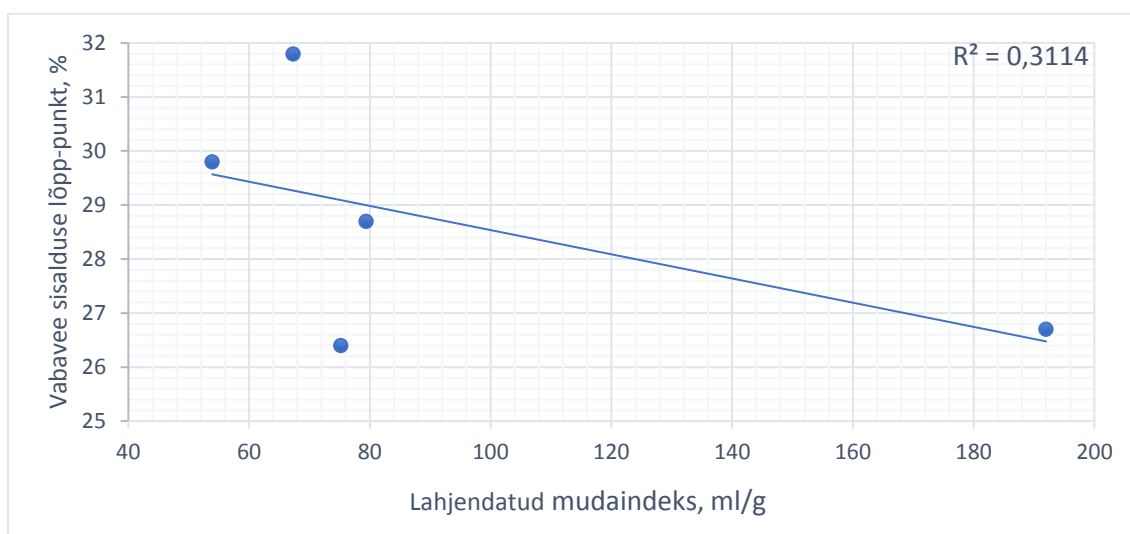
Filtreerimiskiiruse ja settes oleva vabavee hulga vahel oli näha, et tunduvalt aeglasema filtreerimiskiiruse korral oli sette vabaveehulk väiksem. Seevastu olmereoveepuhastusjaama jääkaktiivmuda korral oli filtreerimiskiirus kiirem, kuid vabavett sisaldas see vähem kui tööstus reoveesetted. Selle põhjal võis järeldada, et olmereoveepuhastusjaama jääkaktiivmuda sisaldas palju kolloidseid osakesi, mille suurus oli väiksem kui 11 μm , mis läbisid katses kasutatud filtri poorid kiiresti. Seevastu tööstusmudad sisaldasid sarnase suurusega reoveesette osakesi, kuna nende filtratsioonikiirus oli väga väikse erinevusega. Kuna veetustamise tulemust mõjutavad enim 1-100 μm suurusega osakesed, siis sellest lähtuvalt võis eeldada, et jääkaktiivmudade tulemused sõltusid sellest, millise suurusega osakesed settes olid. Kuigi olmereovee jääkaktiivmuda filtratsioonikiirus oli kõige kiirem oli muda saavutatav vabavee sisalduse hulk madalam kui tööstusmudadel (3 sekundit kiirem, 2% väiksema vabavee sisaldusega). Sellest tulenevalt võis järeldada et vabavee sisaldust settes mõjutasid suured tahked osakesed, mis ummistasid filtreerimiskatsel kasutatava filterpaberi kiiresti ning põhjustasid madalamat filtraadi läbilaskevõimet kui ka jääkaktiivmudade puhul kolloidsete osakeste suurus, kus silmale nähtamatute osakeste rohkus alandas settes oleva vabavee hulka. Filtreerimistesti ja vabavee

sisalduse korrelatsioonikordaja oli 0,5319, mis näitas kahe tunnuse omavahelise seose tugevuseks keskmine (Joonis 4.6). Sarnaselt eelnevale oli ka siin korrelatsioonikordaja jääkaktiivmudade korral parema näitajaga ning sellepõhjal võis järeldada, et suurem omavaheline seos esines sama liiki mudade vahel ning filtreerimiskiiruse põhjal oleks võimalik hinnata reoveesette veetustamise taset.



Joonis 4.6. Filtratsioonikiiruse ja settes oleva vabavee hulga korrelatsioon (autori joonis)

Settimestesti tulemuste põhjal oli näha, et jääkaktiivmudade indeksid olid kõrgema väärtusega ehk halvema settivusega kui kääritatud muda ja segamuda näitajad. Seega tulemuste põhjal oli võimalik üldistatult järelda, et vabavett sisaldavad vähem setted, millel olid head settimisomadused ja suurem kuivainesisaldus. Lahjendatud mudaindeksi ja settes oleva vabaveesisalduse vahel oli korrelatsioonikordaja 0,3114, mis näitas et mudaindeks ei ole hea parameeter iseloomustamiseks muda veetustamist.



Joonis 4.7 Lahjendatud mudaindeksi ja settes oleva vabavee hulga korrelatsioon (autori joonis)

Läbiviidud katsete põhjal selgus, et Eesti reoveepuhastusjaamades jääb settesse küllaltki suur hulk vabavett ning saavutatud tulemused olid tunduvalt madalamad. 2015. aastal läbiviidud uuringu põhjal oli reoveepuhastusjaamade keskmine kuivainesisaldus 19,8% ja anaeroobselt stabiliseeritud sette korral 24,3%. Praktilise töö raames leitud tulemuste põhjal oleks saavutatavad kuivainesisaldused olmereoveepuhastusjaamades segamudal 31,8%, jääkaktiivmudal 28,7% ja kääritatud mudal 29,8%. Seega hinnanguliselt jäi settesse 6-10% liigset vabavett. Toiduainetööstused näitasid sarnast tulemust, kui 15 tööstuse poolt saavutatud keskmine kuivainesisaldus oli 14,5%, kuid töös uuritud kahe toiduainetööstuse sette saavutatav kuivainesisaldus oli 26,5% [47]. Selle põhjal võis üldistatult järeldada, et sette käitluses on selles valdkonnas suhteliselt suur kasutamata potentsiaal, kus vabavett jääb reoveesettesse ligikaudu 10%.

Eesti reoveepuhastusjaamad kasutavad settest vee eemaldamiseks 68% dekantertsentrifuuge, mille võimalik saavutatav kuivainesisaldus oleks 15-30%. Kuid saavutatav keskmine tulemus oli suurtel jaamadel 21% ja keskmistel jaamadel 20%. Lintfilterpresside ja kruvipresside võimalik saavutatav kuivainesisaldus kuni 35%, aga saavutatud keskmised tulemused olid suurte jaamadel vastavalt 14% ja 19% [39]. Seevastu keskmise suurusega jaamadel olid saavutatavad keskmised kuivainesisalduse väärtused erinevate seadmete löikes sarnases vahemikus (18-20%). Võttes aluseks veetustamise liigituse on Eesti jaamades saavutatav keskmine kuivainesisaldus kehv (18-20%) ning metaantankiga jaamades keskmine (vahemik 22-26%) [63].

Saadud tulemuse põhjal oleks reoveepuhastusjaamades võimalik vähendada settes oleva vabavee sisaldust, millega kaasneksid mitmeid eeliseid lisaks sette mahu vähendamisele, mis peamiselt oleksid sõltuvad reoveepuhastusjaama sette käitlemisviisist. Üldiselt on keeruline hinnata rahalises väärtuses, kui palju kasu reoveepuhastusjaamad sette veesisalduse vähendamisega saaksid, kuna selle protsessi hind sõltub mitmetest aspektidest, näiteks sette edasisest kasutusvaldkonnast, transpordivajadusest, kasutatavast tehnoloogiast, tugimaterjalist, polümeeri kogusest jne. Näiteks on Eestis olevate reoveepuhastusjaamade aastane settekäitlusele minev kulu Pärnus 101 000 €, Kuressaares 132 000 € ja Viljandis 141 000 € ning saavutatud kuivainesisaldused olid neil järgnevad 22%, 24% ja 13%. Aastas tekkiva sette koguse hindamiseks võib välja tuua, et Tartu reoveepuhastusjaamas tekib ligikaudselt 9700 m³ reoveesetet. [47]

Reoveepuhastusjaamadest võiksid kasu saada need jaamad, kes annavad puhastusprotsessis tekkiva sette üle jäätmekäitluskeskustele. Sellisel juhul maksavad reoveepuhastusjaamad sette iga üleantava ja transporditava sette tonni eest. Näiteks transpordib Rakvere reoveepuhastusjaam tekkiva sette jäätmekeskusele, kes võtab iga tahendatud sette tonni eest 22 € ning lisaks kuue

kilomeetrise pikkuse teekonna transpordi eest 2 €/tonn. Sellest kõrgemat hinda maksab näiteks Haljala puhastusjaam, kelle tasu üleantava sette tonni eest oli 33 eurot. Lisaks võiksid kasu saada ka reoveepuhastusjaamad, kes kompostivad setet kohapeal, sest ühe kuupmeetri sette tahendamiseks tehtavad kulutused olid Keila reoveepuhastusjaama näite põhjal 52 €/tonn, millest moodustas trummelkompostimine 36,1 €. [47].

Seega väga üldise kalkulatsiooni põhjal, kui Eestis oleks 2016. aastal eemaldanud settest 5% rohkem vabavett oleks tekkinud settekogus olnud ligikaudu 900 tonni vähem, mille põhjal oleks Eesti reoveepuhastusjaamade kogu settekäitluskulud olnud Rakvere näite põhjal sette üleandmisel umbes 22 000 € võrra väiksemad ning Keila näite põhjal sette kompostimiseks tehtavate kulutuste põhjal 47 000 € võrra ulatuses madalamad. Lisaks kulutustele võiks reoveepuhastusjaamade saadav kasu olla informatiivne, et teostada tasuvusanalüüsi hindamiseks settest rohkema vee eemaldamise kasumlikkust.

4.2 Soovitused ja ettepanekud

Käesoleva töö tulemuste ja kirjanduse ülevaate põhjal on töö autori soovitused meetodika rakendamisel järgmised:

- segada reoveesette enne proovi kasutamist, et tagada proovi ühtlus;
- eemaldada settest vabavett filtreerimise teel, valides sette koguse vastavalt selle kuivainesisaldusele (kääritatud muda 5 ml, segamuda 8 ml ja jääkaktiivmudad 16 ml);
- tagada reoveesette eelneval filtreerimisel selle piisav niiskusesisaldus;
- kasutada proovikogusena vähemalt 1,5 grammist reoveesette kogust;
- määrada proovipannile reoveesette kogus tasase kihina tagamaks sette ühtlase kuivamise;
- teostada niiskuseanalüsaatoriga katse maksimaalselt 40°C juures;
- kasutada selgema graafiku saamiseks andmete registreerimist iga kümne sekundi tagant;
- katsete läbiviimisel kasutada meetodikat 3, mis põhineb lineaarse regressiooni põhjal otsides punkti, kus esimest korda on 90% punktide allpool sirget;
- korrata ühe mudaga tehtavaid katseid vähemalt viis korda kokkulangevuse hindamiseks;
- katse tulemuste usaldusvääruse kontrollimiseks teostada paralleelselt pressikatsed.

Edasiseks uurimisvõimaluseks on teostada välja töötatud meetodika põhjal rohkem katseid, mis näitavad meetodika järjepidevust ning erinevate parameetrite sõltuvust saavutatavale veetustamise tulemusele. Samuti analüüsida Eesti reoveepuhastusjaamade veetustamise tasemeid, vabavee sisalduse lõpp-punkte ning sellega seotud kulusid.

5 KOKKUVÕTE

Reoveepuhastusjaamas on settekäitlus igapäevane protsessi osa, mille käigus vähendatakse sette mahtu, et soodustada selle ladustamist, alandada kõrvaldamise kulusid ja parandada käitlemistingimusi. Vee eraldamiseks tahkest ainest on kasutusel erinevaid tehnoloogiad, millest Eestis kasutatakse kõige enam dekantertsentrifuuge, lintfilterpresse ja kruvipresse, mille saavutatav kuivainesisaldus on kuni 35%. Seoses sette koostise varieeruvusega sõltub selle veetustamise tulemus mitmetest parameetritest, näiteks osakeste suurus, tahkete ja orgaaniliste ainete sisaldus ja vee jaotus. Viimast on võimalik leida mitmete meetoditega, näiteks sette külmumisomaduste, rõhu rakendamise, tsentrifugaaljõu kui ka kuivamise kaudu. Lõputöö käigus kasutati termogravimeetrilisel analüüsil põhinevat meetodit, kus tulemus leiti kuivamiskõvera analüüsi kaudu.

Katsed viidi läbi kahes osas, kus esmalt töötati välja meetoodika ning seejärel teostati korduskatsed viie erineva mudaga, et hinnata meetoodika sobivust erinevate mudaliikide korral. Töös käigus teostati katsed kolme olme- ja kahe toiduainetööstuse reoveesetega, mille vabavee sisalduse tulemuste erinevus oli umbes 5%. Töö käigus teostati kokku 49 katset niiskuseanalüsaatoriga ja 21 pressikatset. Kõige rohkem vabavett sisaldasid jääkaktiivmudad (kuivainesisaldus 26-29%) ning sellele järgnesid sega- ja kääritatud muda (kuivainesisaldus 30-32%). Seega oli vabavee sisaldus reoveesetetes 68-74%.

Lõputöö käigus töötati välja meetoodika, mis määras reoveesettes oleva vabavee sisalduse lõpp-punkti andmetöötlusprogrammis leitava suhte põhjal. Selleks rakendati esialgselt kolme erinevat meetoodikat, mille seast leiti kõige väiksema standardhälbega meetod. Valitud meetoodika põhines kuivamiskõvera analüüsil, kus lineaarse sirge järgi leiti punkt, kus väärtused jäid esimest korda alla poole lineaarset sirget ehk muutusid negatiivseks võrreldes keskmise väärtusega. Töö raames välja töötatud meetoodika sobis nii olme- kui ka konkreetsete toiduainetööstuste reoveesette vabavee sisalduse määramiseks. Teiste kasutatud meetoodikate korral mängisid suuremat rolli hajuvuspunktid, mis mõjutasid saavutatavat lõpptulemust.

Katseks sobivate parameetrite leidmiseks viidi katsed läbi erinevates tingimustes, kus teostati katsed sette vedelas ja tahkes olekus, erineva ajalise intervalli tagant andmeid registreerides, erineval temperatuuril ja settekogusega. Parimaks tulemuseks osutusid katsed, mis teostati eelnevalt filtreeritud settega ning rakendades meetoodikat 3, mille standardhälve oli 1,7%. Teiste meetoodikatega saavutatud väärtuste standardhälve jäi vahemikku 2,4-18,4%. Viie erineva mudaga teostatud katsete korral oli meetoodikaga 3 saavutatud tulemuste maksimaalne standardhälve 2%

ning teiste meetodikatega olid need 4% ja 17%. Saadud tulemuste kokkulangevuse hindamiseks teostatud pressikatsete tulemused erinesid meetodikaga 3 leitud väärtustest 0,7-2,6%. Pressikatse ja meetodikaga 3 saavutatud vabavee sisalduste väärtuste korrelatsioonikordaja oli 0,9275, mille alusel on näha tugev seos kahe erineva mõõtmiskatse kaudu.

Settes oleva vabavee hulga väärtus sõltus sette orgaanilise aine ja kuivainesisaldusest, mis kõrgema väärtuse korral tähendas, et settes sisalduva vabavee hulk oli väiksem. Töös kasutatud reoveesetete kuivainesisaldused jäid vahemikku 0,5-4% ning orgaanilist ainet sisaldasid erinevad setted 57-73%. Reoveesettes sisalduva vabavee tulemuse vahel esines tugevam seos orgaanilise aine sisalduse, põletusjäägi ja filtreerimiskiirusega. Nende abil oleks võimalik üldiselt iseloomustada samaliiki mudatüüpide muda veetustamist. Seevastu nõrk seos esines muda settivusega.

Eestis 2015. aastal läbiviidud uurigu andmete põhjal oli 54% Eesti reoveepuhastusjaamade (üle 2000 ie) keskmine saavutatud sette kuivainesisaldus oli 19,8%, metaantankiga jaamades 24% ja toiduainetööstustes 14,5%. Läbiviidud katsete põhjal olid leitud vabavee sisalduse väärtused olmereoveepuhastusjaama segamudal 31,8%, jääkaktiivmudal 28,7%, kääritatud mudal 29,8% ning tööstumudadel 26,2% ja 26,7%. Seega katsete käigus saadud tulemuste põhjal võis järeldada, et reoveesettesse jäi umbes 6-10% vabavett. Hinnanguliselt kui reoveepuhastusjaamad oleks 2016. aastal eemaldanud reoveesetest 5% rohkem vett oleks tekkinud reoveesette kogus umbes 900 tonni vähem, mis oleks võinud jäätme keskusele sette üleandmisel kaasa tuua 22 000 eurose raha säästu ning kohapealse trummelkompostimisega oleks rahaline võit olnud 47 000 eurot. Seega võiks meetodika olla realselt kasutatav reoveepuhastusjaamades ning sellega leitava vabavee sisalduse määramine aitaks vähendada reoveepuhasti operaatoril kulusid settekäitlusele.

Koostatud töö põhjal võis järeldada, et vabavee sisalduse lõpp-punkti väärtus sõltus millisel viisil katsed teostati, milline oli tekkiv kuivamiskõver, kui palju sisaldas see hajuvuspunkte ning millist meetodikat rakendati. Töö põhjal selgus, et reoveesetega on mõistlik teostada mitmeid paralleelseid katseid seoses sette muutlikkusega. Lõputöö käigus loodud Excel on suhteliselt lihtne ja automaatne, kuid punkti määramisel mängib olulist rolli inimfaktor. Seega üheks edasiseks võimaluseks on muuta kasutatavat töölehte vähem isikust sõltuvaks.

6 SUMMARY

Sewage sludge treatment in the wastewater treatment plant is a daily part of the process, reducing the volume of sludge for better storage, lower disposal costs and improve operational conditions. Different technologies are used for separating water from solids, most of which are used in Estonia are decanter centrifuges, belt filter presses and screw presses with a dry matter content of up to 35%. Due to variability in sludge composition, the result of this dewatering depends on a number of parameters, such as particle size, solid and organic matter content and water distribution. The latter can be found by a variety of methods, including sewage sludge freezing properties, pressure application, centrifugal force and drying. During the thesis, a method based on thermogravimetric analysis was used, where the result was found on a drying curve.

The experiments were carried out in two parts where the methodology was first developed and then repeated tests were performed on five different sewage sludge to assess the suitability of the methodology for different types of sludges. Laboratory tests were carried out on wastewater treatment plant mixed sludge, waste activated sludge, digested sludge and two food industries activated sludges. In the course of the research, a total of 49 experiments were performed with a moisture analyzer and 21 press experiments. The test results showed that the activated sludge contained the most free water (dry matter content 26-29%) followed by mixed and digested sludge (dry matter content 30-32%). Thus, the free water content in sewage sludge was 68-74%.

In the final thesis, a methodology was developed to determine the end point of the free water content of the sewage sludge based on the ratio found in the data processing program. For this purpose, three different methodologies were initially applied, with the lowest standard deviation method being found. The chosen methodology is based on the drying curve analysis, where linear line is used to find a point where the values falls for the first time below the linear line. The methodology developed during the work was suitable for determining the free water content of both municipal and industrial sewage sludge. In the other methodologies used, scattering points played a greater role, influencing the final result to be achieved.

To find the appropriate test parameters, the experiments were performed out under different conditions, in which the tests were carried out in liquid and solid state of the sludge, recording data at different time intervals, temperature and sludge quantity. The best result was a test performed with a pre-filtered sludge using Method 3 with a standard deviation of 1,7%. The standard deviation of the values obtained by the other methodologies ranged from 2,4-18,4%. For tests with five different sludges, the maximum standard deviation of the results achieved by Method 3 was 2%

and with other methods 4% and 17%. In addition, press tests were carried out to evaluate the concordance of the results obtained, the results of which differed from the applied methodology by 0,7-2,6%. On the basis of the results obtained, it was concluded that the match was good (correlation coefficient 0,9275).

The free water content obtained was dependent on the content of organic matter and dry matter content of the sewage sludge, which, at higher values, meant that the sludge contained less water. The dry matter content of the sludge used in the work ranged from 0,5 to 4%, and the organic matter in various sludges 57-73%. There was a stronger correlation between the content of free water contained in the sewage sludge and the content of organic matter, loss of ignition and filtration rate. In contrast, the weak linkage occurred with sludge settling. It was also seen that the results of different types of sludges are not very comparable with each other due to the specificity of the different types of sludge.

From previous research on 54% of larger and average Estonian treatment plants, the average dry matter content of sludge was 19,8%, 24% in digested sludge and 14,5% in food industries. On the basis of the experiments carried out, the free water content values found in the mixed sludge from wastewater treatment plant were 31,8%, in waste activated sludge 28,7%, in digested sludge 29,8% and in industry sludges 26,2% and 26,7%. Thus, based on the results of the work, about 6 to 10% of free water was left in the sewage sludge. If an estimated of 5% more water would have been removed from sludge in 2016 there would have been 900 tons less sludge, which could have resulted in estimated savings of € 22 000 for the transfer of sludge to the waste center, and onsite in-vessel composting would have generated € 47 000. Thus, the methodology could be realistically used in wastewater treatment plants, and the determination of the free water content found in it would help reduce the costs of the sewage treatment plant operator for sludge management.

On the basis of the completed work it was concluded that the value of the end point of the free water content was dependent on how the experiments were performed, what the drying curve was, how much it contained the scattering points and what methodology was used. The work showed that it is reasonable to carry out several parallel experiments because of sludge variability. The Excel developed in the thesis is relatively simple and with automatic computing, but it also plays an important role in the human factor. Thus, the further possibility is to make it even more automated and less dependent on the determination of the linear regression to be determined by the person.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] 2016. aastal puhastati aasta varasemaga võrreldes ligi 14% rohkem reovett. - Keskkonnaagentuur. [WWW] <https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/uudised/2016-aastal-puhastati-aasta-varasemaga-vorrelde-ligi-14-rohkem-reovett> (10.05.2019)
- [2] Sinikas, N., Kärmas, R., Jõgi, M., Lang, K., Ojamäe, K., Tamre, R. - Asulareovee puhastamise direktiivi nõuete täitmine Eestis. [WWW] https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/uwwtd_art-16_aruanne_2016.pdf (07.04.2019)
- [3] Eesti rahvaarv kasvas eelmisel aastal. - Eesti Statistika. [WWW] <https://www.stat.ee/pressiteade-2017-008> (07.04.2019)
- [4] Canziani, R. - D2.1 - State of the art of existing technology – review. [WWW] <https://sludgetreat.eu/wp-content/uploads/2016/11/D2.1-State-of-the-art-of-existing-technology.pdf> (09.04.2019)
- [5] Wójcik, M., Stachowicz F. Influence of physical, chemical and dual sewage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency. - Powder Technology, 2019, 344(15), 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.001>
- [6] Phuong To, V.H., Nguyen, T.V., Vigneswaran, S., Ngo, H.H. A review on sludge dewatering indices. - Water Science & Technology, 2016, 74(1), 1-16. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.102>
- [7] Guangyin, Zhen., Youcai, Zhao. Pollution Control and Resource Recovery Sewage Sludge. Oxford: Cathleen Sether, 2017.
- [8] Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded. (Vastu võetud 30.12.2002, jõustunud 01.02.2003). Elektrooniline Riigi Teataja <https://www.riigiteataja.ee/akt/129112017006?leiaKehtiv> (07.04.2019)
- [9] Renata, A., Ortigara, C., Conno, R. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater The Untapped Resource. Paris: UNESCO, 2017.
- [10] Vahtramäe, E. Reoveesette käitlemine humifitseerimisväljakutel/ Sewage sludge treatment in humification bed system : magistr töö. Tartu: Tartu Ülikool, 2017. TÜ Digikogu <http://dspace.ut.ee/handle/10062/57745?show=full> (17.04.2019)
- [11] Wiechmann, B., Dienemann, C., Kabbe, C., Brandt, S., Vogel I., Roskosch, A. Sewage sludge management in Germany. Saksamaa: Umweltbundesamt (UBA), 2013.
- [12] Abdalla, N. Methods for Evaluating Dewatering Properties of Sewage Sludge : master thesis. Sweden: Lund University, 2019.
- [13] Anh, T-P., Sillanpää, M., Isoaari, P. Sewage Sludge Electro-Dewatering Treatment—A Review.- Drying Technology: An International Journal, 2012, 30(7), 691-706. DOI: 10.1080/07373937.2012.654874
- [14] Lemmiksoo, V., Tenno, T., Mölder, E., Tamm, A. Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta

III osa. [WWW] https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_too_iii_aruanne.pdf
(07.04.2019)

[15] Keskkonnakeemia praktikum II. [WWW] <http://tera.chem.ut.ee/~inx/tehnol2/kkk2.html>.
(14.04.2019)

[16] Characterization of sludges - Good practice of sludge dewatering: CEN/TR 16456.

[17] Heitveepuhastusprotsessid (2). - Tallinna Tehnikaülikool. [WWW] https://www.ttu.ee/public/m/matemaatika-loodusteaduskond/Instituudid/keemiasstituut/Biotehnoloogia_oppetool/Materjalid/toostusbiotehnoloogia/Heitveepuhastusprotsessid_loeng_2.pdf
(15.04.2019)

[18] Spinoso, L., Vesilind, P.A. Sludge into Biosolids - Processing, Disposal, Utilization. London: IWA Publishing, 2001.

[19] Kopp, J.B. Wasseranteile in Klärschlammuspensionen - Messmethode und Praxisrelevanz. Braunschweig: Gesellschaft zur Förderung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Braunschweig e.V., 2001.

[20] Mannina, G., Capodici, M., Viviani, G. The Sludge Dewaterability in Advanced Wastewater Treatment: A Survey of Four Different Membrane BioReactor Pilot Plants. – Optimal Scheduling and Fouling Control in Membrane Bioreactor. Cham: Springer International Publishing AG, 2017, 197-202.

[21] Effects of sludge biochemical properties on dewaterability: P. T. Bowen ja T. M. Keinath. Fundamental Aspects of Sludge Characterization and Dewatering. New Hampshire: United Engineering Trustees, 1985.

[22] Van Haandel, A.C., Van der Lubbe, J.G.M. Handbook of Biological wastewater treatment, London: IWA Publishing, 2015.

[23] Disposal and recycling routes for sewage sludge. Part 3 - Scientific and technical report,“ Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

[24] Menert, A., Michelis, M., Kallaste, T., Vaalu, T. Reoveesete kui taastuva energia allikas üks kliimamuutuste pidurdamise võimalusi?. - Keskkonnatehnika, 5/2005, 6-10.

[25] Rautanen, S-L. Reoveepuhasti operaatori õpik. Tallinn: Tehnikaülikooli Kirjastus, 2009.

[26] Kuusik, A. Veemajandus, ühisveevärk ja kanalisatsioon. Reoveepuhastite projekteerimine ja ehitamine. [WWW] https://www.ttu.ee/public/t/Taiendusoppijale/Reoveepuhastite_proj_ehitus_2014_Aare_Kuusik.pdf
(10.05.2019)

[27] Kõrgmaa, V. Reoveesette töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelvalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil II etapp. [WWW] http://www.klab.ee/wp-content/uploads/2010/05/Reoveesette_tootlemise_strateegia.pdf (11.04.2019)

[28] A. Maastk, A., Danilišina, G., Gross, M., Kriipsalu, M., Tamm P., Tenno, T. Väikeste reoveepuhastite (jõudlus kuni 2000 ie) hooldamise juhend. Tartu: TT Print OÜ, 2011.

- [29] Sludge Dewatering. [WWW] <https://www.snf.us/wp-content/uploads/2014/08/Sludge-Dewatering-E.pdf> (11.04.2019)
- [30] Fronhofer, D. Biosolids dewatering alternatives. [WWW] http://www.ohiowea.org/docs/OWEA_2015_-_Dewatering_-_Fronhofer.pdf (22.05.2019)
- [31] Demirbas, A., Edris, G., Alalayah, W.M. Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. - Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2017, 39(10), 99-1006. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1283551>
- [32] Characterization of sludges - Sludge management in relation to use or disposal: CEN/TS 13714:2013.
- [33] Nathanson J.A., Ambulkar, A. Wastewater treatment. [WWW] <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment> (09.04.2019)
- [34] US EPA. Biosolids Technology Fact Sheet Belt Filter Press. [WWW] https://www3.epa.gov/npdes/pubs/belt_filter.pdf (20.04.2019)
- [35] Spinosa, L., Lotitio, V., Mininni, G., Lore, F. Developments in laboratory evaluation of sewage sludges dewaterability. - Water Science & Technology, 1993, 28(1), 103-108, 1993. DOI: 10.2166/wst.1993.0026
- [36] Hiller Decanter Centrifuge for Optimal Dewatering Results at Waste Water Treatment Plant in Switzerland. [WWW] <http://trends.directindustry.com/hiller-gmbh/project-39982-114971.html> (26.04.2019)
- [37] Belt Filter Press. [WWW] <https://www.dewater.com/belt-filter-press/> (26.04.2019)
- [38] Philippe, S. 4 objectives of fecal sludge treatment. [WWW] <https://www.cawst.org/blog/bydate/2016/09/4-objectives-of-fecal-sludge-treatment/> (19.04.2019)
- [39] Zhu, G., Qasim, S.R. Wastewater Treatment and Reuse, Theory and Design Examples, Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [40] Drying Beds. [WWW] <https://www.climate-policy-watcher.org/wastewater-sludge/drying-beds.html> (17.04.2019)
- [41] L. Strande, L., Ronteltap, M., Brdjanovic, D. Faecal Sludge Management. Systems Approach for Implementation and Operation. London: IWA Publishing, 2014.
- [42] M. J. Brandt, K. M. Johnson, A. J. Elphinston ja D. D. Ratnayaka. Tworts Water Supply. 3nded. Oxford: Joe Hayton, 2017.
- [43] Sludge Disposal & Design Examples – 02. [WWW] <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana52/sludisx2.html> (18.04.2019)
- [44] Põõsaste, P.-A. Viljandi Reoveepuhasti settetöötus ja metaankääriti rajamise otstarbekus/ The Sludge Treatment Technology of the Viljandi Sewage Treatment Plant and the Feasibility of Anaerobic Digester : Lõputöö. Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2016. TTK digikogu: <http://eprints.ttkk.ee/2200/> (12.04.2019)

- [45] Kirs, K. Annuspuhasti tehnoloogiline tsüklite dimensioneerimine Suurupi reoveepuhasti näitel/
Technological Dimensioning of the Treatment Cycles of Sequencing Batch Reactor Based on Suurupi
Wastewater Treatment Plant : Lõputöö, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2014. TTK digikogu:
<http://eprints.ttkk.ee/542/>
- [46] Belt Filter Press. [WWW] <https://www.climate-policy-watcher.org/wastewater-sludge/belt-filter-press.html> (20.04.2019).
- [47] OÜ Aqua Consult Baltic. Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja
jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta I osa. [WWW]
https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_too_i_aruanne.pdf (07.04.2019).
- [48] Kroman, J. Settekäitluse võrdlusaluse koostamine Läänemere piirkonna reoveepuhastite/
The benchmarking compilation for wastewater treatment plants in the Baltic Sea Region :
bakalaureusetöö. Tartu: Tartu Ülikool, 2018. TÜ Digikogu:
<https://dspace.ut.ee/handle/10062/60152> (23.04.2019)
- [49] OÜ Aqua Consult Baltic, Projekti "Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste
väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta" lisa 7
Reoveesette tekkekohad, settekogused, käitlustehnoloogiad ja tehnoloogia vanus, Tartu, 2015.
- [50] R. Minall, R., Smyth, M., Hora, N. Practical techniques to assess the dewaterability of sludge to
optimise current and future performance. [WWW] <https://www.aquaenviro.co.uk/wp-content/uploads/2015/06/Practical-techniques-to-assess-the-dewaterability-of-sludge-and-optimise-performance-and-polymer-dosing-Minall-R..pdf> (26.04.2019)
- [51] A. Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J., Hoadle, A.F. Advances in Mechanical Dewatering of
Wastewater Sludge Treatment. Dordrecht: Springer, 2013.
- [52] G. Chen, G., Yue, P.L., Mujumdar, A.S. Sludge dewatering and drying.- *Drying Technology*, 2002,
20(4-5), 883-916. DOI: 10.1081/DRT-120003768
- [53] Zhang, W.J., Sun, K.C. Comparative Analysis of the Measurement Methods of Bound Water
Content in Municipal Sewage Sludge.- *Advanced Materials Research*, 2012, 518-523, 2991-2995.
Doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.2991
- [54] DWA-Regelwerk. Merkblatt DWA-M 383 Kennwerte der Klärschlammwässerung, Hennef:
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserversorgung, Abwasser und Abfall e. V., 2008.
- [55] MS-70/MX-50/MF-50/ML-50. [WWW]
<https://www.aandd.jp/products/weighing/balance/moisture/mxmf.html> (01.04.2019)
- [56] Characterization of sludges - determination of dry residue and water content:
EVS-EN12880:2001.
- [57] Tenno, T. Efektiivse autotroofse lämmastikuärastuse tehnoloogia rakendusuuring. SA
Keskkonnainvesteeringute Keskus. [WWW] <https://www.kik.ee/sites/default/files/1187.pdf>
(01.05.2019)
- [58] Sludge, treated biowaste, soil and waste- Determination of loss on ignition:
EVS-EN15935:2012.

[59] Characterisation of sludges - Settling properties- Part 1: Determination of settleability: Determination of the proportion of sludge volume and sludge volume index): EVS-EN 14702-1:2006.

[60] Baxter, T. E., Byrom, B. C., Chen, D. D., Dentel, S. K., Gelman, S. R., Jenkins, S. R., Sezgin, M. 2710 Tests on sludges. [WWW] http://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic_SM2710.pdf (23.04.2019)

[61] Von Sperling, M. Basic Principles of Wastewater Treatment, London: IWA Publishing, 2007.

[62] Rootalu, K. Sotsiaalse analüüsi meetodite ja metoloogia õpibaas. [WWW] <http://samm.ut.ee/korrelatsioonikordajad> (21.05.2019)

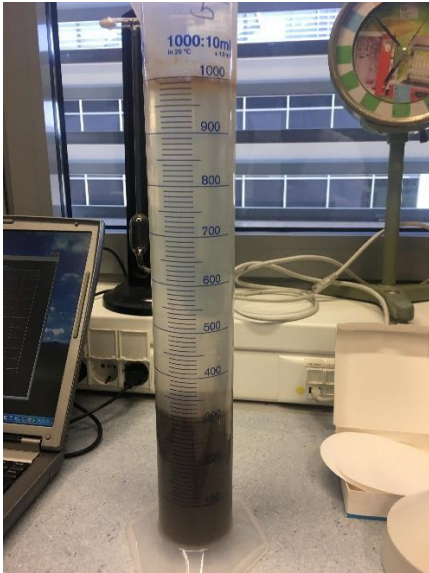
[63] Vigneswaran, S., Kandasamy, J. Sludge treatment technologies. - Desalination and water resources. Common Fundamental and unit operations in Thermal Desalination systems- Volume II, 2010, 124-139.

LISAD

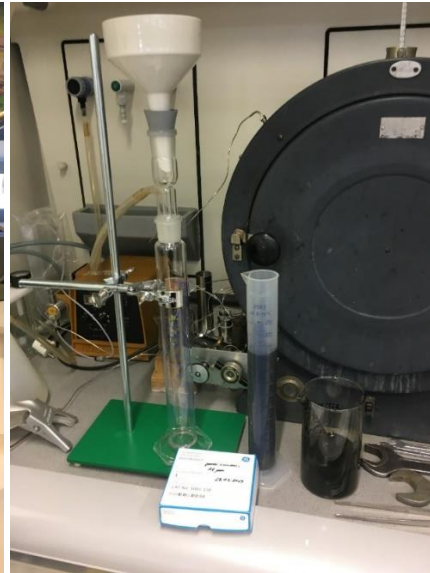
Lisa 1 Kasutatud töövahendid ja läbiviidud katsete fotod



Joonis L1.1. Kasutatud töövahendid sette eelnevak filtrerimiseks (autori foto)



Joonis L1.2. Settimistest (autori foto)



Joonis L1.3. Filtrerimistest (autori foto)



Joonis L1.4. Pressikatse (autori foto)



Joonis L1.5. Reoveesete kuivaine ja põletusjäägi määramine (fotol ülevalt alla: reoveesete vedelal kujul, pärast 105°C kuivatuskapis kuivamist, pärast 550°C põletusahjust tulekut)(autori foto)



Joonis L1.6. Proovipannile jõudev settekogus (autori foto)

Joonis L1.7. Filtreerimiskatsel lehtrisse jääv sete (autori foto)

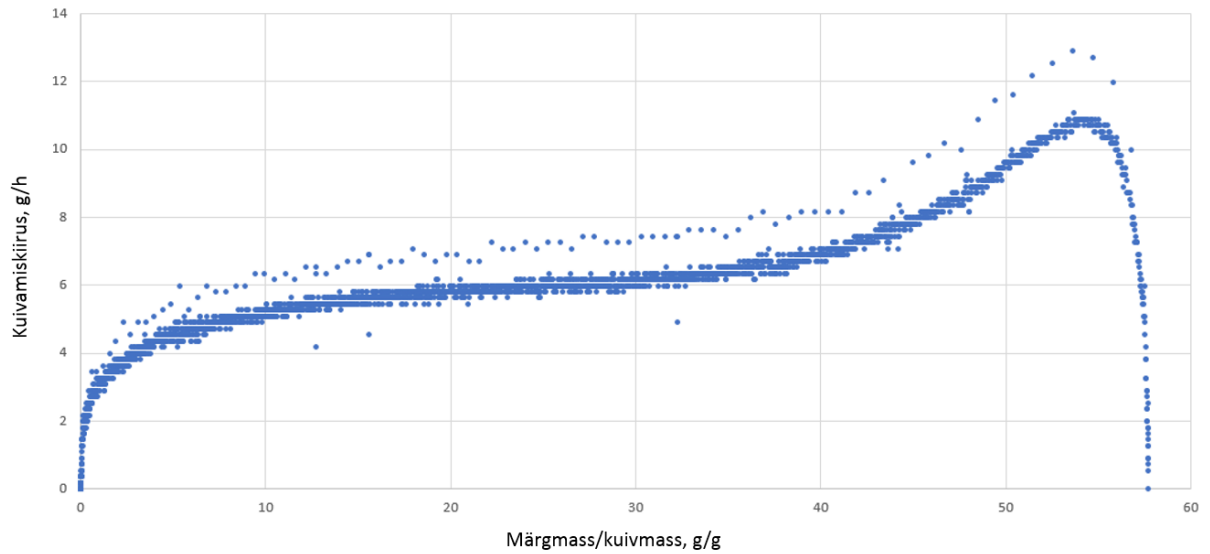


Joonis L1.8. Reoveesete tavaolekus (vasakul) ja polümeeriga segatuna (paremal) (autori foto)

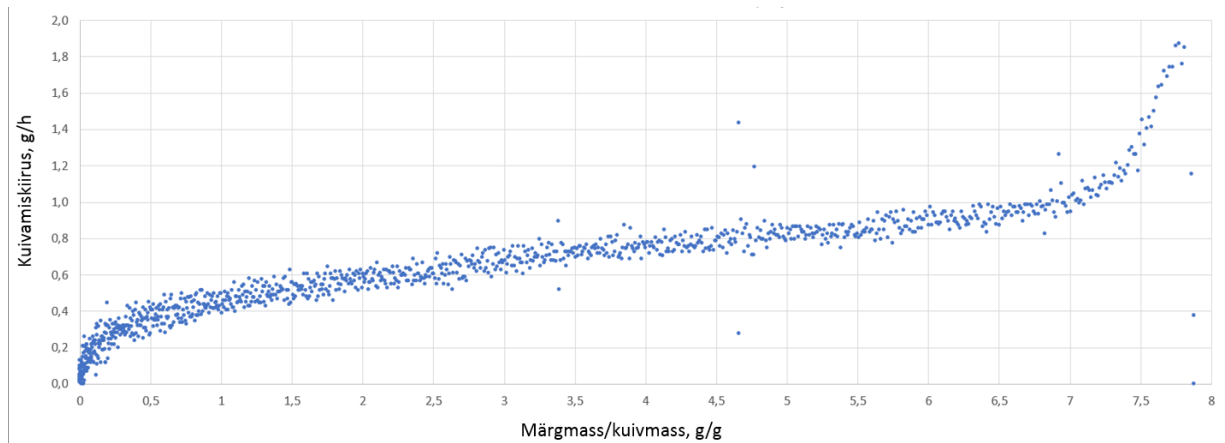


Joonis L1.9. Pressikats 3 etappi (vasakult: sete enne katseseadmesse minekut, pärast I pressimist, pärast II pressimist) (autori foto)

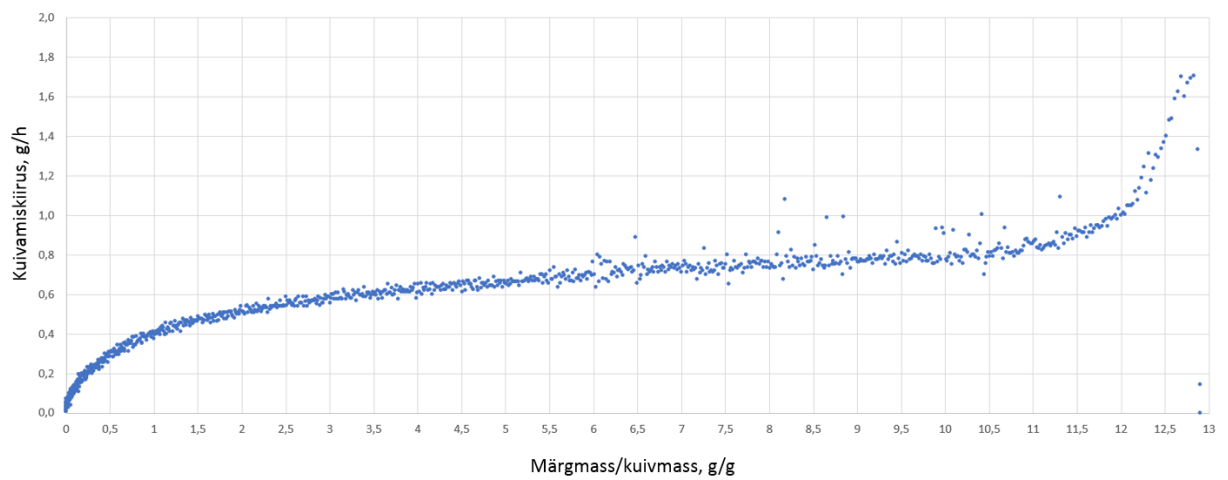
L2.1 Kuivamisgraafiku erinevus andmete registreerimise põhjal



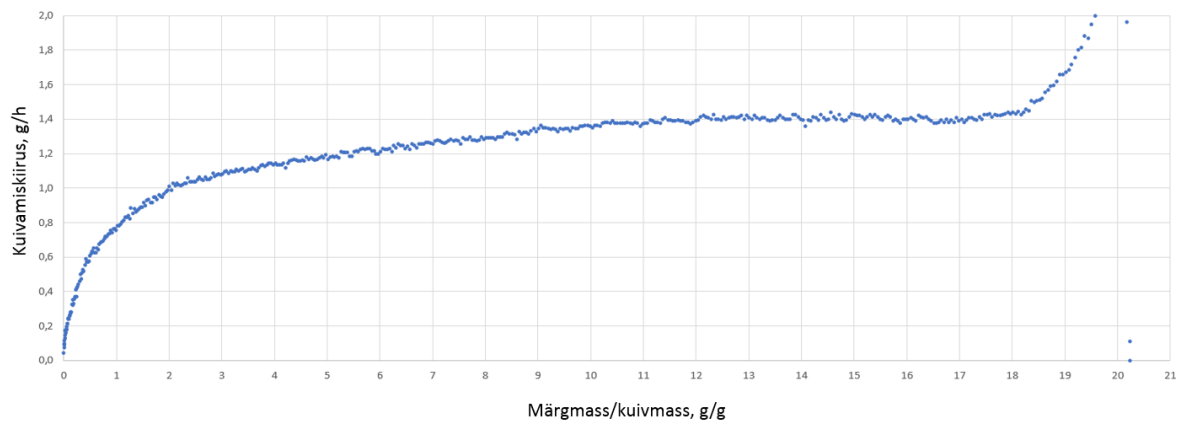
Joonis L2.1.1. Kuivamiskõver 1 sekundilise intervalli põhjal (autori joonis)



Joonis L2.1.2. Kuivamiskõver 5 sekundilise intervalli põhjal (autori joonis)

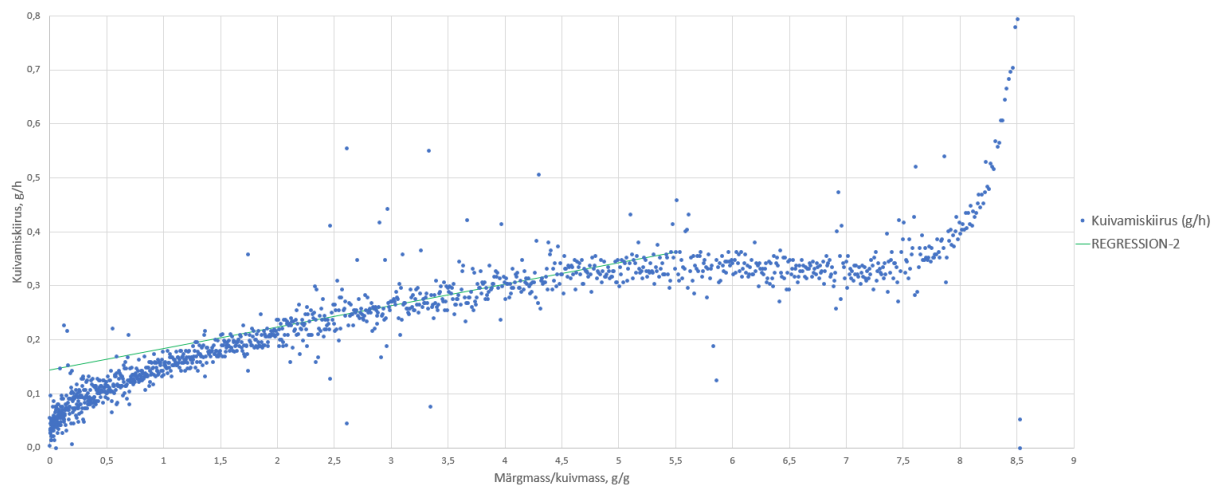


Joonis L2.1.3. Kuivamiskõver 10 sekundilise intervalli põhjal (autori joonis)



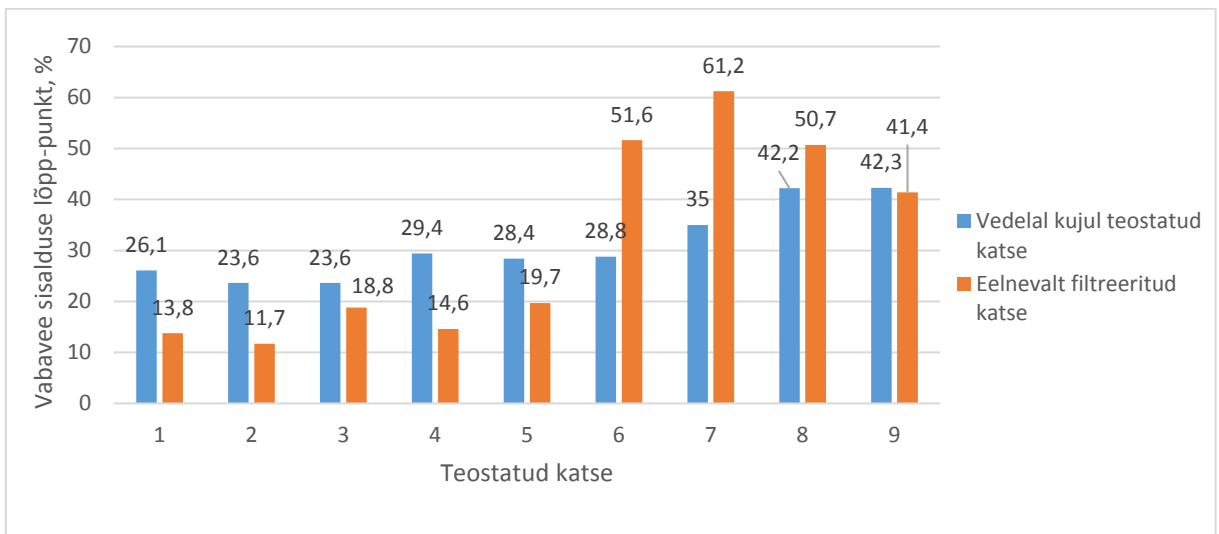
Joonis L2.1.4. Kuivamiskõver 30 sekundilise intervalli põhjal (autori joonis)

L2.2 Hajuvuspunktide esinemine kuivamiskõveral

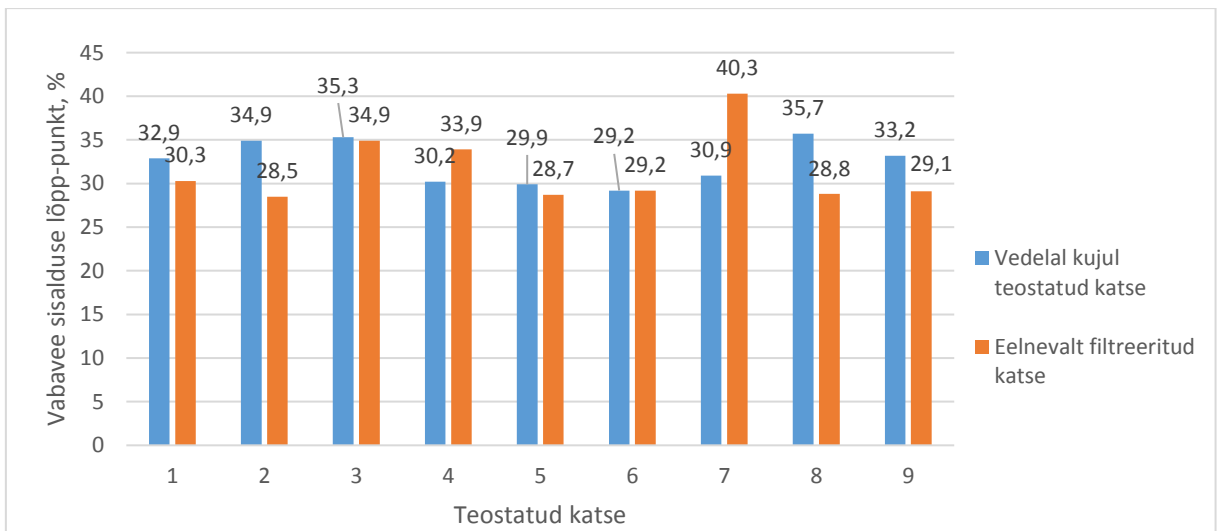


Joonis L2.2.1. Kuivamiskõver ja sellele esinevad hajuvuspunktid (autori joonis)

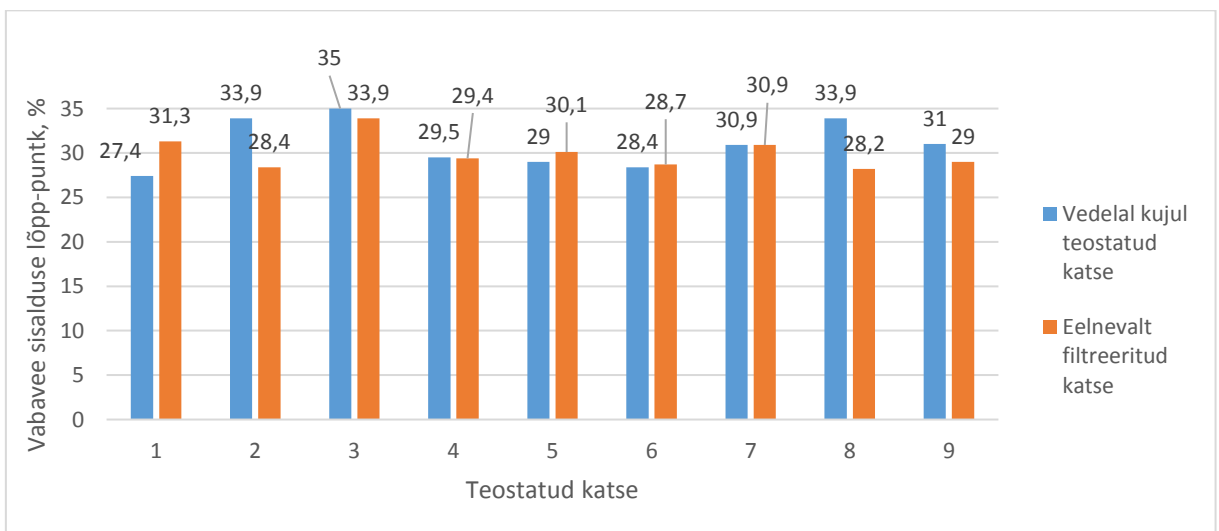
Lisa 3 Vedelal kujul ja eelnevalt filtreeritud katse tulemuste omavaheline võrdlus



Joonis L3.1. Metoodika 1 (autori joonis)

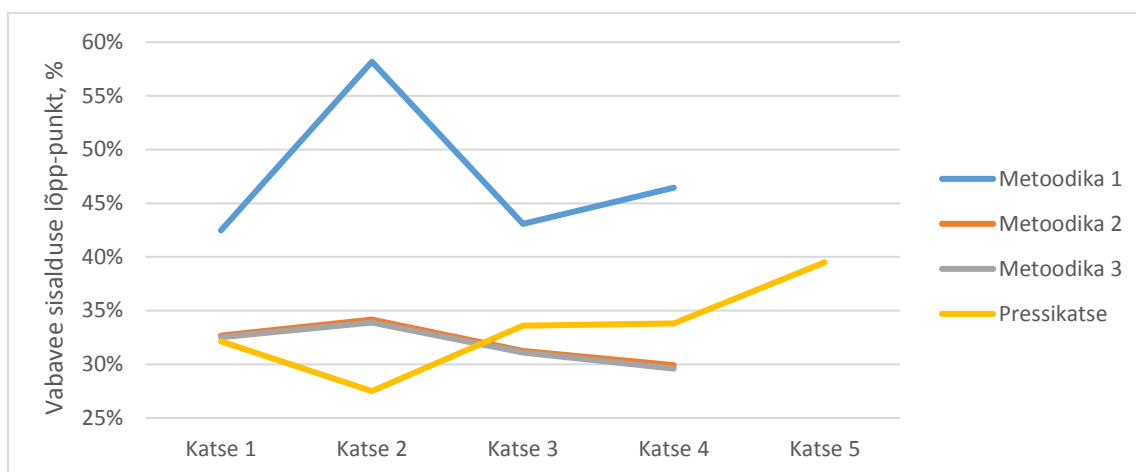


Joonis L3.2. Metoodika 2 (autori joonis)

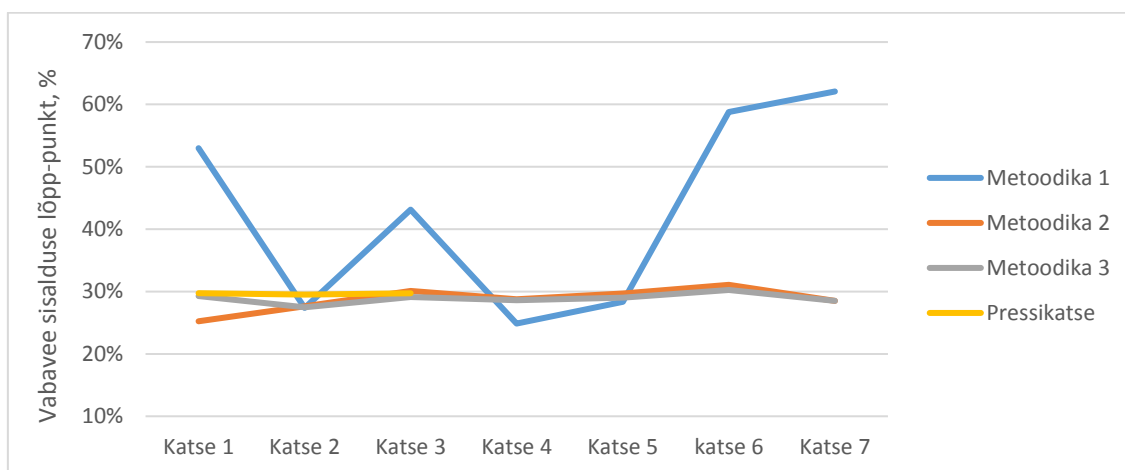


Joonis L3.3. Metoodika 3 (autori joonis)

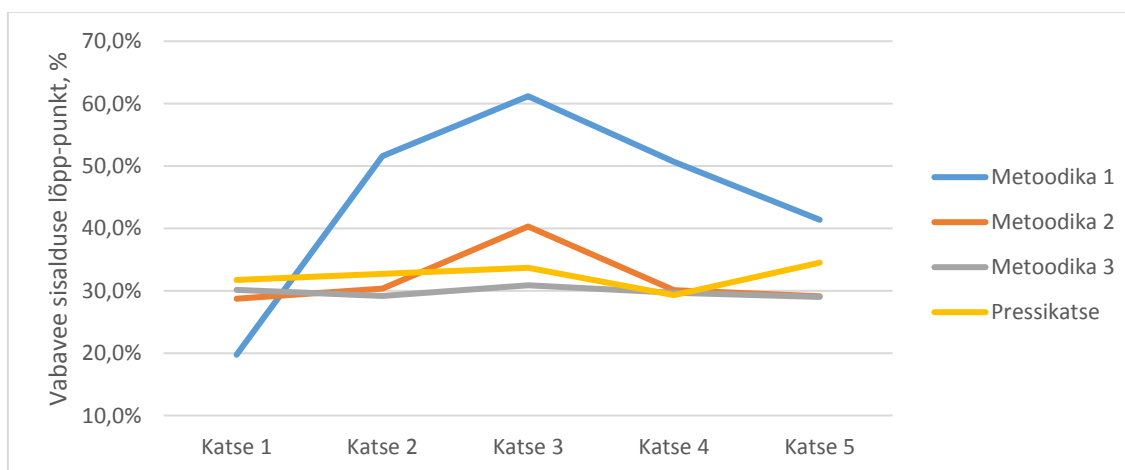
Lisa 4 Erinevate mudaliikide ja meetodikate saavutatud vabavee sisalduse väärtused



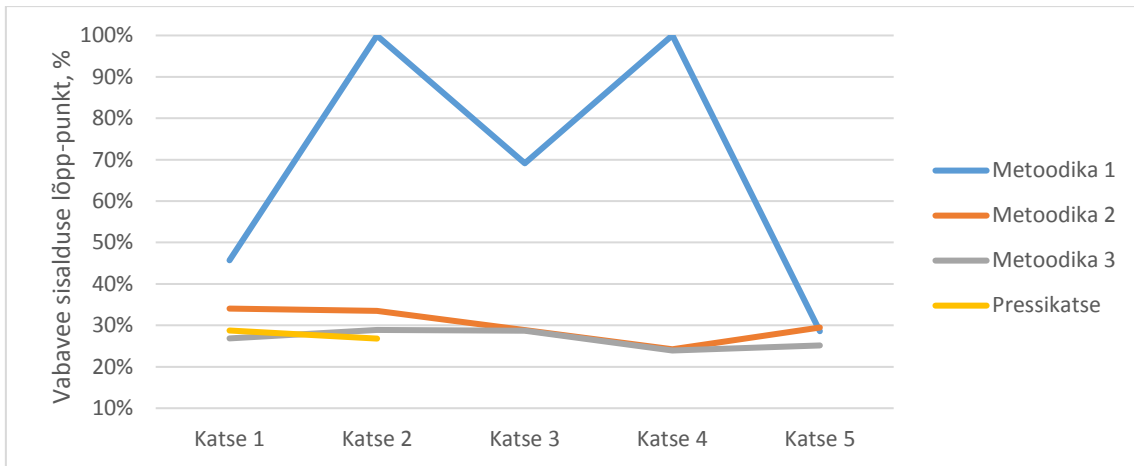
Joonis L4.1. Muda A- reoveepuhastusjaama segamuda (jääkaktiivmuda ja toormuda segu) (autori joonis)



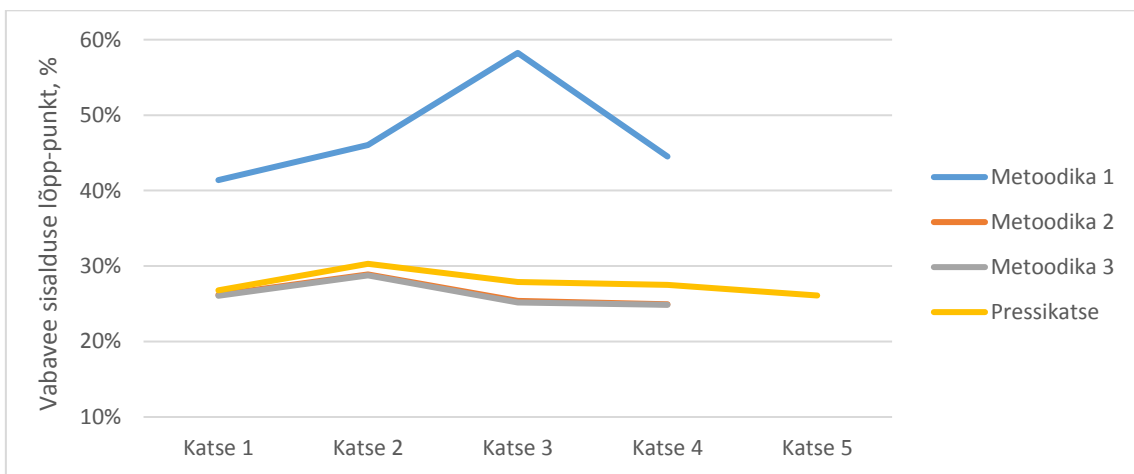
Joonis L4.2. Muda B – reoveepuhastusjaama jääkaktiivmuda (autori joonis)



Joonis L4.3. Muda C – reoveepuhastusjaama kääritatud muda (autori joonis)



Joonis L4.4. Muda D – piimatööstuse jääkaktiivmuda (autori joonis)



Joonis L4.5. Muda E – toiduõlitööstuse jääkaktiivmuda (autori joonis)