

Tartu Ülikool
Bioloogia-geograafiateaduskond
Geograafia instituut
Loodusgeograafia ja maastikuökoloogia õppetool

Antti Tooming

**KERGKRUUSATÄITEGA HÜBRIIDSE
TEHISMÄRGALAPUHAHASTI PUHASTUSEFEKTIIVSUS
PAISTU PÕHIKOOLI PINNASFILTRI NÄITEL**

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Juhendaja: prof. Ülo Mander
PhD. Tõnu Mauring

Tartu 2005

SISUKORD

SISUKORD	2
SISSEJUHATUS	3
1. TEHISMÄRGALAPUHAŠTID REOVEEPUHAŠTUSES	5
1.1 Tehismärgalade tüübid	5
1.1.1 Vertikaalvooluline pinnasfilter	5
1.1.2 Horisontaalvooluline pinnasfilter	6
1.1.3 Hübrüüsed märgalasüsteemid	6
1.2 Filtermaterjalide kasutamine tehismärgalapuhastites	8
1.2.1 Olulised kriteeriumid filtermaterjali valikul	9
1.2.2 Kergkruusa kasutamine filtermaterjalina	10
1.3 Tehismärgalapuhastite majanduslikkus	13
1.3.1 Pinnasfiltrid	14
1.3.2 Ülalpidamiskulud	15
1.3.3 Kogukulud	16
1.4 Märgalapuhastite perspektiiv Eestis	16
1.4.1 Seosed seadusandlusega	19
2. PAISTU PÕHIKOOLI PINNASFILTER	22
2.1 Märgalapuhasti tehniline kirjeldus	22
2.1 Märgalapuhasti hooldus	29
2.2 Nõuded veekvaliteedile	29
2.3 Märgalapuhasti dimensioneerimine	30
3. MATERJALID JA METOODIKA	33
3.1 Reo- ja heitveeproovide mõõtmine ning analüüsimine	33
3.2 Puhastusefektiivsuse ja puhastusmäära arvutamine	34
3.3 Vooluhulkade ning füüsikalise-keemiliste näitajate mõõtmine	35
3.4 Andmetöötlus ja statistiline analüüs	36
4. TULEMUSED JA ARUTELU	38
4.1 Reovee vooluhulgad ja viibeaeg	38
4.2 Reo- ja heitvee temperatuur	41
4.3 Reo- ja heitvee pH	43
4.4 Reo- ja heitvee hapniku küllastuskontsentratsioon	43
4.5 Reo- ja heitvee elektrijuhtivus	45
4.6 Hõljuvaine kontsentratsiooni muutused	46
4.7 BHT ₇ kontsentratsiooni muutused	48
4.8 Üldfosfori ja fosfaatfosfori kontsentratsiooni muutused	51
4.9 Paistu tehismärgala puhastusprotsesside kokkuvõte	53
KOKKUVÕTE	55
SUMMARY	57
KASUTATUD KIRJANDUS	59

LISAD:

Lisa 1. Paistu märgalapuhasti puhastusparameetrite algandmed.

Lisa 2. Algandmete statistilised tulemused.

Lisa 3. Spearmani astakorrelatsioonikordajate väärtused.

Lisa 4. Mõõtmiskuude ööpäeva keskmised õhutemperatuurid (°C).

SISSEJUHATUS

Ökoloogilised reoveepuhastuse meetodid pakuvad tavalahenduste kõrvale alternatiivi, kus suurema maa-ala kasutamisega saadakse väiksem puhastuse energiakulu, seadme mehhaniseeritus ja selle juhtimise vajadus. Tulemuseks annab see madalamad ülalpidamiskulud, mis on põhilise tähendusega puhastuse kogukulude alandamise jaoks.

Arendustöö märgalasüsteemidega on käinud põhjalikumalt viimased 20 aastat, millest olulisemad on olnud viimased kümme. See periood on andnud töötavad seadmed, tõestusmaterjali ja reeglid süsteemide loomiseks. Praeguseks võib julgelt öelda, et suund on väljunud oma eksperimentaalsest olemusest ja lahendused on tehtud tavainsenerile kasutatavaks.

Eestis tingimustes oleks perspektiivne märgalapuhasteid ehitada väikese reostuskoormusega (kuni 2000 ie) reoveepuhastitena, eriti sobilik on pinnasfiltritest koosnevate hübriidsüsteemide rajamine. Samas puuduvad Eestis tehismärgalasüsteemide rajamisel standardid või juhendmaterjalid ning seetõttu on nende rajamine olnud koordineerimata.

Antud töö magistritöö keskendub märgalasüsteemide arendamise teemadele. Välja on toodud viimase aja suundumused märgalapuhastite arendamisel ning hetkesituatsioon Eestis. Töö praktiline osa keskendub Viljandi maakonnas Paistu vallas asuva Paistu Põhikooli tehismärgalapuhasti puhastusefektiivsuse uurimisele.

Magistritöös võrreldakse Paistu märgalapuhasti puhastusprotsesse ning nende vastavust Eestis kehtivatele nõuetele. Kogutud andmete põhjal hinnatakse puhastusala töö senist efektiivsust ning sarnaste süsteemide kasutusvõimalusi Eestis.

Töö esimene osa kirjeldab märgalapuhastite viimase aja arengutendentse, erinevate filtermaterjalide kasutamist pinnasfiltrites, süsteemide majanduslikkust ja märgalapuhastite perspektiivi Eestis. Teises osas on välja toodud Paistu märgalapuhasti tehniline kirjeldus, hinnang rajatud süsteemile ning esitatud tehnilised eskiisjoonised. Töö kolmas osa kirjeldab töös kasutatud materjale ja meetodeid. Töö neljandas osas on esitatud tulemused ning arutelu.

Magistritöö peamised eesmärgid:

1. Anda ülevaade hübriidsetest tehismärgalatüüpidest, erinevatest filtermaterjale ja nende omadustest ning kirjeldada märgalapuhastite majanduslikkust.
2. Kirjeldada märgalapuhastite perspektiivi Eestis tulenevalt viimase aja arengutest ja seadusandlusest;
3. Paistu märgalapuhasti puhastusefektiivsuse analüüs ning selle vastavuses veekvaliteedi esitatud nõuetele biokeemilise hapnikutarbe (BHT), hõljuvaine ja üldfosfori näol;
4. Uurida puhastusefektiivsuse seoseid puhastusala vooluhulkade, hapnikusisalduse, elektrijuhtivuse, pH ja temperatuuri vahel;
5. Anda hinnang rajatud märgalasüsteemi projektlahendusele ning esitada tehnilised eskiisjoonised.

Töös on kasutatud erinevaid kirjandusallikaid ja artiklikogumikke. Märgalapuhastite perspektiivide hindamisel on konsulteeritud kõikide Eestis tegutsevate aktiivsete organisatsioonidega (Keskkonnaministeerium, Keskkonnainvesteeringute Keskus (KIK), Maakondade keskkonnateenistused, Tartu Ülikool (TÜ), Eesti Põllumajandus Põllumajandusülikool (EPMÜ), Tallinna Tehnika Ülikool (TTÜ), Ökoloogiliste Tehnoloogiate Keskus (ÖTK), AS Kobras). Proovide analüüsimist finantseeriti Euroopa Liidu 5. Raamprogrammi uurimisprojekti PRIMROSE (koordinaator prof. Ü. Mander) ning EV Haridus- ja Teadusministeeriumi sihtfinantseerimise teemade 0180549s98 ja 0182534s03 (vastutav täitja prof. Ü. Mander) arvelt.

1. TEHISMÄRGALAPUHAŠTID REOVEEPUHAŠTUSES

1.1 Tehismärgalade tüübid

Tehismärgalade kasutamine reoveepuhastuses on viimase paarikümne aasta jooksul jõudsasti arenenud, kuna tehismärgalad on reeglina väga lihtsad ja praktilised reoveepuhastusseadmed. Maailmas on palju näiteid hästi töötavatest tehismärgalasüsteemidest nii troopilistes maades kui ka külmas põhjamaa kliimas.

Põhja kinnitunud makrofüütidega süsteemid võib klassifitseerida vee voolamise järgi (Vymazal et. al., 1998):

- Vertikaalvoolulised pinnasfiltrid (*ingl. k. vertical subsurface flow system*);
- Horisontaalvoolulised -pinnasfiltrid (*ingl. k. horizontal subsurface flow system*);
- Vabaveelised süsteemid (*ingl. k. surface flow system*).

Tehismärgala koosneb substraadist, taimestikust ja bioloogilistest organismidest, mis kokku moodustavad biofiltri, kus toimubki reovee peamine puhastusprotsess. Reovee töötlemine tehismärgaladel põhineb samadel füüsikaliste, keemiliste ja/või bioloogilistel protsessidel, mida kasutatakse ka konventsionaalsetes puhastussüsteemides (Mander & Mairing, 1997).

1.1.1 Vertikaalvooluline pinnasfilter

Selles tehismärgala tüübis kombineeritakse erineva teraläbimõõduga pinnasmaterjalide kihid (põhjas suurema ja ülemises kihis väiksema) ja pinnasfiltri hüdrauliline toide. Filterkihi tusedus on enamasti 100 cm, millele võib täiendavaks soojusisolatsiooniks lisada mõnikümmend sentimeetrit isolatsioonimaterjali, et tagada süsteemi toimimine talvisel perioodil. Filtri peamine ülesanne on hapnikku nõudvate protsesside soodustamine (BHT alandamine, nitrifikatsioon).

Tüüpiline hüdrauliline koormus selliste pinnasfiltrite juures on 40 – 500 mm d⁻¹ (0,4 – 5 m² inimekvivalendi kohta). Filtri jõudlus pinnaühiku kohta on väga kõrge, arvestuslikult suudab üks ruutmeeter filtri pinda viia ööpäeva jooksul vette ligikaudu 30 g hapnikku. Filtrid ehitatakse reeglina mitmetest osadest, kõige sagedamini on neid 2-4. Korruga koormatakse tüüpiliselt ühte osa, teised puhkavad. Filtrid kavandatakse enamasti ristikülükujulised, kus

pikkuse ja laiuse suhtarvud ulatuvad 0,3 kuni 3. Protsessid on sellist tüüpi pinnasfiltris väga intensiivsed ja seetõttu ei kahanda taimede ärajätmine oluliselt puhastuse intensiivsust (IWA, 2000).

1.1.2 Horisontaalvooluline pinnasfilter

Keskmine hüdrauliline koormus sellist tüüpi pinnasfiltri puhul on 20 - 100 mm d⁻¹ (2 – 10 m² inimekvivalendi kohta) ja viibeaeg üle 5 päeva. Enamasti valitakse filtermaterjali terasuuruseks 2 – 10 mm, kusjuures sisse- ja väljavoolutsoonid ehitatakse jämekillustikust, et vältida süsteemi ummistumist (IWA, 2000).

Pinnasfiltris on ühte serva paigutada toite- ja teise kogumistorud. Jaotus- ja kogumistorustik paigutatakse alati filtri pikemasse külge, millega tagatakse suurem kokkupuutepind pinnasega ja parem hüdrauliline läbilaskevõime. Reovesi hoitakse filtris enamasti poolel tasemel, kuid seda on võimalik vastavalt vajadusele reguleerida väljavoolukaevust. Näiteks tuleb enne talve saabumist veetase tõsta kõrgemale, et filtrile tekiks peale jääkiht, mis tagab parema soojusisolatsiooni.

1.1.3 Hübriidsed märgalasüsteemid

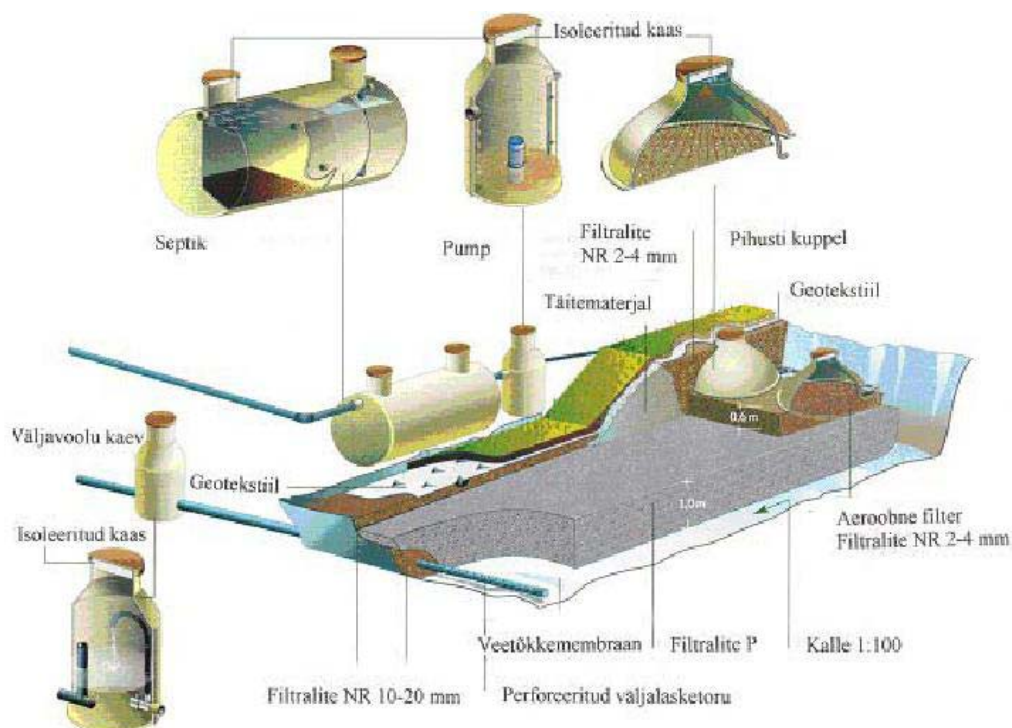
Hübriidsed süsteemid koosnevad järjestikustest omavahel seotud vertikaalvoolulistest, horisontaalvoolulistest ja avaveelistest tehismärgaladest. On erinevaid süsteeme, kus horisontaalvoolulisele pinnasfiltrile järgneb vertikaalvoolulise pinnasfiltri ja avaveelise märgala kombinatsioon ning süsteeme, kus vertikaalvoolulisele filtrile järgneb üks või kaks horisontaalvoolulist ala. Viimane variant on hakanud ennast tõestama, kui üks sobilikumaid tehnoloogilise lahendusi Eesti tingimustes. Põhiline eelis hübriidsete süsteemide juures on see, et tehismärgalas reastatakse täpselt planeeritud protsessid. Peale selle saab varieerida filtrite koormamise määra ja anda osadele filtritele puhkeaga, mis on vajalik puhastusvõime taastumiseks.

Hübriidsetes süsteemides horisontaal- ja vertikaalvooluliste pinnasfiltrite eelised ja puudused tasakaalustavad teineteist ja on võimalik saavutada kombinatsioon, mille käigus eraldatakse orgaanilist reostust ning nitraatideni oksüdeeritud lämmastikuühendeid denitrifikatsiooni käigus (Cooper, 1999). Horisontaalvoolulised pinnasfiltrid on vähem aeroobsed kui vertikaalvoolulised pinnasfiltrid ning on seetõttu hästi kasutatavad BHT eemaldamiseks, kuid

sobivad vähem NH₄-N eemaldamiseks. Vertikaalvoolulised pinnasfiltrid on seevastu aeroobsemad ja sobivad tunduvalt paremini nitrifikatsiooniks.

Märgalasse võib vajadusel istutada väga erinevaid taimi, enamlevinud on laialehelise hundinuia kasutamine. Märgalataimestik juhib oma juurestiku ja risoomide abil märgala põhja hapnikku ning muudab pinnase poorsemaks, mis loob soodsama keskkonna mikroorganismidele, kes on peamised bioloogilise puhastusprotsessi teostajad (Kadlec & Knight, 1996). Samas pole taimede oodatavat positiivset mõju suudetud veenvalt tõestada. Põhiliseks taimede rolliks on pigem esteetiline väärtus ja soojusisolatsioon (Mæhlum & Stålnacke, 1999). Taimede vajalikkus sõltub samuti kohalikust situatsioonist ja tingimustest, kuhu süsteem rajatakse.

Hübriidsed süsteemid on viimasel ajal näidanud väga häid puhastusefektiivsusi (sh Eestis) kõikide parameetrite ulatuses ning need sobivad edukalt reovee puhastamiseks üksikmajapidamistelt, elamute gruppidele, koolidelt, hotellidelt ja muudelt turismiobjektidelt, kust reovett tuleb perioodiliselt ning esineb suuri löökoormusi. Suur maht ja mitmekesisus annabki märgalapuhastitele nende kõige suurema eelise – hea taluvuse koormuse kõikumise suhtes ehk nii kontsentratsioonide kui vooluhulkade puhverduvõime.



Joonis 1. Hübriidne puhastussüsteem (www.maxit.ee).

AS Maxit Estonia (endise nimega AS Optiroc) poolt pakutavas hübriidses süsteemis (joonis 1) on kombineeritud vertikaalne ja horisontaalne voolamine läbi filterkeha, milleks kasutatakse kergkruusa. Jaotus vertikaalfiltrile on tehtud klaasplastist kuplitega, mille ülemises osas on pihusti, mis pihustab reovee filtri pinnale ühtlaselt laiali. Kuplid on külma kaitseks kaetud pinnasega. Tegu on Norras välja töötatud süsteemiga, mis on mõeldud väiksemate objektide reoveepuhastuseks (elamud, elamute grupid, motellid). Samas on võimalik sarnase põhimõtete alusel rajada suurematele koormustele (kuni 2000 ie) mõeldud süsteeme, mida saaks kasutada näiteks väiksemate asulate reovee puhastamisel.

Eestis on suuremateks hübriidsüsteemide näideteks Kõo, Kambja, Vohnja ja Kihlevere asulate reoveepuhastid, kus on omavahel kombineeritud erinevat tüüpi määrgalasüsteemid (pinnasfiltrid, vabaveelised määrgalad, energiavõsa puhastid). Olemasolevate andmete põhjal võib väita, et sellist tüüpi reoveepuhasteid saab rakendada asulate reovee puhastamisel. Eesti tingimustes tuleks täpsemalt välja selgitada sobivaimad tehnoloogilised lahendused.

Isiklikust seisukohast ja saadud kogemustest julgen väita, et Eestis on otstarbekas peamiselt kasutada pinnasfiltritest koosnevat hübriidseid määrgalapuhasteid, mis on töökindlad ja sobivad kasutamiseks meie kliimaatilistes tingimustes.

1.2 Filtermaterjalide kasutamine tehismäärgalapuhastites

Pinnase mõju reovee puhastusele on väga oluline, kuna põhiline toitainete eemaldamine reoveest tehismäärgalas toimub pinnase bioloogiliste, füüsikaliste ja keemiliste protsesside tulemusena. Taimed eelkõige toetavad puhastusprotsesse.

Põhilised teadmised pinnase füüsikalise-keemiliste omaduste kohta on olulised määrgala puhastussüsteemi projekteerimisel ja hooldamisel, sest need omadused mõjutavad taimekasvu ja reoainete sidumist. Reoained seotakse hüdratiseerunud pinnase maatriksisse protsesside teel, mis ulatuvad keemilisest sidumisest füüsikalise lahustumiseni, kombineeritud tulemuseks on sorptsioon, mis võib olla üks peamisi sidumisviise tehismäärgalal, seetõttu on filtermaterjali valik väga oluline (Johansson, 1997; Zhu et al., 1997; Jensen & Krogstad, 2003).

Tehismärgalades on substraadina kasutatud väga mitmesuguseid materjale: savi, liiva, saviliiva, kruusa, põlevkivituhka, purustatud kiltkivi või dolomiiti, mitmesuguseid tehismaterjale ning nende omavahelisi segusid ja kombinatsioone.

1.2.1 Olulised kriteeriumid filtermaterjali valikul

Pinnase valikul peaks silmas pidama, et taimed oleksid võimelised selles kasvama, et toimuks reovee infiltratsioon ja liikumine pinnases ning et pinnasel oleks võimalikult suur toit- ja reoainete adsorptsioonivõime (Kadlec & Knight, 1996). Samuti on oluliseks kriteeriumiks materjali keemiline koostis, sest näiteks Al, Fe ja Ca sisaldus võib näidata materjali oodatavat fosfori sidumisvõimet (Johansson, 1997). Eesti tingimustes on väga oluline filtermaterjali isoleerivad omadused, et puhastusprotsessid toimuksid ka külmematel perioodidel.

Vee võime infiltreeruda substraadi pinnale ja nõrguda läbi filtermaterjali on märgalapuhastuses väga oluline tegur. Kaks põhilist tehismärgala hüdraulilist omadust on veejuhtivus ja poorsus. Veejuhtivus on peamine mõõdetav suurus vee liikumisel läbi pinnase, mida mõjutab pinnase struktuur ja pooride hulk (Jenssen & Krogstad, 2003).

Pinnase poorsus s.t. pinnasepooride suhe kogu mulla mahtu, on samuti oluline viibeaja juures. Pinnase poorid võivad olla omavahel ühendatud või mitte ning ühendatavus pooride vahel mõjutab vee läbilaskvust. Üldiselt näitab väike osakeste suurus suuremale poorsusele. Väikeste osakeste hulga kasvades veejuhtivus kahaneb ja viibeag suureneb (Johansson, 1997). Suur poorsus kindlustab ka suure eripinna, kus küllaldaselt viibeajal saavad toimuda sorptsioonimehhanismi.

Märgala filtermaterjal valitakse tavaliselt parema hüdraulilise juhtivuse saavutamiseks jämedast liivast peene kruusani. Väiksema fraktsiooniga materjal võib näidata paremat fosfori ärastamisvõimet tänu suuremale osakeste kogupinnale ja kontaktajale. Kui aga hüdrauliline juhtivus on väga madal, võivad ilmned probleemid filtri ummistumisega (Jenssen, 2001).

Võrreldes savisid, liivsavisid ja liivasid on savidel tavaliselt suurim adsorptsiooni potentsiaal, sest need on peeneteralised ning nende eripind on suur. Kuna savid on tihedad, on vee liikumine nendes takistatud, samuti on puudulik gaasivahetus. Liiv ei ole samuti parim pinnas

tehismärgalas, sest selles toimub vee infiltratsioon ja liikumine kiiresti (Kadlec & Knight, 1996).

Brix et al., (2000) peavad filtermaterjali kõige olulisemaks omaduseks selle lõimist. Ebaühtlustegur d_{60}/d_{10} peaks olema väiksem kui 4, et kindlustada küllaldane veejuhtivus ja minimeerida ummistumise ohtu (Brix et al., 2000). Looduslike liivade puhul on nõudeks, et efektiivne terasuurus (d_{10}) peab olema 0,2-0,5 mm ja ebaühtlustegur (d_{60}/d_{10}) peab olema väiksem kui 5,0. Sisuliselt sobib selleks enamjaolt pestud ja sõelatud piisavalt suure teraga liiv. Materjal ei tohi sisaldada savi, alla 0,1 mm osakesi tohib olla maksimaalselt 0,5 %. Selliste nõuete juures saadakse filterkeha hüdraulilise juhtivuse näitajaks üle 100 m d⁻¹ (Johansson, 1997). Kõrgete nõuete tõttu eelistatakse filtris üha rohkem ka tehispinnaseid. Suure potentsiaaliga on kergkruusa kasutamine filtermaterjalina, eriti Norras välja töötatud kõrge fosfori adsorbtsioonivõimega Filtralite P materjal (Jenssen & Krogstad, 2003).

1.2.2 Kergkruusa kasutamine filtermaterjalina

Kergkruus sobib kasutamiseks pinnasfiltrites tänu oma heale veejuhtivusele, suurele poorsusele, fosfori adsorbtsioonivõimele ja soojustusomadustele. Kergkruusa teravad ääred poolitavad õhumulle väiksemateks osakesteks ja muudavad aeratsiooni efektiivsemaks, omades samas suurt poorsust ja veejuhtivuse võimet (Jenssen & Krogstad, 2003).

Kergkruus on sõmer materjal, mis saadakse savi paisumisel kõrgtemperatuurisel põletusel pöördahjus. Kergkruusa kasutatakse põhiliselt ehitusblokkide tegemisel ja isolatsioonimaterjalina. Viimasel ajal on oluliselt suurenenud kergkruusa kasutamine vee ja reoveepuhastites.

Kergkruusa (tuntud ka KERAMSIIDINA, LECA, EXCLAY, ja FIBO kaubamärkidena) toodetakse Häädemeestel Pärnumaal AS Maxit Estonia tehases. Peale esmast töötlemist põletatakse savi pöördahjus umbes 1150°C juures, mille tulemusel savi paisub ning tänu ahju pöörlemisele muutub keraamilisteks graanuliteks. Graanulid on täis väikseid suletud õhupoore, mis teevad kergkruusast kerge ja suure poorsusega materjali. Tabel 1 annab ülevaate FIBO kergkruusa toote spetsifikatsioonist, kus on välja toodud selle fraktsioonid, tugevus ja hind.

Tabel 1. FIBO kergkruusa toote spetsifikatsioon (www.optiroc.ee, www.ehitusmarket.ee).

Fraktsioon mm	Graanuli mahukaal kg m ⁻³	Survetugevus MPa	Hind kr m ⁻¹ (puistena)
2...4	800...1200	2,0...3,0	460.-
4...10	550...800	1,2...1,4	436.-
10...20	450...650	0,9...1,1	405.-

Keraamilise tootena on kergkruus vastupidav enamike hapete, soolade, leeliste ja õlide mõjudele ning korduvatele jäätumis-sulamisprotsessidele ning selles võib olla vett graanulite pinnal ning neisse imendunult.

Kergkruusal on head eeldused fosfori sidumiseks pinnasfiltrites, kõrge pH (>10), alumiiniumi (>10 mg g⁻¹) ning Ca ja Mg sisaldused (tabelis 2). Põhiline fosfori sidumine toimub kergkruusas kahe mehhanismi toel: sadestumine kaltsiumiga ja sidumine raua ning alumiiniumi ühenditega. Kergkruus on kuni neli korda kergem looduslikust materjalist (kruus, liiv) ja on soodne pinnas mikroorganismide kasvuks (Johansson, 1997). Ainsa negatiivse aspektina võib välja tuua selle kõrge hinna, mis on ligikaudu 400 eek m⁻³, samas kui kruusa hind on 75 eek m⁻³ ja sõelutud liival 100 eek m⁻³ (www.ropkaliiv.ee).

Tabel 2. Kergkruusa FIBO keemiline koostis (AS Maxit Estonia).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	C
62%	18%	7%	4%	3%	3%	2%	0,02%

Eestis on ka kättesaadav AS Maxit Estonia Häädemeeste tehases toodetud Filtralite P, mis on spetsiaalselt veepuhastuseks toodetav kergkruus, milles on Ca lisandi tõttu lisaks bioloogilisele puhastusele ka väga kõrge fosfori (P) adsorbeerimise võime. Materjal on sobiva terasuuruse jaotusega ($d_{10} = 0,3$) ja hüdrauliline läbilaskevõime on võrreldes loodusliku materjaliga paremini tagatud. Materjali toodetakse teraläbimõõduga vahemikus 0-4 mm. Filtralite P fosforisidumise võime on 1,5-2 kgP m⁻³.

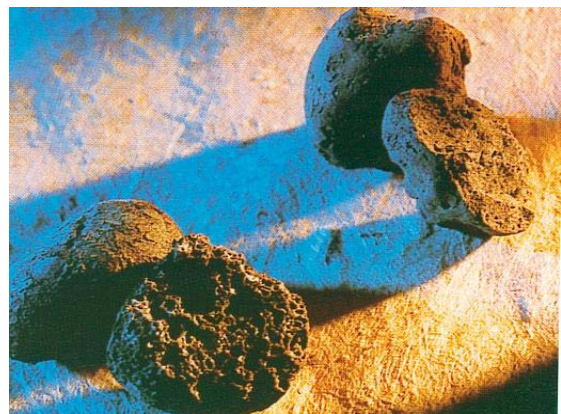
Eestis müüdava Filtralite P kergkruusa hind on 852 krooni 1500 liitrine kott (562 kr m⁻³). Materjali kasutamise kontseptsioon on välja töötatud Norras koostöös Jordforsk uurimiskeskuse ja Norra Põllumajandusülikooliga ning sobib hästi kasutamiseks

pinnasfiltrites, liivafiltrites ja muudes veepuhastussüsteemides. Filtralite P omadused ning toote spetsifikatsioon on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Filtralite P omadused, toote spetsifikatsioon (www.filtalite.com).

	Väärtus	Märkus
Efektiivne terasuurus	0,3 mm	d ₁₀ ligikaudne väärtus
Terasuuruse vahemik	0-4 mm	
Eripind	0,49 m ² g ⁻¹	
Ebäühtluskoefitsent	< 15	d ₆₀ /d ₁₀
Mahumass, kuiv	550 kg m ⁻³	
Terade tihedus, kuiv	950 kg m ⁻³	
Ujuvad osad	<20%	Maht peale 48h vees seismist
Osakeste poorsus	65%	
pH	12	
Soojusjuhtivus	0,1-0,2 W mK ⁻¹	
Leeliselisus	35 mekv l ⁻¹	
Vee adsorbtsioon 1 päev	35%	
Hüdrauliline juhtivus K	100 m d ⁻¹	9°C, puhas vesi
	25 m d ⁻¹	9°C, taimedega filtermaterjal, reovesi, eelpuhastus septikus.

Filtralite P materjali kasutatakse laialdaselt ka Skandinaaviamaades. Norra märgalapuhastite kasutamise juhend (NKF...2001) annab selle materjali baasil ehitatud puhastitele väga kõrged puhastusefektiivsused, seda nii fosfori, lämmastiku kui muude parameetrite osas. Joonisel 2 on näha kergkruusa osakeste suurt poorsust. Norras Filtralite P tehtud katsetel (läbimõõduga 0-4 mm) sidus materjal



Joonis 2. Filtralite P (www.filtalite.com).

laborikatsetel 12 000 mg kg⁻¹ kohta. Projekteerimisel soovitatakse sellest kasutada 50% väärtust. Sidumismahu 8000 mg/kg juures kulub 150 kg Filtralite P, et siduda ühe inimese poolt aastas emiteeritud fosfori hulk ning 1 m³ Filtralite P seob kogu fosfori 3,3 aasta jooksul (tabel 4). Arvestades nelja nädalast viibeaga, kulub 12 m³ Filtralite P ühe inimese kohta, et

tagada fosfori ärastus 40 aasta jooksul (150 l/ie/d, poorsus 35%) (Jenssen&Krogstad, 2003). Samas peab arvestama, et erinevates maades toodetud kergkruusa omadused võivad üksteisest erineda.

Tabel 4. Filtermaterjali maht, mis on vajalik ühe inimese poolt 15 a. jooksul toodetud P sidumiseks (Jenssen, 2001).

	Arvestuslik sidumine mg kg ⁻¹	Tegelik sidumine mg kg ⁻¹	Erikaal g cm ⁻³	m ³ /inimene
Fe rikas liiv	700	700	1,4	9,2
Filtralite P	12 000	2 500	0,7	6,0

Pinnasfiltrites peab filtermaterjali teatud aja tagant fosforiga küllastumise tõttu välja vahetama. Filtralite P fosfaadid on enamasti sadestunud kui kaltsiumfosfaadid, mistõttu saab seda materjali hiljem kasutada fosforväetisena, mis ühtlasi sulgeb fosforiringe ning omab ökoloogilist väärtust (Johansson, 1997).

Puhastuse otstarbeks toodab filtermaterjali Eestis ka Nordkalk (www.nordkalk.com/watergroup). Tooteseeria nimi on Nordkalk Filtra. Materjalide teraläbimõõdud on 2,5-12 mm, erikaal 1000 kg m⁻³, hind tehases 2660 eek t⁻¹ ning 1-5 mm ja 2,5-7 mm, erikaal 800 kg m⁻³ ja hind 4500 eek t⁻¹. Materjali kasutatakse tavaliselt väiksemas koguses ja seda vahetatakse tihedamini välja. Üks m³ puhastab arvestuslikult ühe majapidamise reovee vähemalt ühe aasta jooksul.

1.3 Tehismärgalapuhastite majanduslikkus

Alljärgnevalt saab välja tuua mõned iseloomulikud summad tehismärgalade rajamisel ja eksploatatsioonil, mida rahvusvahelises kirjanduses keskmistena on publitseeritud (IWA, 2000; Jenssen & Krogstad, 2003; Kadlec & Knight, 1996; Cooper et al., 1999). Kuigi riigiti on hinnatasemed erinevad võib neid arve pidada mõistlikeks orientiirideks ka Eestis vastavaid ehitisi planeerides.

Tehismärgalade kasutamine reoveepuhastuses pakub tavalahenduste kõrvale alternatiivi, kus suurema maa-ala kasutamise saadakse väiksem puhastuse energiakulu, seadme mehhaniseeritus ja selle juhtimise vajadus. Tulemuseks annab see madalamad ülalpidamiskulud, mis on oluline reoveepuhastuse kogukulude vähendamisel. Oluline on ka

puhasti keerukusaste ehk mida nõutakse opereerijalt ja kui stabiilselt suudab seade tagada nõutud tulemusi.

Üldreegliks võib pidada, et klassikalist aktiivmudapuhastit on kallim üleval pidada, kui märgalapuhastit ja sellele lähedased tehnoloogiad, kusjuures ehitusmaksumused on mõlemal puhastitüübil enamasti samas suurusjärgus.

Tinglikult võib energiatarve vahetada maa-ala vastu. Sedavõrd, kui maa kasutamine puhastamiseks madala intensiivsusega protsessi näol suureneb, väheneb ka energiakulutus. Samas kui maa-ala vähendada, tuleb osade loomulike protsesside kompenseerimiseks süsteemi energiat juurde lisada (Kadlec & Knight, 1996). Märgalapuhasti rajamine on eelkõige otstarbekas koormusele kuni 2000 ie ning seetõttu on majanduslikult otstarbekas maapiirkondades, kus maa hind on madal ja ei määra olulist osa ehitusmaksumuselt.

1.3.1 Pinnasfiltrid

Pinnasfiltrid on maa ühiku (ha) kohta oluliselt kallimad kui vabaveelised märgalad. Samas töötavad need mitmete näitajate osas efektiivsemalt ning neil on eelised paigutuse ja kohalike kliimatiliste tingimusi arvestades.

Rahvusvahelise veeühingu märgalapuhastite tööühma (IWA...2000) andmetel on Ameerika Ühendriikides pinnasfiltri keskmine maksumus 40 \$ m⁻² (480 kr m⁻²). See on umbes 7 korda kõrgem kui vabaveelise märgala maksumus. Suurbritannias loetakse filtri keskmiseks maksumuseks 100 \$ ha⁻¹ (1200 kr m⁻²), mis sisaldab kõiki kulutusi pinnasfiltri rajamiseks: pinnasetööd, geomembraanid, pumbad, materjal jne.

Erinevate riikide hinnavahe tuleb kasutatavast filtermaterjalist, veokaugusest ja süsteemide suurusest. Eestis annab pinnasfiltri eelarvestamise tulemuseks keskmiselt 1000 kr m⁻² (ÕTK, 2003). Ehitusmaksumus jaguneb *International Water Agency* (2000) andmetel enamasti järgmiselt: pinnasetööd 10%, filtermaterjal 43%, geomembraan 15%, taimestik 11%, veotorustik 6%, kontrollsüsteemid 5% ja muu kulu 10%. Viimase aja tendents näitab geomembraani hinna vähenemist. Eestis rajatud objektides on selle osakaal olnud viimasel ajal ehitusmaksumuselt ca 7%, samas kui mõni aasta tagasi oli see oluliselt kallim (ÕTK, 2003). Suuremad kulutused on peamiselt filterpinnasele, sest sellele esitatakse väga kõrged

nõudmised. Pinnase osa suureneb eelarves, kui süsteemi pindala suureneb, samas torustiku ja geomembraani ehitamise kulu väheneb. Kohaliku filtermaterjali mõistlikuks veokauguseks on kuni 80 km, kuid sageli pole seda võimalik kätte saada või seda tuleb sõeluda ja pesta.

Alternatiivseks lahenduseks filtermaterjali valikul on spetsiaalne tehases toodetud tehismaterjal, nagu näiteks Eestis toodetud AS Maxit Estonia kergkruus ja selle põhjal spetsiaalselt veepuhastuseks loodud toode Filtralite-P. Hinnatase jääb suhteliselt sarnaseks tehases pestud kontrollitud terasuurusega liivale.

Filtri eluiga on piiratud mineraalsete tahkete osakeste akumulatsiooniga filtri pooridesse. Poorid võivad täituda ka biolaguneva materjaliga, kuid see on üldjuhul pinnase hüdrauliliste omaduste nõuetes arvesse võetud. Teise tegurina väheneb pinnase fosfori kinnipidamise võime. Fosforiärastuse nõude puhul saab filtermaterjali vastava sidumisvõime kestvuse üsna täpselt välja arvutada (väljendatuna $\text{kgP m}^{-3} \text{ a}^{-1}$) järgi.

Filtralite P puhul võetakse fosfori sidumisvõimeks nt $1,5\text{-}2 \text{ kgP m}^{-3}$. Looduslikel pinnastel võib see näitaja olla mitmeid kordi madalam. Üks inimene annab aastas arvestuslikult 0,6 kg fosforit. Sellest saab tuletada üsna täpselt ka filtri tööea ehk vastupidi ka selle vajaliku suuruse. Tüüpiliselt kasutatakse $7\text{-}10 \text{ m}^3$ Filtralite P ühe inimese kohta (Jenssen & Krogstad, 2003). Üldjuhul arvestatakse reoveepuhastite (nii konventsionaalsete kui tehismärgalade) elueaks 20-25 aastat.

1.3.2 Ülalpidamiskulud

Võrreldes klassikaliste aktiivmudapuhastitega ei ole tehismärgalas palju hooldust või energiat nõudvaid liikuvaid mehhanisme ning kulud on seetõttu madalamad. Pinnasfiltrite puhul kuulub opereerimiskulude hulka pumpamisele kuluv energia, jääkmuda äravedu või töötlemine, pumpade hooldus, kraavide ja nõlvade hooldamine.

Osa kulutusi on seotud ka puhasti väljanägemise parandamise (niitmine) ja juurdepääsuteede korrashoiuga. Kõikide nende tegevuste summa on ikkagi võrdlemisi väike kulutus. Lisaks ei ole vaja hankida kemikaale ja igapäevast hooldust tegevale personalile ei esitata kõrgeid nõudmisi. Aastane keskmine kulu pinnasfiltrite puhul jääb vahemikku $0,3\text{-}0,7 \text{ \$ m}^{-2}$ või $4\text{-}8 \text{ kr m}^{-2}$ (IWA, 2000).

1.3.3 Kogukulud

Tehismärgala süsteemide puhul saadakse väga suur kulude kokkuhoid madalatest ülalpidamiskuludest. Seega tuleb esmase investeerimisvajaduse kõrval arvesse võtta ka edaspidiseid pidevaid opereerimiskulusid. Projekti kogumaksumus on seega ehitusmaksumus, millele tuleb liita summaarsed kulutused kogu puhasti eluea jooksul.

Selline lähenemine (tuntud ka LCC – *Life Cycle Cost*) on äärmiselt vajalik, kui võrreldavate lahenduste eluiga või ülalpidamiskulud erinevad teineteisest oluliselt, seda nii klassikaliste aktiivmudapuhastite kui ka tehismärgalapuhastite puhul (IWA, 2000).

Sama puhastusjõudluse puhul võib tehismärgalasüsteeme rakendades säästa klassikalise aktiivmudapuhastiga võrreldes 20-30% investeringukulusid ja 40-50% opereerimiskulusid (Euroopa Komisjon, 2001).

1.4 Märgalapuhastite perspektiiv Eestis

Eestis ei ole senini välja kujunenud kindlaid juhendmaterjal või standardeid, millistel alustel tehismärgalasad rajada. Millised võimalused täpselt on ning kui usaldusväärne ja otstarbekas üks või teine lahendus on, vajab loomulikult järk-järgulist täpsustamist, kuid hoiak võiks olla uute ideede suhtes positiivne. Kliimaolud, mis on üks aspekt ja sageli põhiline vastuargument tehismärgalade rajamisele, on projekteerimise juures väga selgelt arvesse võetav. Tõestusmaterjal analoogsete olukordade kohta ja töötavatest puhastussüsteemidest on maailmas olemas. Küsimus on rohkem avatuses ja suutlikkuses uut infot aktsepteerida ja rakendada.

Reaalselt saaks märgalapuhasteid rakendada madalate reostuskoormuse puhul, mis maksimaalselt võiksid olla kuni 2000 ie ning optimaalne suurus oleks 50-500 ie. Seetõttu tuleks ennekõike tähelepanu pöörata maa-asulatele, kus on piisavalt maad ja puhastite uuendamine on aktuaalne ning reostuskoormused väikesed. Peamine argument, mis suurendaks märgalapuhastite rajamist on selle majanduslik põhjendus ehk odavam hind võrreldes teiste puhastussüsteemidega, mis annaks nendele teatud konkurentsieelise.

Käesoleva ajani on Eestis erinevate arendajate poolt uuritud ja rajatud mitmesuguseid märgalapuhasteid, kuid siiani puudub selge ja ühesuunaline vastus küsimusele, milline tehnoloogiline lahendus sobiks Eesti tingimustes kõige paremini? Samuti puudub riigiesindajatel (Keskkonnaministeerium, keskkonnateenistused) ja keskkonnaprojektide finantseerijatel (KIK) terviklik seisukoht antud teemal, sest näiteid ja arvamusi on erinevaid, nii häid kui halbu.

Üldine arusaam märgalapuhastitest on positiivne, sest tegu on looduslähedaste süsteemidega ja nende vajalikkusest saadakse aru, kuid valdavalt puuduvad piisavalt head tõendusmaterjalid ja näited, et antud süsteemid on töökindlad ja võimelised puhastama reovett vastavalt nõuetele. Seetõttu suhtutakse antud teemasse valdavalt kriitiliselt ning eelarvamustega.

Siinkohal tooksin välja enda, kui Keskkonnaministeeriumi veeosakonna spetsialisti ja ühtlasi antud teemat ministeeriumis koordineeriva isiku ülevaate hetkel valitsevatest riigipoolsetest seisukohtadest ja uurimistöödest, mida on tehtud või plaanitakse teha.

Eesmärgiks oleks süsteemse plaani koostamine märgalapuhastite uurimiseks, mis aitaks välja selgita riigipoolse seisukoha märgalapuhastite rakendamise kohta Eestis. Üheks olulisemaks aspektiks oleks sobivaimate tehnoloogiliste lahenduste leidmine ning kindlate standardite või juhendmaterjali väljatöötamine.

Keskkonnaministeeriumi poolt on siiani tellitud rida uurimistöid, mille järgi on saadud esialgne hinnang märgalasüsteemidest ja nende toimimisest. Ökoloogiliste Tehnoloogiate Keskuste poolt koostati 2003. aastal KIK finantseeringul "Ökoloogiliste reoveekäitluse meetodite rakendamise juhend", mis kirjeldab üldiselt erinevaid märgalapuhastite tüüpe ja nende rakendamise võimalusi. Samuti on välja toodud mõningate Eestis rajatud märgalapuhastite näiteid ja nende puhastusefektiivsusi.

2005. aastal valmis uurimustöö, kus Eesti Keskkonnauuringute Keskus analüüsis Häädemeeste, Nabala ja Paistu märgalapuhasti puhastusefektiivsusi kolmel erineval korral võetud ööpäevaste keskmistatud proovide alusel ning anti hinnang rajatud süsteemidele. Antud töö tulemusi olen kasutanud ka oma töö tegemisel. Töö kokkuvõttena võib välja tuua, et Ökoloogiliste Tehnoloogiate Keskuse poolt rajatud Paistu ja Häädemeeste märgalapuhastid toimisid nõuetele vastavalt ning nende tehnoloogiline lahendus ja rajatud objektid olid

korralikud. Samas kui Monoliit AS-i poolt rajatud Nabala märgalapuhasti, millesarnaseid on Eestis veelgi, ei töötanud piisavalt efektiivselt ning selle tehnoloogiline lahendus ja rajatud objektidel esinesid tõsised puudused.

Käesoleval aastal valmib uurimustöö, mille raames kaardistatakse Eestis senini rajatud ning töötavad märgalapuhastid ja teostatakse nende tehniline analüüs. Koostöös arendajate, Info-ja Tehnokeskuse ning keskkonnateenistustega tuvastati Eestis ligi 30 märgalapuhastit, mis on antud töö uurimisobjektid. Arvestades eelnevaid uurimistöid on peagi võimalik luua teatud tervikpilt hetkel Eestis rajatud märgalapuhastitest ning välja töötada standardid või juhendmaterjali, kuidas ja millistel tingimustel on antud süsteemid rakendatavad.

Tervikpildi olemasolul on järgmiseks eesmärgiks kokku koondada erinevad huvirühmad, kes tegelevad märgalasüsteemide uurimise ja arendamisega Eestis, et välja selgitada nende seisukohad ja arenguperspektiivid. Praegusel hetkel on probleemiks see, et erinevad arendajad kasutavad erinevaid tehnoloogilisi lahendusi ja kritiseerivad teravalt teineteist, kuigi tegutsetakse ühtse eesmärgi nimel. Samuti on suureks probleemiks tehnoloogiliselt hea, kuid väga halva ehituskvaliteediga rajatud süsteemid, mis heidavad halba varju teiste arendajate poolt ehitatud süsteemidele. Nimetatud probleemide tõttu on ka riigipoolselt hetkel raske kujundada mingit positiivset seisukohta.

Praegusel hetkel on Eestis palju erinevaid huvirühmasid, kes tegelevad märgalasüsteemide uurimise ja arendamisega:

- Tartu Ülikool, Geograafia instituut eesotsas professor Ülo Manderiga, lisaks veel uus põlvkond Alar Noorvee, Elar Pöldvere, Martin Maddisson, Kaspar Nurk, Christina Vohla jne.
- Ökoloogiliste Tehnoloogiate Keskus eesotsas doktor Tõnu Muringu ja Marek Strandbergiga, kes küll praegusel hetkel aktuaalselt enam selle teemaga ei tegele.
- Eesti Põllumajandusülikool, Zooloogia ja Botaanika Instituut eesotsas Katrin Heinsooga.
- Tallinna Tehnikaülikool, Keskkonnatehnika instituut, eesotsas professor Enn Loigu ja Aare Kuusikuga.
- AS Monoliit eesotsas Jaak Reinmetsa ja doktor Aleksander Heintalu (Vigala Sass).

- Erinevad keskkonnehitusega tegelevad ettevõtted (AS Kobras, Veemaaailm INC, AS K&H jne).

Samuti peaks mainima, et arendajad võiksid olla aktiivsemad oma projektide ja uurimistööde laiema kõlapinna leidmisel sh riigi ja maakonna tasandil. Paljud arendajad on oma uurimistöid ja projekte laialdaselt tutvustanud välisriikides, sh konverentsidel ja teadusajakirjades ning saanud toetust Euroopa Liidult, mis on kahtlemata väga oluline teaduslikus mõttes. Samas kui Eestis on info levitamine olnud madal, eelkõige mis puudutab oma projektide tutvustamist keskkonnateenistuste ja Keskkonnaministeeriumi esindajatele ja teistele huvirühmadele, mis kindlasti suurendaks teadlikkust antud valdkonnas.

Viimase aja üheks edusammuks võiks pidada Ettevõtte Arendamise Sihtasutuse poolt Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi uurimiserühmale (uurimisgrupi juht prof. Ü. Mander) eraldatud abiraha, mille tulemusena valmib uurimusprojekt, mille eesmärgiks on külmas kliimas kasutamiseks sobiliku kompaktselt kombineeritud tehismärgalapuhasti prototüübi, projekteerimismudelite ja optimeerimismeetodite väljatöötamine. Antud uurimistöö tulemusi tuleks kindlasti rakendada ka praktilise väljundina ehk siis realselt antud projekteerimistingimusi rakendada ja tutvustada seda erinevatele huvirühmadele ja arendajatele, et aidata välja töötada juhendmaterjali süsteemide rakendatavuse kohta.

1.4.1 Seosed seadusandlusega

Siinkohal tooksin välja Eestis kehtiva seadusandluses, mis reguleerib märgalasüsteemide arendamist, positiivsed ja negatiivsed jooned. Märgalapuhasteid saaks realselt rakendada madala reostuskoormuse puhul, mis seadusandlikus mõistes on kuni 2000 ie. Eestis on üle 2000 ie asulaid ligikaudu 60, seega on märgalapuhastite rajamiseks perspektiivikad maapiirkondade väikeasulad, kus ei ole piiravaks faktoriks kõrge maa hind. Info-ja Tehnokeskuse andmetel on Eestis ligi 800 väikepuhastit, millest hinnanguliselt 50% vajavad renoveerimist. See näitab, et märgalapuhastite rajamiseks on piisavalt võimalusi.

Vastavalt kehtivale Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001. a määrusele nr 269 „Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord“ tuleb väikese reostuskoormusega (kuni 2000 ie) reostusallikatest pärinev reovesi enne veekogusse juhtimist puhastada nii, et see vastaks vee erikasutusloas nõutavatele heitvee reostusnäitajate piirväärtustele või reovee

puhastusastmetele, mis ei tohi olla karmimad näitajatest, mis kehtivad reostuskoormuse 2000-9999 ie kohta. Samuti peab olema tagatud fosforiärastus reostustundlikku suublasse juhitud heitveest, milleks on keskkonnaministri määruses nr 65 "Heitveesuublane kasutatavate veekogude või nende osade nimekirja reostustundlikkuse järgi kinnitamine" väljatoodud nimekirja kuuluvad suublad.

Vastavalt kehtestatud piirmääradele on lämmastikuärastus Eestis kohustuslik alates 10 000 ie suurusest koormusest ja fosforiärastus teatud tingimustel (reostustundlik suubla). Seega ei ole lämmastiku ärastamine tehismärgalades Eesti mõistes kõige olulisem protsess ning teatud tingimustel ka fosfor.

Seega on väikese reostuskoormuse puhul kõige olulisem eraldi reoveest järgnevad komponendid, mille piirnormid ei tohi olla rangemad kui BHT7 15 mg l⁻¹, HA 25 mg l⁻¹ ja teatud tingimustel üldfosfor 1,5 mg l⁻¹. Valdavalt kehtestavad keskkonnateenistused aga vee erikasutusloaga isegi leebemad nõuded.

Siiani on märgalasüsteemide uurimisel keskendunud kõikide märgalas toimivate protsessidele ja toitainete ärastamisele, kuid praktilisest seisukohast lähtudes oleks eelkõige vaja keskenduda vastavalt nõuetele ärastamist vajavate parameetrite osas. Samuti oleks vaja välja töötada lihtsa tehnoloogilise lahenduse ja madala ehitusmaksimumusega märgalapuhastite projekteerimistingimuste juhendmaterjali, et suurendada süsteemide usaldusväärsust ning konkurentsivõimet võrreldes teiste puhastusseadmetega.

Lisaks toaksin siinkohal välja võimalikud arengusuunad seadusandluses seoses reoveepuhastite kehtestatud nõuetega. Vastavalt Euroopa Nõukogu asulareovee direktiivile (*ingl k. Urban Waste Water Directive, 91/271/EEC*), mis on ülimuslik kohaliku seadusandluse suhtes, tuleb alla 2000 ie reostuskoormuse puhul rakendada piisavat puhastusastet (*ingl k. appropriate treatment*). Täpsemad kriteeriumid määratakse seetõttu siseriikliku seadusandlusega, sest neid nõudeid direktiiv alla 2000 ie reostuskoormuse puhul ei sätesta.

Käesoleval aastal töötatakse välja ja jõustub uus veeseadus, mistõttu muudetakse ka kõiki selle alamakte, sealjuures Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001. a määrust nr 269 „Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord“. Antud määruse muutmise töögrupp hakkab tööle selle aasta kevadel, kuhu on ka minul võimalus kuuluda. Seniseid kogemusi arvestades on

Keskkonnaministeeriumi veeosakonna eesmärgiks leevendada kehtestatud tingimusi eelkõige väikese reostuskoormusega reoveepuhastite (kuni 2000 ie) kohta, sest senised kehtivad normatiivid on põhjendamatult ranged. Eelkõige puudutab see fosfori ärastamise nõude eemaldamist ja teiste parameetrite leevendamist, mis seniste kogemuste põhjal on olnud põhjendamatult kulukad ja keerukad protsessid, millele väikepuhastid peavad vastama. Seda enam, et asulareovee direktiiv kehtestab, et fosfori ja lämmastikuärastus on kohustuslik alates 10 000 ie koormusest reostustundliku suubla puhul.

Samuti on tõenäoline üleminek piinormide kehtestamisest reovee puhastusastme nõudele, mis toetab Euroopa Nõukogu Veepoliitika Raamdirektiivi (*ingl. k. Water Framework Directive 2000/60/EC*) nõuet, milleks on Eestis veekogude hea kvaliteediklassi saavutamine. Samuti on Eesti riik Euroopa Komisjonile deklareerinud, et kogu meie territoorium on reostustundlik. Tulenevalt sellest oleks meil lähitulevikus kohustus kehtestada fosfori ärastamise nõue kõikidele reoveekogumisaladele, mis oleks aga põhjendamatult range ja kulukas tingimus.

Kokkuvõtvalt võiks öelda, et tulenevalt praegusest seadusandlusest ja selle võimalikust muudatustest avanevad märgalapuhastite rajamisele suuremad võimalused. Seetõttu võib märgalapuhasti tehnoloogiline lahendus olla tunduvalt töökindlam ja lihtsam ning eelkõige odavam, mis saab olla peamine argument selle eelistamisel klassikalistele puhastussüsteemidele.

2. PAISTU PÕHIKOOLI PINNASFILTER

Paistu põhikooli taimestik-pinnasfilter paikneb Sultsi külas, Paistu vallas, Viljandimaal. Märjalapuhasti kogupindala on 432 m² ning see koosneb kahest pinnasfiltrist (joonis 3). Süsteemi projekteeris OÜ Bionext, eesotsas dr. Tõnu Muringuga. Pinnasfiltri rajamist finantseeris Paistu vald ja KIK ning see valmis 2002. a. suvel. Puhasti vajadus tulenes uue spordihoone rajamisest koolile ning seetõttu suurenenud reostuskoormusest.

2.1 Märjalapuhasti tehniline kirjeldus

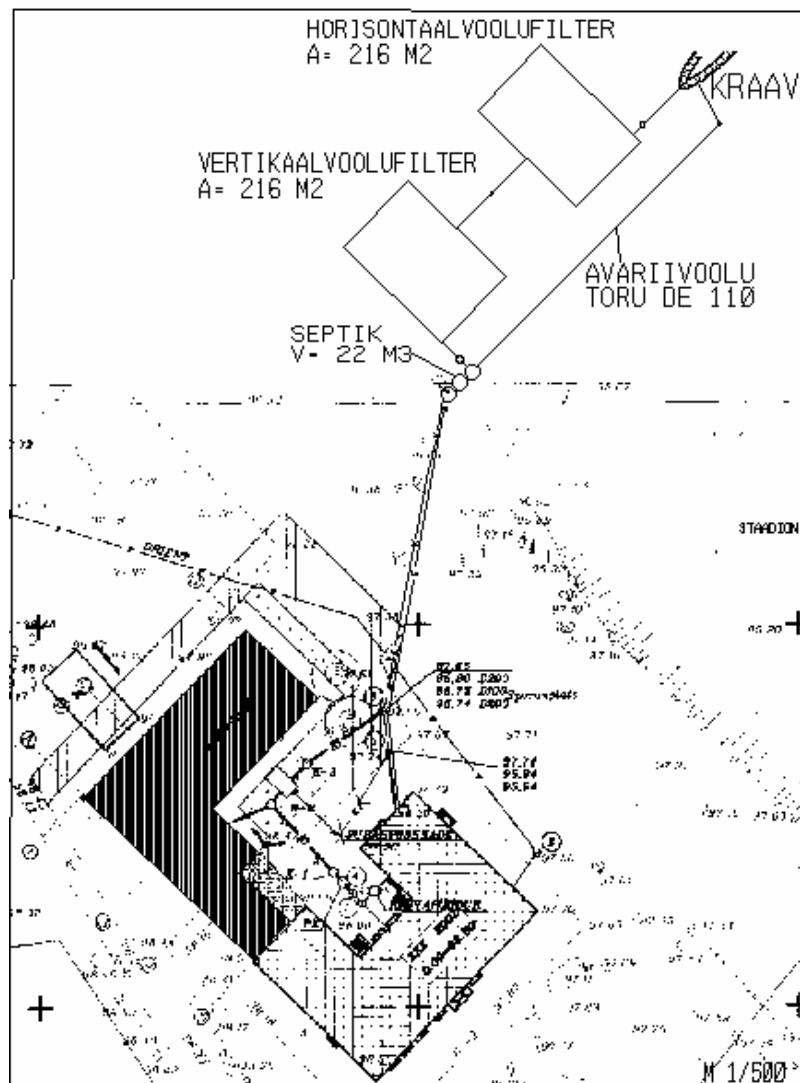
Pinnasfilter puhastab 140 õpilasega ja 20 õpetajaga põhikooli olmereovee, mis annab kirjanduse andmetel (Kuusik, 1995) reostuskoormuseks ligikaudu 64 ie (kasutades erireostust 0,4 ie inimene⁻¹) ja 6,4 m³ d⁻¹ suuruse vooluhulga (kasutades vee erikuluks 40 l d⁻¹ inimene⁻¹). Suurem osa reostuskoormusest tuleb kooli sööklast ja spordihoone juurde ehitatud dušširuumidest, mida kasutavad õhtuti ka väljastpoolt kooli tulnud inimesed. Arvestades eelpool väljatoodud andmetega on puhastussüsteemi arvutuslikuks koormuseks 6,8 m² ie⁻¹ kohta, mis on kirjanduse andmeil (Kadlec & Knight, 1996) hübriidsüsteemi keskmisest väärtusest natuke kõrgem (4-5 m² ie⁻¹).



Joonis 3. Paistu märjalapuhasti üldvaade 17. jaanuaril 2004. Esiplaanil on murukihiga kaetud vertikaalfilter, selle järel pilliroostikutega horisontaalfilter, kaugemal paistab äravoolukraav.

Projekteerimisel oli oluliseks tingimuseks suur vooluhulkade kõikumine ning asjaolu, et kooli vaheaegadel lakkab reovee pealevool üldse. Tehismärgala on ette nähtud töötama arvestusliku vooluhulgaga $10,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ja tunni maksimaalse vooluhulgaga $2,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (OÜ Bionext, 2002). Sama projektlahendusega pinnasfilter ehitati paralleelselt 10 km eemal asuva Holstre põhikooli juurde. Seega saab antud töö tulemusi üldistada mõlema puhastussüsteemi kohta. Üheks alternatiiviks märgalapuhastile oli ka väikese aktiivmudapuhasti rajamine, kuid majanduslik ja tehniline analüüs näitas pinnasfiltri rajamise eeliseid.

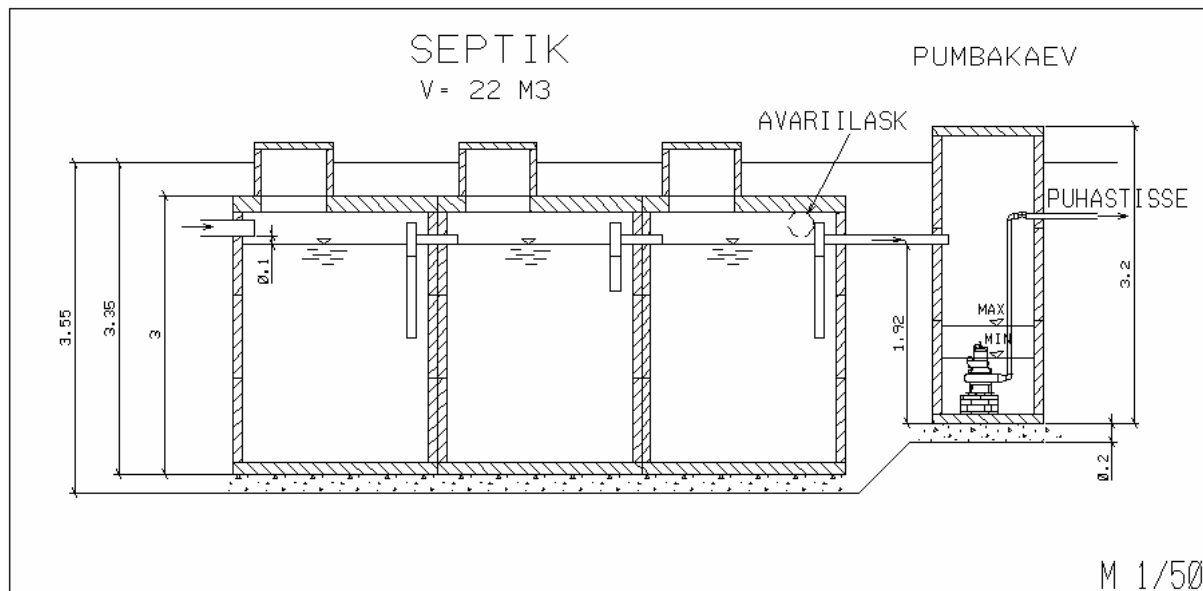
Paistu Põhikooli reovesi puhastatakse esmalt mehhaaniliselt rasvapüüdjas (jõudlusega 1 l s^{-1}) ja seejärel septikus mahuga 22 m^3 . Septikut läbinud heitvesi juhitakse pumbakaevu, kust see pumbatakse (pumba võimsus 1 kW) kaheosalisse Fibo kergkruusaga täidetud taimestikpinnasfiltrisse (joonis 4).



Joonis 4. Paistu põhikooli märgalapuhasti asendiskeem.

Septik on ehitatud raudbetoonelementidest 3 kambriks ning see on paigaldatud 3,5 m sügavusele süvendisse. Kaevuelemendid ja kaevupõhi ning teised liitekohad ja toruühendused on muudetud veekindlaks. Juhuks kui pumba töös peaks esinema häireid, rajati avariivool, mis juhib avari korral reovee septikust otse väljavoolu kraavi. Töökindla ning vettpidava eelpuhastuse rajamine märgalapuhastile on väga suureks eelduseks, et süsteem korrektselt tööle hakkas. Eestis on rajatud mitmeid tehniliselt korralikke märgalapuhasteid, kuid millele on jäetud alles vanad eelpuhastussüsteemid ning seepärast ei saavutata oodatud tulemusi, näiteks Kõo asula märgalapuhasti.

Pumbakaev, kust juhitakse septikust tulnud heitvesi edasi pinnasfiltritesse on ehitatud raudbetoonist läbimõõduga 1 m ja sügavusega 3 m (joonis 5). Kaevu on paigaldatu reoveepump võimsusega 0,74 kW ($Q=1 \text{ l sek}^{-1}$) ja niiskuskindel elektrikilp (OÜ Bionext, 2002). Pumba ülesanne on tagada vertikaalfiltri vahelduv koormamine, mis on reguleeritud pumba lülitina toimiva ujuki kõrgusega. Kõrge hapnikuga varustatuse tagamiseks on väga oluline koormata pinnasfiltrit vahelduvalt minimaalselt 2-3- tunnise intervalliga (Laber et al., 2002).



Joonis 5. Septiku ja pumbakaevu konstruktsioon (OÜ Bionext, 2002).

Esimene pinnasfiltri osa on vertikaalvooluline ja koosneb kahest peenrast, mida koormatakse kordamööda. Koormatavaid pooli vahetatakse iga 3 päeva tagant pumbakaevus asuva kraani abil. Vertikaalvoolulisele filtrile on kasulik anda aeg-ajalt puhkust, see parandab aeratsiooniefektiivsust ning vähendab ummistumisprobleeme (Cooper, 1999).

Vertikaalvoolulise pinnasfiltri mõõtmed on järgmised: pikkus 18 m, laius 12 m ja sügavus 1,2 m. Esimese pinnafiltri kogupindala on 216 m² ning selle ülesandeks on hapniku andmine vette ja seega esmaste oksüdeerimisprotsesside soodustamine. Samas on pideva koormuse all vaid 50% vertikaalvoolulisest pinnasfiltrist ehk ligikaudu 105 m², mida arvestati puhasti projekteerimisel.

Pärast vertikaalvoolulist pinnasfiltrit juhitakse heitvesi läbi kontrollkaevu edasi horisontaalvoolulisse pinnasfiltrisse, millele on istutatud 100 pilliroo taime (*Phragmites australis*). Pinnasfiltri mõõtmed on järgmised: pikkus 18 m, laius 12 m ja sügavus 0,8 m. Teise pinnafiltri kogupindala on samuti 216 m² ning selle ülesandeks on koos pikema viibeaja ja aeglase läbivooluga rohkem aega nõudvate protsesside soodustamine.

Horisontaalvoolulisest pinnasfiltrist juhitakse heitvesi 1 m läbimõõdu ja 2 meetri sügavusse raudbetoonist kontrollkaevu, kust saab ühendusmuhvide abil reguleerida viimase filtri veetaset. Kontrollkaevust juhitakse heitvesi edasi väljavoolu kraavi. Joonisel 6 on välja toodud pinnasfiltrite ehitusfaas, kus on näha erinevate fraktsiooniga filtermaterjali kasutamist.



Joonis 6. Vasakpoolsel joonisel on näha jämekillustiku ja kergkruusaga täidetud vertikaalfiltrit ning parempoolsel geomembraaniga isoleeritud ja jämekruusaga täidetud horisontaalfiltrit.

Filterpinnaseks on mõlemas pinnasfiltris Fibo kergkruus (tootja AS Maxit Estonia). Vertikaalvoolulisel pinnasfiltril on pealmine kiht fraktsiooniga 2-4 mm ja alumine 10-20 mm, mis peaksid tagama paremad aeratsioonitingimused ning vähendada ummistumisohtu. Horisontaalvoolulises pinnasfiltris on kogu ulatuses kasutatud 2-4 mm fraktsiooniga kergkruusa. Filtrite jaotus ning kogumistsoonid on täidetud 100 m³ jämekillustikuga, fraktsioon 40-80 mm (vt. joonis 9). Kokku on puhastussüsteemis Fibo kergkruusa maht 300 m³, millest 50% on fraktsiooniga 10-20 mm ja 50% fraktsiooniga 2-4 mm.

Mõlemad pinnasfiltrid on isoleeritud teineteisest ja ümbritsevast pinnasest ning külgedelt 0,5 mm paksuse EPDM membraaniga, mis peab takistama vee sattumist süsteemi ja vastupidi. Esimene vertikaalfilter on kaetud filterkanga, 20 cm huumuskihiga ja muruga, et vältida talvisel perioodil (eriti koolivaheajal) külmumisohtu (vt. joonis 9). Selline lahendus vähendab küll hapnikuga varustatust, sest õhuhapnik ei pääse pinnasele ligi, kuid on eelkõige vajalik külmumisohtu vähendamiseks (Laber et al., 2002).

Filtrite jaotus- ja kogumistorustik on ehitatud 110 mm läbimõõduga plasttorudest, mis on augustatud 12 mm avadega iga 0,5 m järel. Vertikaalvoolulises pinnasfiltris on kummaski pooles kuus 7 meetrist perforeeritud jaotustoru (kokku 12 tk) ja kogumistsoonis üks 16 meetrine (vt. joonis 8) jämekillustikuga ümbritsetud kogumistoru (OÜ Bionext, 2002).

Horisontaalvoolulises pinnasfiltris on üks 18 meetrine jaotustoru paigaldatud 40 cm sügavusele jämekillustiku sisse ning kogumistsoonis on 16 meetrine jämekillustikuga ümbritsetud perforeeritud plasttoru. Külmumise vältimiseks on jaotus- ja kogumistorud varustatud tuulutustorudega, et õhk pääseks torudesse, mis kiirendab torude tühjenemist heitveest (Laber et al., 2002). Tabelis 5 on välja toodud Paistu puhastussüsteemi rajamiseks kulunud materjalide kogus ja selle maksumus.

Tabel 5. Paistu põhikooli puhastussüsteemi tööde ning materjalide spetsifikatsioon ja ligikaudne maksumus (OÜ Bionext, 2002).

Jrk	Nimetus	Kogus	Ühiku hind	Summa kr
I	EHITUSPLATSI ÜLDKULUD		Obj.	5 000
II	VÄLISKANALISATSIOON			
	Vabavooluline kanalisatsioonitorustik De 160	45	600 kr m ⁻¹	27 000
	Plastkaev De 630/548	3	2500 kr tk ⁻¹	7 500
	Vabavooluline kanalisatsioonitorustik De 110	51	50 kr m ⁻¹	2 550
	Survetoru De 50	36	50 kr m ⁻¹	1 800
	Elektri toitekaabel	100	90 kr jm ⁻¹	9 000
III	MEHAANILINE EELPUHASTUS			
	Rasvapüüdur (jõudlus 1 l/s)+ehitustööd	1	tk.	25 000
	Septik (22 m ³)+ehitustööd	1	tk.	45 000
IV	TAIMESTIK-PINNASFILTER			
	Kaevetööd koos pinnase äraveoga	494	24,3 kr m ⁻³	12 000
	0,5 mm HDPE geomembraan	667	46,2 kr m ⁻²	30 780
	Filterkangas II klass	634	23 kr m ⁻³	14 850
	De 110 jaotus ja kogumistorustik	182	66 kr m ⁻¹	12 000
	40...70 mm jämekillustik	100	290 kr m ⁻³	29 000
	Fibo kergkruus 10...20 mm	152	371 kr m ⁻³	56 400
	Fibo kergkruus 2...4 mm	152	371 kr m ⁻³	56 400
	Sissevoolu jaotuskaev De 630/548 + pump 0,74 kW	1	tk	7 500
	Väljavoolukaev De 630/548	1	tk.	2 500
	Pillirootaimede istutamine	70	obj.	9 500
	Elektrikilp	1	tk	2 000
V	HALJASTUS JA KATTED			
	Vertikaalplaneerimine	500	5 kr m ⁻²	2 500
	Haljastus	500	5 kr m ⁻²	2500
	Muud tööd (sh asfaldi taastus)		obj.	6 000
			KOKKU	366 780.-
			Käibemaks	66 020.-
			KÕIK KOKKU	432 800.-

Paistu pinnasfiltri 1 m² maksumus oli ligikaudselt 1000 krooni, mis on keskmine suurus taoliste pinnasfiltrite rajamisel Eestis. Seejuures filtermaterjali maksumus moodustas 39% ja geomembraani oma ainult 8% kogumaksumusest, mis näitab pinnasmaterjali suurt osatähtsust puhastussüsteemis. Tavalise pinnasmaterjali kasutamise (kruus, liiv) puhul oleks saavutatud oluline hinnaeelis, kuid seeläbi oleks tõenäoliselt kannatanud süsteemi puhastusefektiivsus. Analoogete koormusega kompaktpuhasti rajamine koos kõikide ehitustööde maksab Shöttli Keskkonnatehnika AS andmetel ligikaudselt 390 000 krooni. Antud hinnavõrdlus näitab, et taolised süsteemid saavad majanduslikus mõttes edukalt konkureerida tehases kokkupandud kompaktpuhastitega.

Visuaalsel vaatlusel on puhasti sõlmed ja seadmed kõikide mõõtmiskordade ajal tehniliselt korras olnud. Kooli ja Paistu valla esindajate sõnul ei ole puhastusseadmete töös seni probleeme esinenud, seda nii soojal kui külmal perioodil. Seadmed valmisid 2002. aasta suvel. Seega on need probleemivabalt töötanud peaaegu kolm aastat.



Joonis 7. Vertikaal-ja horisontaalvoolulise pinnasfiltri külgvaade (suvi 2004).

Antud märgalapuhastit võiks pidada Eesti üheks kõige korralikumalt rajatud ning väga hästi funktsioneerivaks märgalapuhastiks (joonis 7). Samuti tasub eraldi märkida, et süsteem näeb väga hea välja ning sulandub hästi ümbritsevasse keskkonda. Paistu märgalapuhastit saab edukalt demonstreerida kui pilootprojekti suurematele koormustele mõeldud märgalasüsteemide rajamiseks. Ainsa puudusena võiks välja tuua, et süsteemi projekteerimisel pole arvestatud proovivõtjatega, sest proovide kogumine puhastussüsteemist on üsna komplitseeritud.

2.1 Märgalapuhasti hooldus

Puhasti hooldustööd seisnevad rasvapüüduuri ja septiku tühjendamises ning vertikaalfiltri koormamise vaheldamises (kraanide avamises-sulgemises). Rasvapüüdurist eemaldatakse rasv vastavalt vajadusele. Septikut peaks tühjendama vastavalt puhasti hooldusjuhendile vähemalt kord aastas paakautoga väljajätmise teel (OÜ Bionext, 2002). Samas peab mainima, et siiani on seda tehtud vaid ühe korra (juuni, 2004), osaliselt on see tingitud väikesest reovee koormusest ja teisalt haldajapoolsest oskamatusel. Paraku võib selline hoolimatu käitumine viia puhasti ummistumiseni, mida tuleks igal juhul vältida. Taimestik pinnasfiltri ümbruses niidetakse ka muru.

Horisontaalfiltris hoiti 6 kuud pärast puhasti tööleandmist veetase filtermaterjaliga samal tasemel, et pilliroo taimed kasvama läheksid. Talveperioodil reguleeritakse pinnasfiltrite veetase 0,4 m kõrguseks põhjast. Suviti reguleeritakse töökõrguseks 0,8 m põhjast. Veekõrgust reguleeritakse pinnasfiltri väljavoolukaevus olevate ühendusmuhvide abil.

Puhastusseadmetel puudub oma elektriarvesti. Kool tasub energia eest koolimaja ja puhasti ühise arvesti näitude alusel. Ei ole teada, milline osa energiakulust tuleneb puhasti reoveepumba tööst ja milline osa kulub koolimajas.

2.2 Nõuded veekvaliteedile

Paistu Põhikooli veekasutust peetakse Viljandimaa Keskkonnateenistuse poolt sedavõrd väikeseks (alla 10 m³), et sellel ei ole vee erikasutusluba nõutud, samuti puudub väljalaske kood. Viljandi Keskkonnateenistuse andmetel puudub Paistu Põhikooli heitveel suubla. Heitvesi juhitakse kraavi, mis algab puhasti läheduses ja on ligikaudu 1 km pikkune. See kraav lõpeb ilma veekogusse suubumata, seega imendub heitvesi pinnasesse.

Vastavalt Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001. a määrusega nr 269 "Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord" paragrahv 10 lõike 2 alusel võib heitvett immutada pinnasesse, v.a veehaarde sanitaarkaitsealal ja mitte lähemal kui 50 m selle välispiirist, järgmistes kogustes:

- 10-50 m³ ööpäevas pärast reovee bioloogilist puhastamist;
- kuni 10 m³ ööpäevas pärast reovee mehaanilist puhastamist.

Paistu pinnasfiltrite puhul on tegemist bioloogilise puhastamisega, seega on lubatud pinnasesse juhtida kuni 50 m³ heitvett. Samas puudub puhastil vee erikasutusluba, kus peaks olema täpsustatud heitvee pinnasesse juhtimise nõuded (veehulk pindalaühiku kohta, piirnormid jm).

Kuna reoveepuhastil puudub vee erikasutusluba, siis võtan oma töö analüüsimisel aluseks Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001. a määruse nr 269 normatiivid, mis kehtivad puhastusseadmele 2 000 - 9 999 ie ning arvestades, et tegu on reostustundliku suubлага ning fosforiärastus on samuti nõutud (tabel 6). Analüüside eesmärgiks on demonstreerida puhastusseadme suutlikkus tagada ka kõrgemaid piirnorme, kui parasjagu Eestis kehtivad.

Tabel 6. Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001. a määruse nr 269 “Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord” piirnormid puhastusseadmetele 2000-9000 ie (RT I, 69, 424).

Reostusnäitaja	Reostusnäitaja piirväärtus, mg l ⁻¹	Reovee puhastusaste, %
BHT ₇	15	Suurem/võrdne 90
Hõljuvaine	25	Suurem/võrdne 80
Üldfosfor	1,5	Suurem/võrdne 80
Üldlämmastik	Ei ole piiratud	Ei ole piiratud

2.3 Märjalapuhasti dimensioneerimine

Võrdlemaks rajatud süsteemi suuruse vastavust reaalse vajadusega, kasutame analüüsist saadud lähteandmeid (vooluhulk, reostuskoormused) ning arvutame välja vajaliku pindala. Siinkohal peab nentima, et kompleksseid arvutusmudeleid hübriidsüsteemide dimensioneerimiseks praktiliselt puuduvad ning seetõttu tuleb teha üldistusi ning süsteemi kujundada etappide kaupa. Seetõttu on märjalapuhastite dimensioneerimisel vaja omanda varasemaid kogemusi ja põhjalikke tehnilisi teadmisi.

Esimese vertikaalvoolulise pinnasfiltri dimensioneerimiseks kasutame Kadleci & Knighti (1996) poolt välja pakutud vertikaalvoolulise pinnasfiltri pindala arvutamise valemit:

$$A = Q / k * [(C_i - C^*) / (C_e - C^*)], \quad (2)$$

kus:

A = nõutud filtri pindala (m^2)
 Q = reovee vooluhulk ($m^3 d^{-1}$)
 C_e = väljavoolu sihtkontsentratsioon ($mg l^{-1}$)
 C_i = sissevoolukontsentratsioon ($mg l^{-1}$)
 C^* = taustkontsentratsioon ($mg l^{-1}$)
 k = esimest järku pindalapõhine kiiruskonstant ($m d^{-1}$)

Arvestades puhastussüsteemi keskmiseks vooluhulgaks $6,9 m^3 d^{-1}$ ja sissevoolu kontsentratsiooniks $86,2 mg l^{-1}$ ning väljavoolu kontsentratsiooniks arvestame 60% vähenemise ehk $34,5 mg l^{-1}$. Taustkontsentratsioon on 0 ja esimest järku kiiruskonstanti keskmiseks väärtuseks arvestame $0,1 m d^{-1}$ (Cooper et al., 1999). Antud juhul annab valem 2 järgmise lahenduse:

$$A = \frac{6,9}{0,1} \times \frac{(86,2 - 0)}{(34,5 - 0)} = 172 \cdot m^2$$

Kadleci & Knighti (1996) valemit kasutades saadi vajalikuks vertikaalvoolulise pinnasfiltri pindalaks $172 m^2$, mis on võrreldes rajatud süsteemiga $\frac{1}{4}$ võrra väiksem. Samas kui arvestada, et korraga kasutatakse vaid 50% esimese filtri pindalast on saadud tulemus võrreldav rajatud süsteemiga.

Teise astme horisontaalvoolulise pinnasfiltri dimensioneerimisel arvestame 60% BHT₇ vähenemisega ning pindala määramiseks kasutame Kickuth (1972) valemit:

$$A_h = Q_d (\ln C_0 - \ln C_1) / K_{BHT} \quad (3)$$

kus:

A_h = pinnasfiltri pindala (m^2)
 Q_d = keskmine vooluhulk ($m^3 d^{-1}$)
 C_0 = BHT₅ sissevoolus ($mg l^{-1}$)
 C_1 = BHT₅ väljavoolus ($mg l^{-1}$)
 K_{BHT} = kiiruskonstant ($m d^{-1}$)

Arvestades teise astme horisontaalvoolulise pinnasfiltri sissevoolu kontsentratsiooniks 40% väärtuse sissevoolust ehk $34,5 mg l^{-1}$ ning väljavooluks $10 mg l^{-1}$. K_{BHT} kiiruskonstandiks

võib kirjanduse allikatel (Cooper et al., 1999) kasutada $1,2 \text{ m d}^{-1}$. Antud juhul saab valem 3 järgmise lahenduse:

$$A = \frac{6,9 \times (\ln 34,5 - \ln 10)}{0,1} = 214 \cdot \text{m}^2$$

Antud valemit kasutades saame horisontaalse pinnasfiltri suuruseks 214 m^2 , mis on täpselt sama suur kui rajatud süsteem. Süsteemi arvutuslikuks koormuseks on $6,8 \text{ m}^2 \text{ ie}^{-1}$ kohta, mis on kirjanduse andmeil (Kadlec & Knight, 1996) keskmisest väärtusest natuke kõrgem ($4\text{-}5 \text{ m}^2 \text{ ie}^{-1}$). Järeldusena võiksime märkida, et rajatud süsteem on teatud määral üledimensioneeritud, mida näitavad nii viibeaja pikkus kui arvutamisel selgunud andmed. Samas tagab optimaalne üledimensioneeritus piisava puhastusefektiivsuse koormuste suurenemise korral.

3. MATERJAL JA METOODIKA

Magistritöös on puhastusprotsesside analüüsimisel kasutatud Paistu märgalapuhasti seireandmeid, mis on kogutud ajavahemikul 28.11.2003 kuni 18.01.2005 kümnel korral. Seireandmetena on kasutatud reovee puhastusefektiivsusi ning kohapeal määratud portatiivseid andmeid ja vooluhulkasid. Proove on võetud järgmistest proovivõtupunktidest (vt joonis 4):

- sissevool vertikaalvoolulisse pinnafiltrisse;
- väljavool horisontaalvoolulisest pinnasfiltrist.

Töö üheks eesmärgiks on analüüsida puhastusprotsesse ning uurida, kas süsteem suudab täita p 2.2 väljatoodud veekvaliteedile esitatud nõudeid (BHT₇, HA, ÜldP).

Valdav osa seireandmetest on kogutud Tartu Ülikool Geograafia Instituudi loodusgeograafia ja maastikuökoloogia korralise professori Ülo Manderi eestvedamisel EU projektide INCO nr. ERBIC-CT96-0100 ja 5FP RTD projekti PRIMROSE (EVK1.CT-2000-00065) raames. Välitöödel osalesid Antti Tooming ning atesteeritud proovivõtja Elar Põldvere Tartu Ülikooli Geograafia instituudist. Lisaks on töös kasutatud Viljandimaa Keskkonnateenistuse ja OÜ Keskkonnauuringute Keskus poolt kogutud seireandmeid.

Lisaväärtusena on töös kasutatud OÜ Keskkonnauuringute Keskuse poolt kolmel korral (18.-19.04.2004; 29.-30.04.2005; 18.-19.01.2005) kogutud ööpäevaseid keskmistatud reo- ja heitveeproove ning ööpäeva keskmistatud vooluhulgad Paistu puhastussüsteemist.

3.1 Reo- ja heitveeproovide mõõtmine ning analüüsimine

Reo- ja heitvee üksikproove on võetud üheliitrilise anumaga, mille sisu kallati 1,5 liitristesse labori proovipudelitesse, millega need laborisse toimetati. Heitvee keskmistatud proovide võtmiseks sisse- ja väljavoolust kasutati kaasaskantavat peristaltilist proovivõtjat, mis programmeeriti tööle aegproportsionaalses režiimis. Iga 15 minuti möödumisel haaras proovivõtja kindla koguse reovett ja segas saadud portsjonitest ööpäevase proovi (KUK... 2005).

Proovivõtukohtade koordinaadid määrati kohapeal GPS-seadme abil, mille järgi saadi järgmised tulemused:

- sissevool 58° 14,493 N; 25° 35,553 E;
- väljavool 58° 14,519 N; 25° 35,584 E.

Heitveeproovide analüüsid on määratud Tartu Veevärk AS-i ning Keskkonnauuringute Keskuse Tallinna ja Pärnu laborites, rahvusvahelist tunnustust leidnud meetodite abil. Nimetatud laborid on kõik akrediteeritud ning osalevad rahvusvahelistes võrdluskatsetes.

Reo- ja heitveeproovides määrati pH, hõljuvainet (HA, mg l⁻¹), bioloogilist hapnikutarvet (BHT₇, mgO₂ l⁻¹), fosfaatfosforit (PO₄-P, mgP l⁻¹) ja üldfosforit (P üld, mg l⁻¹) vastavalt tabelis 7 esitatud meetodikale.

Tabel 7. Töö käigus kogutud lähteandmete määramismeetodid (AS Tartu Veevärk).

Komponent	Meetod	Ühik
BHT ₇	ISO 5815	mgO ₂ l ⁻¹
Üldfosfor (P _{üld})	ISO 6878-1	mg l ⁻¹
Fosfaadid (PO ₄ -P)	ISO 6878-1	mg l ⁻¹
Hõljuvaine (HA)	ISO/DIC 11923	mg l ⁻¹
pH	SFS 3021	

3.2 Puhastusefektiivsuse ja puhastusmäära arvutamine

Töös esitatavad puhastusefektiivsused (PE, %) on leitud Paistu märgalapuhasti kohta järgmise valemi abil:

$$\text{Puhastusefektiivsus} = \frac{C_{\text{sisse}} - C_{\text{välja}}}{C_{\text{sisse}}} \times 100 \quad (4)$$

kus,

- C_{sisse} – sissevoolu keskmine väärtus (mg l⁻¹);
- C_{välja} – väljavoolus mõõdetud tulemuste keskmine väärtus (mg l⁻¹).

Puhastusmäär - PM, reoveest ööpäevas ruutmeetril eemaldatava toitainet kogus grammides (g m⁻² d⁻¹) on arvutatud Paistu märgalapuhasti kohta järgnevalt (Kadlec & Knight, 1996):

$$\text{Puhastusmäär} = \frac{C_{\text{sisse}} \times Q_{\text{sisse}} - C_{\text{välja}} \times Q_{\text{välja}}}{A} \quad (5)$$

kus:

- A - märgala pindala (m²);
- Q_{sisse} ja Q_{välja} - sissevoolu ja väljavoolu keskmised hulgad (m³ ööp⁻¹);
- C_{sisse} ja C_{välja} - toitainete sisse- ja väljavoolus mõõdetud toitainete sisalduse keskmine väärtus (mg l⁻¹).

Märgalapuhasti kogupindalaks on arvestatud 432 m² (vertikaalvooluline pinnasfilter 216 m²; horisontaalvooluline pinnasfilter 216 m²) ning vooluhulgana on kasutatud keskmistatud ööpäevane vooluhulkade mõõtmisperioodi keskmist väärtust.

Esitatavate puhastusefektiivsuse ning –määrade arvutuste puhul on sissevoolava reovee ja väljavoolava heitvee kontsentratsioonid mõõdetud samal päeval. Tegelikuses on aga keskmine viibeag hinnanguliselt neliteist ööpäeva (vt p 4.1). Reovee puhastumist ning voolukiirust võivad sel ajal mõjutada palju tegureid - hüdrauliline koormus, temperatuuri kõikumised, reostuskoormuse muutus, mistõttu saab puhastusefektiivsuse ning puhastusmäära arvutustest teha vaid üldiseid järeldusi.

3.3 Vooluhulkade ning füüsikalise-keemiliste näitajate mõõtmine

Kohapealselt määrati atesteeritud proovivõtjate poolt järgmisi portatiivsed andmed: vooluhulk (m³, d⁻¹), elektrijuhtivus (µS), temperatuur (°C) ja lahustunud hapniku sisaldus (mg, l⁻¹).

Välitööde käigus mõõdeti ühekordseid vooluhulki mahumeetodil reoveepumpas ja väljavoolus 2 liitrise proovianumaga. Keskmistatud ööpäevane vooluhulk arvutati vee taseme muutumisest pumbašahiti põhja pindala abil, milleks registreeriti limnigraafi abil ööpäevaringselt vee taset pumbašahitis (KUK... 2005).

Kuna keskmistatud ööpäevane vooluhulkade mõõtmisandmed on usaldusväärsemad kui ühekordsete vooluhulkade mõõtmised, siis kasutan märgalapuhastit analüüsidest vooluhulgana kolme keskmistatud ööpäevane vooluhulkade mõõtmisperioodi keskmist väärtust.

Heit- ja reovee füüsikalisi-keemilisi näitajaid määrati portatiivse aparatuuriga EVIKON MultiLine F/SET-3, Multiline F/SET-3 ja OXI 330/SET. Enne seadmete kasutamist need kalibreeriti. Lisaks on töös kasutatud EMHI poolt Viljandis mõõdetud õhutemperatuuri 24h keskmisi andmeid.

3.4 Andmetöötlus ja statistiline analüüs

Põhiline andmetöötlus viidi läbi programmiga MS Excel 2000, süstematiseerides mõõtmisperioodi andmed, mille alusel arvutati keskmised tulemused ning koostati graafikud. Märjalapuhasti tehnoloogilised eskiisjoonised on tehtud AutoCad 2000 programmiga.

Statistiline andmetöötlus tehti programmiga Statistica 6.0. Algandmeteks on Paistu kooli märjalapuhasti reo- ja heitvee puhastusparameetrid ning füüsikalisi-keemilised näitajad sissevoolus ja väljavoolus.

Esmalt kontrolliti algandmete vastavust normaaljaotusele. Selleks kasutati programmis Statistica 6 järgmiseid teste: *Kolmogorov-Smirnov*, *Lilliefors*, *Shapiro-Wilk*. Olulisuse tase oli 0,05. Juhul kui olulisuse tase on väiksem kui 0,05, siis andmed ei ole normaaljaotusega. Käesoleva andmestiku korral olid tulemused järgmised: puhastusparameetrite andmed (BHT₇, üldfosfor, hõljuvained, fosfaatfosfor) ei ole normaaljaotusega, kuid füüsikalisi-keemilised parameetrid (temp, vooluhulk jne) on normaaljaotusega (vt. lisa 2).

Kuna kõik andmed ei olnud normaaljaotusega, siis kasutati tunnustevaheliste seoste uurimiseks Spearmani astakorrelatsioonikordajat. Analüüsi käigus leiti ka lineaarse korrelatsioonikordaja väärtused, kuid Spearmani kordaja väärtused iseloomustasid olukorda paremini (realistlikumalt).

Spearmani korrelatsioonikordaja (R) ehk astakorrelatsioonikordaja kasutab otseste mõõtmistulemuste asemel nende astakuid. See korrelatsioonikordaja mõõdab tunnustevahelise monotoonse seose tugevust. Sõltuvust nimetatakse monotoonseks, kui ühe tunnuse muutus mingis kindlas suunas toob endaga kaasa teise tunnuse muutuse kindlas suunas. Juhul kui $r > 0$ on tunnuste vahel kasvav monotoonne seos, juhul kui $r < 0$ on tunnuste vahel kahanev monotoonne seos.

Astakorrelatsioonikordaja arvuline väärtus leitakse valimi põhjal. See arv on hinnanguks üldkogumi korrelatsioonikordaja väärtusele. Spearmani astakorrelatsioonikordaja olulisuse test (olulisuse tõenäosus on 0,05) on järgmine:

$H_0: r=0$ (tunnuse vahel pole monotoonset seost)

$H_1: r \neq 0$ (tunnuste vahel on monotoonne seos)

Teostatud testid: juhul kui olulisuse tõenäosus on väiksem kui 0,05, siis võtame vastu H_1 .

$p < 0,05$ siis H_1 (seos on oluline). Korrelatsioonikordajate arvulised väärtused on toodud lisa 3.

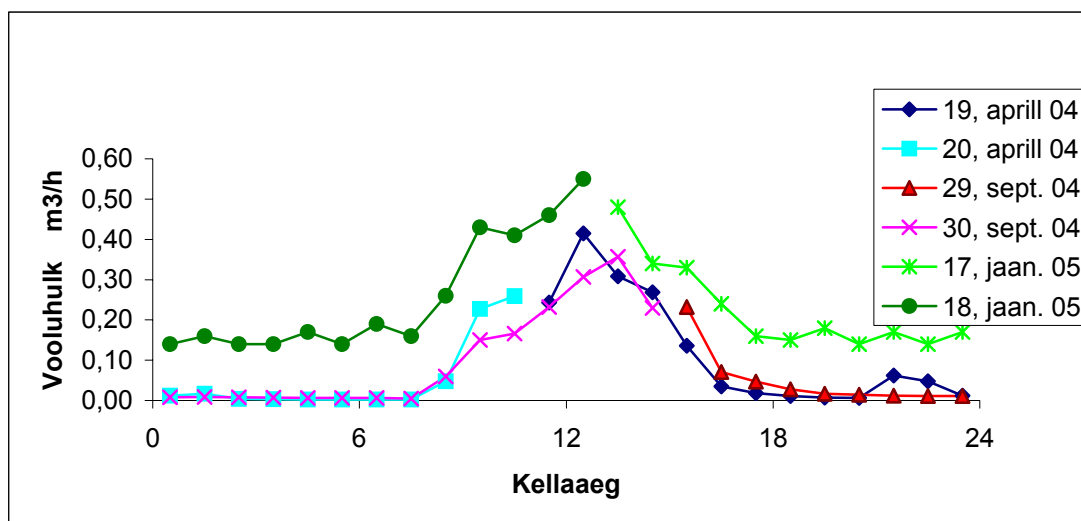
4. TULEMUSED JA ARUTELU

Selles peatükis analüüsitakse Paistu märgalapuhastis ajavahemikul 28.11.2003 kuni 18.01.2005 toimuvaid puhastusprotsesse ning neid mõjutavaid tegureid. Kirjeldatakse **hõljuvaine, BHT₇, üldfosfori, fosfaatfosfori** kontsentratsioonide muutusi, puhastusefektiivsusi ja puhastusmäärasid arvestades nende omavahelisi mõjutegureid ning füüsikalise-keemilisi parameetreid: **reovee vooluhulgad, temperatuur (reovee- ja välisõhu temperatuur), hapniku küllastuskontsentratsioon, elektrijuhtivus ja pH.**

4.1 Reovee vooluhulgad ja viibeaeg

Kuna keskmistatud ööpäevane vooluhulkade mõõtmisandmed on usaldusväärsemad kui ühekordsete vooluhulkade mõõtmised, siis puhastusmäärasid analüüsides kasutan vooluhulgana kolme keskmistatud ööpäevane vooluhulkade mõõtmisperioodi keskmist väärtust. Samas toon võrdlusmomendina välja kõikide mõõtmiste andmed.

Keskonnauuringute Keskuse poolt mõõdetud reovee ööpäevase vooluhulga jaotumine tundide lõikes on esitatud graafiliselt kujutatud joonisel 10.



Joonis 10. Paistu märgalapuhastis reovee vooluhulga dünaamika (KUK...2005).

Joonisel 10 on näha, et kõikidel mõõtmiskordadel ulatus öösel pumplasse jõudnud reovee vooluhulk paarist liitrist kuni paarikümne liitri tunnis. Seega ei esinenud koolimaja

sanitaarsõlmedes olulist puhta vee kadu ning vett ei tunginud pinnasest reoveekanaliseerimisele. Samuti oli vee leke välistatud pinnasfiltrites, kuna need on isoleeritud geomembraaniga. Suurim vooluhulk esineb keskpäeval, mis tuleneb reostuse eripärast ehk koolielu tsüklisest ning sööklatoimimisest.

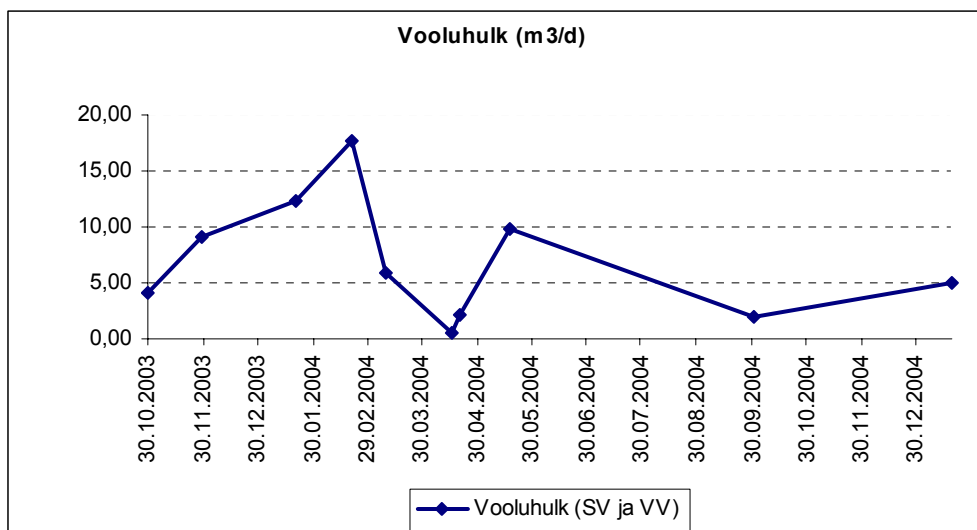
Liites kokku tunnised vooluhulgad saab Paistu Põhikooli ööpäevaseks reovee hulga 19.-20. aprillil 2,15 m³/d; 29.-30. septembril 2,00 m³/d ja 17.-18. jaanuaril 5,0 m³/d. Selle keskmine väärtus moodustab 3,05 m³/d, mis on vaid kolmandik puhastusseadme projektikohasest jõudlusest. Madalate tulemuste põhjuseks võib olla esimese mõõtmistsükli toimimine nädala alguses, mistõttu ei olnud veetase filtrites veel piisavalt tõusnud ja väljavoolu hulk oli madal. Samuti avaldab olulist mõju 22 m³ suurune septik, mille puhvervusvõime on suur ja selle täitumine reoveega võtab palju aega. Näiteks puudus süsteemil väljavool esimese 6 kuu jooksul, kui septik veel täitus.

Tabel 8. Paistu reovee mõõtmiskordade keskmised vooluhulgad ning standardhälbed..

Vooluhulk	
	m³ d⁻¹
Keskvärtus	6,89
Standardhälve	5,37
Min	0,60
Max	17,70

Tabelist 8 nähtub, et kõikide mõõtmisperioodide reovee keskmine vooluhulk on suurusjärgu poolest sarnane 6,89 (± 5,37) m³ d⁻¹ lähteandmetes väljaarvutatud suurusele 6,4 m³ d⁻¹. Vooluhulkasid iseloomustab suur hajuvus ± 5,37 m³ d⁻¹, mida saaks seletada puhasti paiknemisega kooli juures, kus vooluhulk muutused on kindla mustriga ning teatud perioodidel esineb suuremaid löökkoormusi.

Kindlasti ei saa välistada ka ilmastikuolude mõju, mistõttu sattus kevad- ja sügisperioodil filtrikehadele suurem hulk lumesula- ning vihmavett, mida iseloomustavad ka suuremad vooluhulgad nimetatud perioodidel. Joonisel 11 on näha samuti vooluhulga küllalt suurt hajuvust kogu perioodi jooksul.



Joonis 11. Paistu märgalapuhasti reovee vooluhulga $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ väärtused mõõtmisperioodil.

Siinkohal tooksin välja puhastussüsteemi arvutusliku viibeaja. Arvutusliku viibeaja leidmine põhineb eeldusel, et kogu veemaht märgalal pärineb sissevoolust ning selleks kasutatakse järgnevat valemit.

$$\tau = V/Q \tag{6}$$

kus:

τ - viibeaeg märgalal, ööpäeva;

V- veemaht märgalal, m^3 ;

Q- vooluhulk, $\text{m}^3 \text{ ööpäevas}^{-1}$.

Veemahu leidmiseks märgalal arvestan kogu materjali keskmiseks poorsuseks 50% (kergkruus 65%, killustik 25%) ning materjali kogumahuks märgalal 366 m^3 , millest hinnanguliselt 50% on heitveega täidetud. Sel juhul on veemaht märgalal arvutuslikult $91,5 \text{ m}^3$.

$$\tau = 91,5/6,9 = 13 \text{ päeva}$$

Antud valemit kasutades saab teoreetiliseks viibeajaks 13 ööpäeva, mis on kirjanduse andmeil (Vymazal et al., 1998) hübriidsüsteemi keskmine väärtus.

Samas peab arvestama, et vertikaalvoolulisest pinnafiltrist on koormatud korruga vaid 50% ning pikem viibeaeg tagab ka paremad puhastusefektiivsused. Samuti võib väita, et

projekteerimisel on puhasti dimensioneeritud teatud varuga, mis lubab sinna tulevikus juhtida suurema koormusega reovett.

4.2 Reo- ja heitvee temperatuur

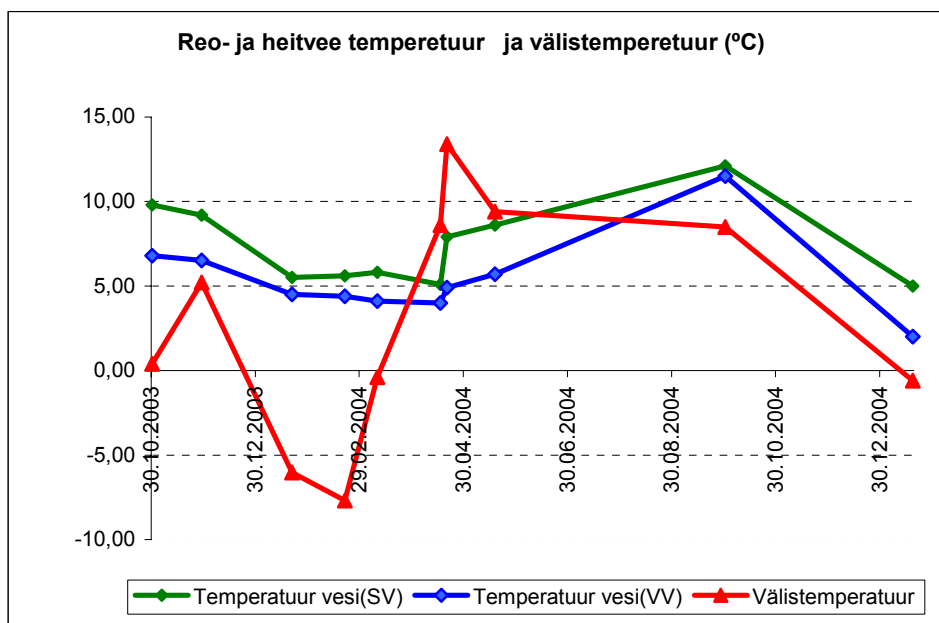
Tabelis 9 esitatud reovee keskmine temperatuur mõõtmiskordadel oli sissevoolus 7,46 (\pm 2,43) ja väljavoolus 5,44 (\pm 2,53), mis näitab temperatuuri langemist puhastis vaid 2 kraadi võrra, hoolimata välistemperatuuri langemisest suuremal määral (sageli miinuskraadid). Märgalapuhasti reovee keskmised temperatuurid olid piisavad, et tagada nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni toimumine puhastis, mis on pärsitud alla 4...5 °C (Kadlec & Knight, 1996).

Tabel 9. Paistu märgalapuhasti reo-ja heitvee ning välisõhu keskmised temperatuurid ning standardhälbed.

	Temperatuur reovesi		Välistemperatuur (°C)	
	Sissevool °C	Väljavool °C	Mõõtmispäeval	Mõõtmiskuul
Keskvärtus	7,46	5,44	3,08	2,87
Standardhälve	2,43	2,53	7,01	6,33
Min	5,00	2,00	-7,70	-7,61
Max	12,10	11,50	13,40	12,9

Reovee temperatuuri väike langus puhastis tulenes süsteemi heast soojusisolatsioonist ning kergkruusa kasutamisest filtermaterjalina, millel on samuti head isolatsiooniomadused. Lisasoojustust annab esimest filtrit kattev 30 cm mullakiht. Puhasti projekteerimisel on väga suurt tähelepanu pööratud just külmal perioodil töötamise kindlustamiseks, arvestades et reovee pealevool võib teatud juhtudel katkeda mitmeks nädalaks.

Mõõtmispäevade välistemperatuuri keskmine väärtus oli 3,08 (\pm 7,01) ning mõõtmiskuude keskmine väärtus oli 2,87 (\pm 6,33), mille kaudu saab seletada ka veetemperatuuride suurt standardhälvet, mis tuleneb erinevatel aastaegadel tehtud mõõtmistest (vt. joonis 12). Kõige külmem kuu mõõtmisperioodil oli jaanuar 2004 (kuukeskmise -7,6 °C) ning kõige soojem september 2004 (kuukeskmise 13 °C).



Joonis 12. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee temperatuur (°C) ning ööpäeva keskmine temperatuur (°C) mõõtmisperioodil.

2004. aasta jaanuari keskmine õhutemperatuur oli $-7,6\text{ °C}$ ning teist horisontaalvoolulist filtrit kattis mõnekümnesentimeetrine jääkiht. Nimelt tõstetakse sügisel viimase filtri veetaset 10-15 cm kõrgusele üle pinnase, et tekitada sellele jääkihti, mis tagab puhastile lisasoojustuse. Samas töötas puhasti efektiivselt ning siiani pole süsteem kordagi kinni külmunud.

Tihtilugu on etteheiteks tehismärgalade puhastusefektiivsuse sõltuvus temperatuurist ehk kas märgalapuhastid suudavad reovett puhastada ka talvel negatiivsete temperatuuridega. Mõõtmistulemuste ja statistilise analüüsi põhjal võib väita, et reovee puhastusefektiivsused ei sõltunud oluliselt õhutemperatuurist ning olid ühtlaselt head nii külmal kui soojal perioodidel.

Statistilisel analüüsil ilmnis tugev statistiline seos väljavoolu veetemperatuuri ja väljavoolu elektrijuhtivuse ($R=0,97$) vahel.

Välistemperatuuri kuukeskmise väärtuse ja vooluhulga vahel on negatiivne korrelatsioon ($R=-0,65$), mille järgi on vooluhulgad madalamad soojematel perioodidel, mida saab seletada proovimõõtmiste sattumist koolivaheaegade ligidusse ja seetõttu väiksemast sisendkoormusest puhastisse.

4.3 Reo- ja heitvee pH

Sissevoolava reovee pH keskmine väärtus oli 7,43 ($\pm 0,27$) ja väljavoolus 7,40 ($\pm 0,27$), mis näitab minimaalset pH muutust (tabel 10). Võib väita, et pH jääb puhastusprotsesside seisukohalt vaadates vajalikule tasemele, mis on keskmiselt 6,5...8,0 (Vymazal, 2001). Erinevate mõõtmiskordade vahel on toimunud teatud väärtused suurenemised ja vähenemised sisse ja väljavoolu vahel, kuid kindlat suuremat trendi ei esine.

Tabel 10. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee keskmine pH väärtus ning standardhälbed.

pH		
	Sissevool	Väljavool
Keskvärtus	7,43	7,40
Standardhälve	0,27	0,32
Min	7,04	6,78
Max	7,82	7,75

Spearmani astakorrelatsiooni kordaja järgi on sissevoolu pH väärtuste ja hõljuvainete kontsentratsiooni vahel negatiivne korrelatsioon ($R=-0,66$) ehk suurema pH korral on hõljuvainete sisendkontsentratsioon väiksem.

4.4 Reo- ja heitvee hapniku küllastuskontsentratsioon

Gaasiline hapnik sattub vette peamiselt õhu ja vee hapniku massivahetuse tulemusena ning on oluliselt sõltuv temperatuurist.

Kuna vees oleva hapniku küllastuskontsentratsioone oli leitud välitingimustes ainult nelja mõõtmisseriesa ajal (30.10.2003; 29.11.2003; 20.01.2004; 20.02.2004), siis teiste mõõtmisseriesiate hapniku küllastuskontsentratsioonid on arvatud kasutades valemit (Kadlec & Knight, 1996):

$$C_{DO}^{sat} = 14,652 - 0,41022 T + 0,007991 T^2 - 0,00007777 T^3 \quad (7)$$

kus,

- C_{DO}^{sat} - hapniku küllastuskontsentratsioon rõhul 1 atm (mg l^{-1});
- T - vee temperatuur $^{\circ}\text{C}$.

Tabel 11. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee keskmine hapniku küllastuskontsentratsioon ning standardhälbed.

Hapniku küllastuskontsentratsioon		
	Sissevool mgO₂ l⁻¹	Väljavool mgO₂ l⁻¹
Keskväärtus	6,40	7,09
Standardhälve	4,62	5,01
Min	0,00	0,00
Max	12,75	13,13

Saadud tulemused näitavad, et hapniku küllastuskontsentratsioon isegi suureneb märgalapuhastis, mida üldjuhul pinnasfiltrite puhul pole täheldatud (tabel 11). Sissevoolava reovee keskmine hapniku küllastuskontsentratsioon on 6,40 (\pm 4,62) mg l⁻¹ ja väljavoolus 7,09 (\pm 5,01) mg l⁻¹. Teatud mõõtmistulemuste ajal on hapniku küllastuskontsentratsioonid olnud 0 väärtusega, mis võisid olla põhjustatud erinevate keskkonnategurite kokkulangemisel.

Kõrge hapniku küllastuskontsentratsioonid soodustavad orgaanika lagundamist, mis on peamiselt hapnikusisaldusest sõltuv protsess. Samuti on aeroobse keskkonna olemasolu vajalik fosfori sidumiseks. Saadud tulemused on väga positiivsed ning kinnitavad veelkord kergkruusa ning vertikaalvoolulise pinnasfiltri olulisust süsteemis. Teatud määral aitab hapniku küllastuskontsentratsioone tõsta sissevoolu ja ülevoolukaevude konstruktsioon, kus reovee vabakukkumise tõttu toimub vee aereerimine.

Sissevoolus on hapniku küllastuskontsentratsiooni ja fosfaatfosfori (R=0,81) ning hõljuvainete (R=0,68) vahel tugev positiivne korrelatsioon, mis näitab kõrgemat puhastusparameetrite sisaldust suurema hapniku küllastuskontsentratsiooni juures.!!!!!!! Antud tulemust on loogiliselt raske seletada ning võib olla juhusliku efektiga ning tingitud erinevate keskkonnategurite koosmõjust.

Siseneva ja väljuva vee hapniku küllastuskontsentratsiooni erinevused on tingitud asjaolust, et antud näitajaid mõõdeti vahetult sisse- ja väljavoolavas vees, mitte proovivõtja poolt võetud keskmises proovis. Seega on nende näitajate väärtustes teatud määral juhuslikkuse faktorit, sest reovee viibeaeg on 13 päeva.

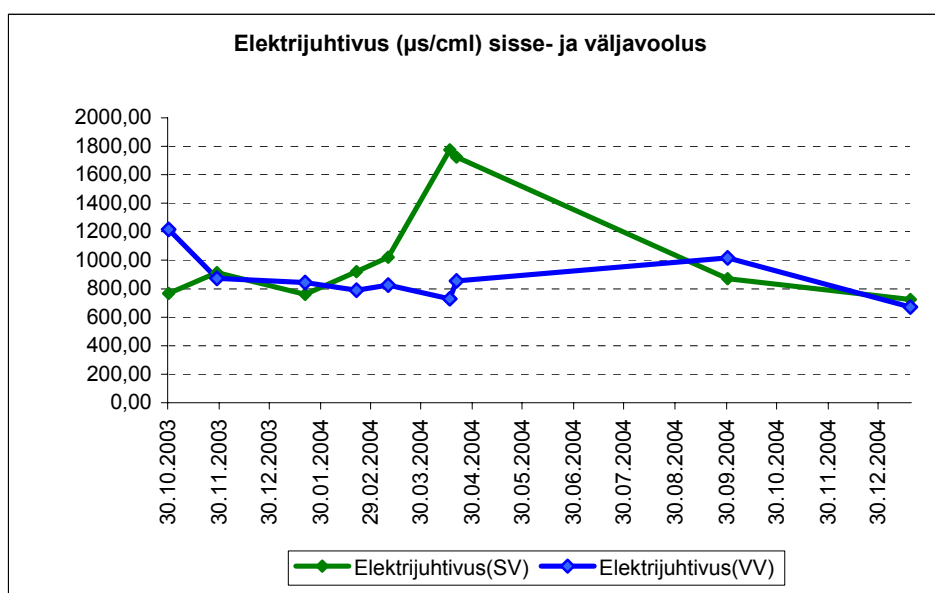
4.5 Reo- ja heitvee elektrijuhtivus

Sissevoolu keskmine elektrijuhtivus oli 1052,8 ($\pm 405,7$) $\mu\text{S cm}^{-1}$ ja väljavoolus 869,1 ($\pm 161,8$) $\mu\text{S cm}^{-1}$, mis näitab ionide ja toitainete sidumist märgalapuhasti väljavoolu suunas (tabel 12).

Tabel 12. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee keskmine elektrijuhtivus ning standardhälbed.

Elektrijuhtivus		
	Sissevool $\mu\text{S cm}^{-1}$	Väljavool $\mu\text{S cm}^{-1}$
Keskväärtus	1 052,78	869,11
Standardhälve	405,70	161,82
Min	724,00	672,00
Max	1 775,00	1 216,00

Osadel mõõtmiskordadel esinenud vee elektrijuhtivuse kahekordne vähenemine (joonis 13) võib viidata mõne mõõtmiskorra juures võimalusele, et teatud osa kontsentratsioonide vähenemisest võib olla seotud lume- ja vihmavee lahjendava toimega. Vee elektrijuhtivus kirjeldab soolade üldist sisaldust vees ning taimed ei suuda vee soolsust tavaliselt nii suurel määral oluliselt vähendada (Vymazal, 2001).



Joonis 13. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee elektrijuhtivuse muutused sissevoolus (SV ja väljavoolus (VV))($\mu\text{S cm}^{-1}$).

Spearmani astakorrelatsiooni arvutuslike tulemuste alusel oli tugev positiivne seos elektrijuhtivuse ja BHT₇ (R=0,90) ning sissevoolu üldfosfori (R=0,72) vahel, mida iseloomustab ka sissevoolu elektrijuhtivuse väärtuse varieerumine, mis on sõltuvuses reostuskoormusest. Samuti esineb tugev positiivne seos elektrijuhtivuse ja heitvee temperatuuri vahel (R=0,90) väljavoolus ehk mida madalam on heitvee temperatuur, seda madalam on elektrijuhtivus.

4.6 Hõljuvaine kontsentratsiooni muutused

Märgalapuhastis on peamiseks hõljumi puhastusprotsessiks settimine, sõltudes filtermaterjalist, vee voolukiirusest ja filtris kasvavast taimestikust. Aja jooksul võib filtermaterjal ummistuda, mille tulemusena pinnase veejuhtivus ja hõljuvainete sidumise efektiivsus väheneb (Kadlec & Knight, 1996).

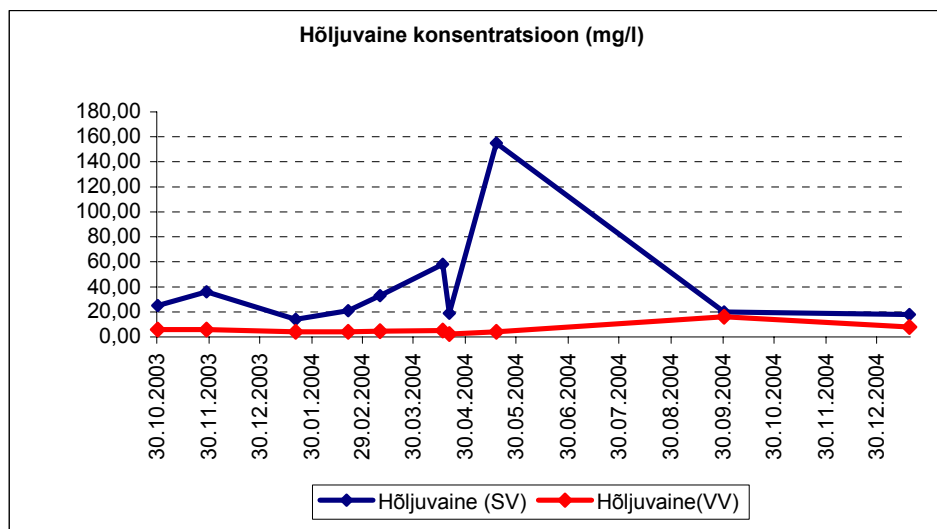
Pinnase ummistumise vältimiseks peaks igale märgalapuhastile eelnema septik, kus suuremad tahked osakesed välja settivad. Paistu märgalapuhastile paigaldati ehitusperioodil 22 m³ suurune betoonist septik, mis on tehtud veekindlaks. Stabiilse hõljuvainete ärastust suurendab kergkruusa kasutamine filtermaterjalina, millel on suur poorsus ning seetõttu ei ummistu kergesti.

Tabel 13. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee hõljuvaine (HA, mg l⁻¹) keskmine kontsentratsioon, puhastusefektiivsus (PE, %), puhastusmäär (PM, g m⁻² d⁻¹) ning standardhälbed.

Hõljuvaine (HA)				
	Sissevool	Väljavool	Puhastusefektiivsus	Puhastusmäär
	mg l⁻¹	mg l⁻¹	%	(g m⁻² d⁻¹)
Keskväärtus	39,88	5,98	75,02%	0,24
Standardhälve	42,44	3,84	22,57%	0,31
Min	14,00	2,30	20,00%	0,03
Max	155,00	16,00	97,42%	1,07

Märgalapuhasti hõljuvaine koormus on üsna ebahütlane. Sissevoolava reovee hõljuvainete kontsentratsioon (tabel 13) ulatub kuni 155 mg l⁻¹, keskmine kontsentratsioon on aga madalam 39,88 (±42,44) mg l⁻¹, mis näitab septiku head puhastusefektiivsust. Sissevoolu hõljuvainete suur standardhälvete hajuvus tulenes peamiselt ühel mõõtmiskorral (18.05.2004)

mõõdetud suurest sisendkontsentratsioonist (155 mg l^{-1}), mis oli tõenäoliselt tingitud septiku ummistumisest, mida kinnitab ka fakt, et septikut polnud selleks hetkeks tühjendatud juba 2 aasta jooksul. 2004. aasta juunis tühjendati kooli tellimusel ka septik ning mille tulemusel vähenesid edaspidi hõljuvaine sisendkontsentratsioonid. Olukorda illustreerib joonis 14.



Joonis 14. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee hõljuvaine kontsentratsiooni muutused sissevoolus (SV) ja väljavoolus (VV) (mg l^{-1}).

Sissevoolu hõljuvainete kontsentratsiooni ja hapniku küllastuskontsentratsiooni vahel oli tugev positiivne korrelatsioon ($R=0,68$). Samas oli sissevoolu hõljuvainete ja pH sisaldusega vahel negatiivne seos ($R=-0,66$).

Märgalapuhasti hõljuvaine keskmiseks kontsentratsiooniks väljavoolus oli $5,98 (\pm 3,84) \text{ mg l}^{-1}$ ning puhastusefektiivsuseks $75 (\pm 22,57) \%$. Väljavoolu hõljuvainete kontsentratsiooni oli tugevas positiivses korrelatsioonis fosfaatfosfori sisaldusega ($R=0,84$). Hõljuvainete ja BHT_7 ($R=0,76$) ning fosfaatfosfori ($R=0,89$) puhastusefektiivsuse ning elektrijuhtivuse ($R=0,88$) vahel on positiivne seos.

Sarnaselt sissevoolule, esines ka puhastusefektiivsuse puhul küllalt suuri kõikumisi standardhälbe osas. Suurt mõju avaldas kahe viimase mõõtmiskorra (19.09.2004; 19.01.2005) madal sisendkontsentratsioon ning viimasel mõõtmiskorral võetud väljavoolu heitveeprov, mida miinuskraadide tõttu ei võetud väljavoolutorust vaid viimasest kontrollkaevust. Tulenevalt kaevu konstruktsioonist ei ole sealt võimalik proove võtta langevast veest vaid kaevus seisvast veest.

Paistu märgalapuhasti hõljuvainete keskmine puhastusmäär oli $0,24 (\pm 0,31) \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mille suurt varieeruvust (max 1,07) saab põhjendada mõnel mõõtmiskorral esinenud suure sisendkoormusega, samas näitab see puhasti võimekust tagada piisava puhastusefektiivsus ka suuremate koormuste korral.

Kokkuvõttena võib märkida, et Paistu märgalapuhasti hõljuvaine kontsentratsioon vastab ka veekvaliteedile esitatud nõuetele (25 mg l^{-1}) ning seda väga suure varuga.

4.7 BHT₇ kontsentratsiooni muutused

Olmereovees on tavaliselt märkimisväärse koguses orgaanilist ainet või ka anorgaanilisi süsinikuühendeid, mida iseloomustatakse kõige sagedamini biokeemilise hapnikutarbe alusel (BHT). Sadenemise ja filtreerimise teel eemaldatakse reoveest kiiresti suuremad orgaaniliste ühendite osakesed. Mikroorganismide ülesanne on märgalades hakkama saada lahustunud orgaanilise aine lagundamisega nii aeroobselt, kui ka anaeroobselt.

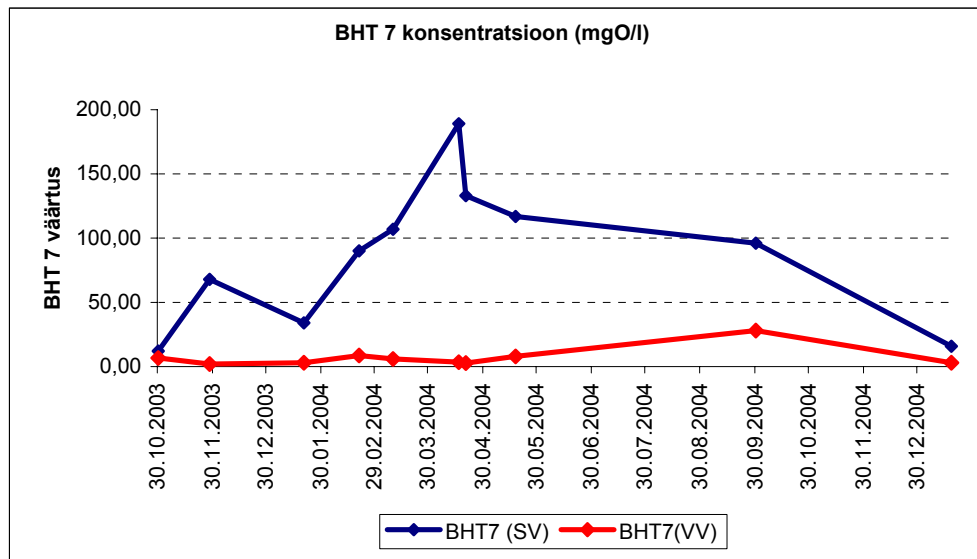
Orgaanikat lagundavate mikroorganismide (aeroobsete) elutegevus ning seeläbi orgaanika lagundamine on kõige enam pärsitud hapnikusisaldusest reovees. Kui aga hapnikku on piisavalt, siis lagundatakse ära kogu orgaanika, mis on mikroorganismidele kättesaadav.

Tabel 14. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee BHT₇ ($\text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$) keskmine väärtus, puhastusefektiivsus (PE, %), puhastusmäär (PM, $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ning standardhälbed.

BHT₇				
	Sissevool	Väljavool	Puhastusefekt	Puhastusmäär
	$\text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$	$\text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$	%	$\text{gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Keskvärtus	86,23	7,17	86,05%	0,56
Standardhälve	55,47	7,68	16,33%	0,39
Min	12,30	2,10	46,34%	0,04
Max	189,00	28,00	98,10%	1,31

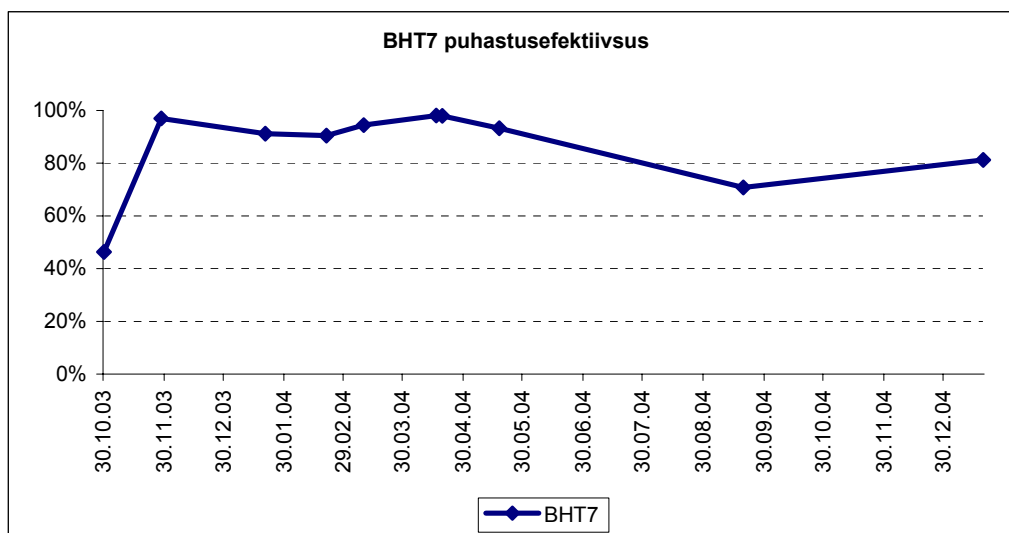
Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee mõõtmiskordade BHT₇ väärtused on toodud joonisel 16, puhastusefektiivsus joonisel 17 ja tabelis 14.

Paistu märgalapuhasti sissevoolu keskmine BHT₇ kontsentratsioon oli 86,23 (±55,47) mgO₂ l⁻¹, mis annab taimestik-pinnasfiltri keskmiseks koormuseks 0,6 gO₂ m⁻² d⁻¹. Antud väärtus on üsna madal, võrreldes Eesti märgalapuhastite keskmisega (5-6 gO₂ m⁻² d⁻¹) (Mander&Mauring, 1997). Maksimaalne sisendkontsentratsioon on ulatunud kuni 190 mgO₂ l⁻¹. BHT₇ koormus on olnud üsna ebaühtlane, kuid see pole puhastusefektiivsusele negatiivset mõju avaldanud.



Joonis 16. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee BHT₇ taseme muutused sissevoolus (SV) ja väljavoolus (VV)(mgO₂ l⁻¹).

Spearmani astakorrelatsioonist järgi on sissevoolu BHT₇ ja üldfosfori (R=0,94) kontsentratsioonide vahel tugev positiivne korrelatsioon. Samuti leiti positiivne seos BHT₇ kontsentratsiooni ja elektrijuhtivuse vahel (R=0,90), mis on seletatav ionide ning orgaanika suurest sisaldusest märgalapuhasti sissevoolus.



Joonis 17. Paistu märgalapuhasti BHT₇ puhastusefektiivsuse dünamika (%).

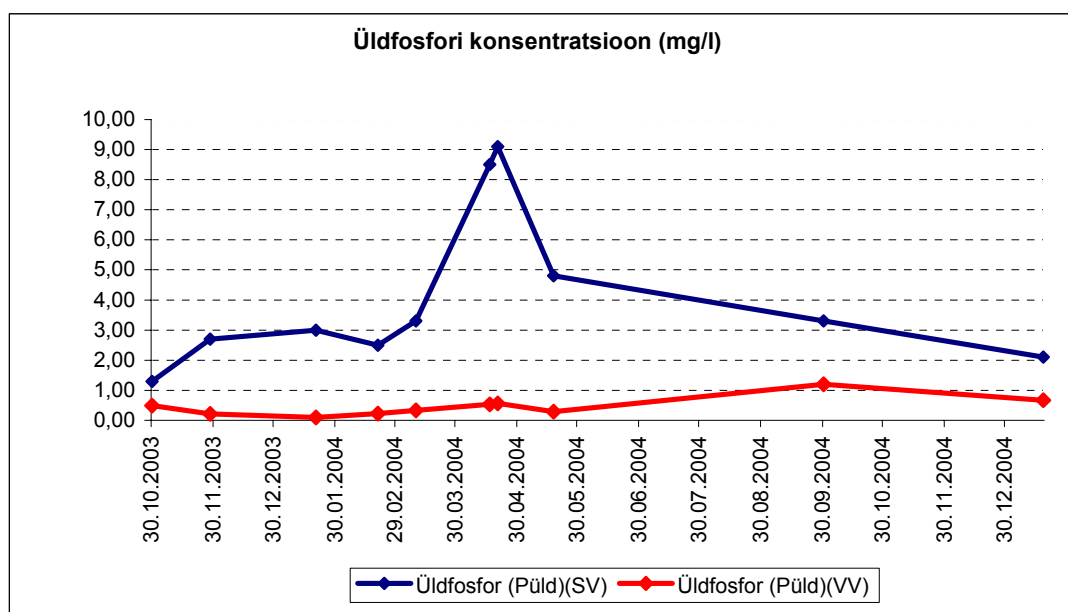
Joonistelt 16 on näha sisendkontsentratsiooni teatavat kõikumist ajateljel, kuid väljavoolu kontsentratsioon on seevastu kõikidel mõõtmiskordadel olnud väga madalad. Orgaanilise aine puhastus reoveest toimus märkimisväärselt hästi, puhastusefektiivsused jäid enamuses 90 ja 100 % vahemikku (joonis 17), kuid keskmine efektiivsus oli 86 % ($\pm 16,33$). Puhastusefektiivsus oli ühteaegu hea nii talvel kui suvel.

Märgalapuhasti BHT₇ keskmiseks kontsentratsiooniks väljavoolus on olnud 7,17 ($\pm 7,68$) mgO₂ l⁻¹, varieerudes vahemikus 2 kuni 28 mgO₂ l⁻¹. Seega vastab Paistu märgalapuhasti kõige olulisem puhastusparameeter, BHT₇ kontsentratsioon igati veekvaliteedile esitatud nõuetele (15 mgO₂ l⁻¹) ning seda peaaegu igal mõõtmiskorral. Vaid ühel mõõtmiskorral oli väljavoolu kontsentratsioon suurem (28 mg l⁻¹), vastasel juhul oleks ka puhastusefektiivsus ületanud 90% piiri.

Märgalapuhasti BHT₇ puhastusefektiivsuse ning elektrijuhtivuse ($R=0,75$) vahel on oluline positiivne korrelatsioon. Paistu märgalapuhasti BHT₇ keskmine puhastusmäär oli 0,56 ($\pm 0,39$) gO₂ m⁻² d⁻¹. Tõenäoliselt oleks antud märgalapuhasti võimeline tagama piisavat puhastusefektiivsust ka suuremate koormuste puhul, mida näitab ka maksimaalne ühekordne puhastusmäär 1,31 gO₂ m⁻² d⁻¹.

4.8 Üldfosfori ja fosfaatfosfori kontsentratsiooni muutused

Fosfori eemaldamine reoveest on peamiselt seotud vees lahustunud anorgaanilise fosfaadi adsorptsiooni ja sadenemisega, kus fosfaat reageerib raua, alumiiniumi, kaltsiumi või savimineraalidega (Uhlmann, 1988; ref. Muring, 1995). Paistu märgalapuhastis toimub raua sidumine tänu kergkruusa suurele kaltsiumi, alumiiniumi ja magneesiumi sisaldusele. Paistu märgalapuhasti sisse ja väljavoolu BHT₇ väärtused mõõtmekordadel on välja toodud joonisel 18.



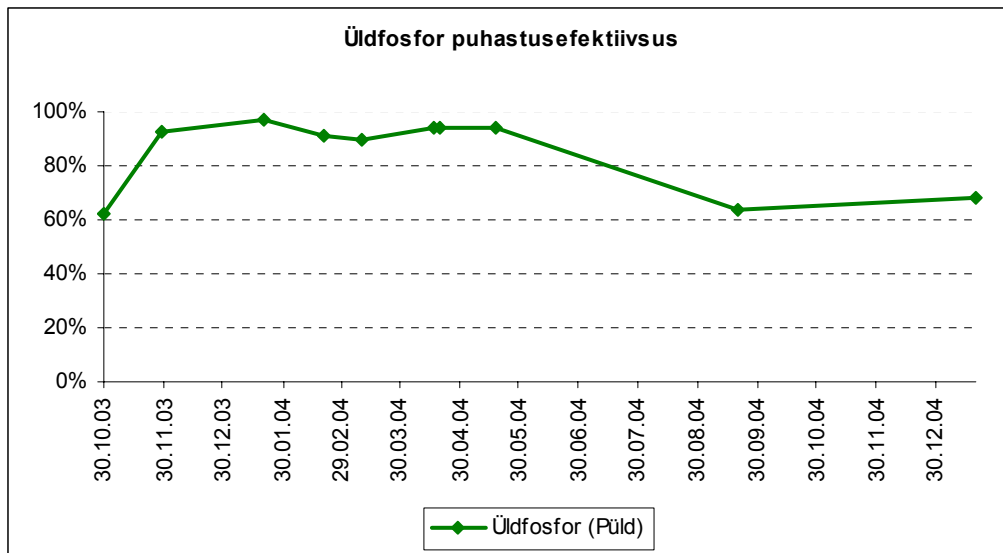
Joonis 18. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee üldfosfori kontsentratsiooni muutused sissevoolus (SV) ja väljavoolus (VV) (mg l^{-1}).

Jooniselt on näha, et kahel mõõtmiskorral (16.04.2004; 20.04.2005) on esinenud keskmisest suuremad sisendkontsentratsioonid ($8,5 \text{ mg l}^{-1}$; $9,10 \text{ mg l}^{-1}$), millest tulenes ka suur standardhälve. Üldfosfori sisaldus on ulatunud kuni $9,1 \text{ mg l}^{-1}$, kuid keskmine kontsentratsioon on olnud $4,06 (\pm 2,66) \text{ mg l}^{-1}$.

Tabel 15. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee üldfosfori (mg l^{-1}) keskmine väärtus, puhastusefektiivsus (PE, %), puhastusmäär (PM, $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ning standardhälbed.

Üldfosfor					
	Sissevool l^{-1}	mg	Väljavool mg l^{-1}	Puhastusefekt %	Puhastusmäär $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Keskvärtus	4,06		0,46	84,61%	0,03
Standardhälve	2,66		0,32	13,95%	0,02
Min	1,30		0,09	62,31%	0,01
Max	9,10		1,20	96,87%	0,06

Sissevoolu üldfosfori kontsentratsiooni ja BHT₇ sisendkontsentratsiooni ($R=0,93$) vahel esineb oluline korrelatsioon. Samuti leiti positiivne seos üldfosfori kontsentratsiooni ja elektrijuhtivuse ($R=0,97$) vahel, mis võiks olla seletatav ioonide ning toitainete suurest sisendkoormusest.



Joonis 19. Paistu märgalapuhasti üldfosfori puhastusefektiivsuse dünaamika (%).

Märgalapuhasti väljavoolukontsentratsioon on valdavalt olnud väga madal, keskmine $0,46 (\pm 0,32) \text{ mg l}^{-1}$, ning see vastab ka veekvaliteedile esitatud nõuetele.

Üldfosfori puhastusefektiivsused on olnud üle ootuste kõrged, jäädes enamasti vahemikku 90-97%, keskmiselt toimus puhastus aga 85% ($\pm 13,95$), mis oli tingitud kolmel korral mõõdetud madalamatest 65% puhastusefektiivsusest. Veelgi paremaid tulemusi peaks andma spetsiaalse kergkruusa Filtralite P kasutamine filtermaterjalina, kui see peaks olema teatud juhtudel vajalik.

Statistilise analüüsi andmetel on suuremate vooluhulkade puhul esinenud väiksemad fosfori kontsentratsioonid, mida kinnitab Spearmani astakorrelatsioonikordaja ($R=0,81$).

Üldfosfori puhastusefektiivsus pole langenud isegi kõrgemate sisendkontsentratsioonide puhul (max 9 mg l^{-1}). Paistu märgalapuhasti on siiani taganud väga hea üldfosfori puhastusefektiivsuse ning tulenevalt teatud alakoormusest on tõenäoliselt antud süsteem võimeline tagama piisavat efektiivsust ka tulevikus ehk pole karta filtermaterjali fosforiga küllastumist.

Fosfaatfosforit mõõdeti puhastussüsteemis seitsmel korral, erinevalt teistest parameetritest ei mõõdetud Keskkonnauuringute Keskuse analüüsi raames fosfaatfosfori väärtusi. Paistu märgalapuhasti sissevoolu keskmine fosfaatfosfori kontsentratsioon on $2,11 (\pm 2,66) \text{ mg l}^{-1}$, mis moodustas 56% üldfosfori koguhulgast.

Tabel 16. Paistu märgalapuhasti reo- ja heitvee fosfaatfosfori (mg l^{-1}) keskmine väärtus, puhastusefektiivsus (PE, %), puhastusmäär (PM, $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ning standardhälbed.

Fosfaatfosfor					
	Sissevool	mg	Väljavool	Puhastusefekt	Puhastusmäär
	l^{-1}		mg l^{-1}	%	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Keskvärtus	2,11		0,20	87,32%	0,01
Standardhälve	2,77		0,21	12,67%	0,02
Min	0,21		0,02	60,83%	0,00
Max	8,10		0,52	96,67%	0,05

Märgalapuhasti fosfaatfosfori keskmiseks kontsentratsiooniks väljavoolus oli $0,20 (\pm 0,21) \text{ mg l}^{-1}$ ning puhastusefektiivsuseks $87,3 (\pm 12,7)\%$ (tabel 16). Sarnaselt üldfosfori sisaldusele väljavoolus on fosfaatfosfori puhul negatiivne korrelatsioon vooluhulgaga ($R=-0,92$), kuid samas oli positiivne korrelatsioon hõljuvaine ($R=0,84$) sisaldusega. Üldfosfori ja fosfaatfosfori kontsentratsioonide muutused kogu süsteemis on olnud väga sarnased, mis on ka loomulik, sest enamiku üldfosforist moodustab ortofosfaatne fosfor.

4.9 Paistu tehismärgala puhastusprotsesside kokkuvõte

Paistu märgalapuhasti on olnud töös kolm aastat ning kasutaja poolne hinnang sellele on positiivne. Talvel pole külmumisprobleemi olnud ja puhasti on toimunud nõuetekohaselt kogu

oma eluea jooksul. Seda kinnitavad ka võetud proovid, mida on kogutud alates 2003. aasta oktoobrist kümnel korral.

Proovide tulemustest nähtub, et puhastussüsteemi jõudlus on kõikide komponentide osas olnud märkimisväärselt kõrge: BHT₇ osas oli keskmine puhastusefektiivsus 86%, hõljuvaine osas 75%, üldfosfori osas 85% ja fosfaatfosfori puhul 87%. BHT₇ väljavoolu keskmine kontsentratsioon on olnud 7,17 mg l⁻¹, hõljuvainel 5,98 mg l⁻¹, üldfosforil 0,46 mg l⁻¹ ja fosfaatfosfori puhul 0,2 mg l⁻¹.

Seega vastavad Paistu märgalapuhasti kõikide puhastusparameetrite (BHT₇, hõljuvained, üldfosfor) keskmised väärtused p 2.2 väljatoodud 2000-9999 ie suuruste reoveepuhastite veekvaliteedile esitatud nõuetele ning seda enamasti igal mõõtmiskorral.

Kokkuvõttena võiks välja tuua, et kuna antud töös oli analüüsi aluseks kümne mõõtmiskorra tulemused, siis tuleks veelgi usaldusväärsema ja põhjalikumate tulemsute saamiseks seireandmete hulka suurendada s.t. see nõuaks süsteemi pikeajalisemat jälgimist.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös analüüsiti Paistu märgalapuhastis toimunud puhastusprotsesse ajavahemikul 28.11.2003 kuni 18.01.2005 ning hinnati nende vastavust veekvaliteedile esitatud nõuetega.

Paistu märgalapuhasti efektiivsust analüüsiti biokeemilise hapnikutarbe (BHT), hõljuvaine, fosfaatfosfori ja üldfosfori sisalduse muutuste alusel. Lisaks uuriti puhastusefektiivsuse seoseid puhastusala vooluhulkade, hapnikusisalduse, elektrijuhtivuse, pH ja temperatuuri vahel.

Tööst saadud tulemused kinnitavad, et pinnasfiltritest koosnevad hübriidsüsteemid töötavad efektiivsemalt Eesti tingimustes, tagades vajalike puhastusprotsesside optimaalsema ja efektiivsema toimimise. Väga häid omadusi on nii teoreetiliselt kui realselt näidanud kergkruusa kasutamine pinnasfiltrites, mis tagab piisavalt head hüdraulilised omadused ning suure fosfori sidumisvõime.

Märgalapuhastite majanduslik analüüs näitas pinnasfiltrite eeliseid võrreldes teiste märgalapuhastite tüüpidega ning rajatud pinnasfiltri keskmine maksumus Eestis on hinnanguliselt 1000 kr m⁻², mida kinnitasid ka Paistu puhastussüsteemi rajamise kulud.

Töö käigus teostatud perspektiivanalüüs näitab, et tulenevalt muutuvast seadusandlusest ja normatiivide leevenemist on märgalapuhastussüsteemide rajamisel Eestis perspektiivi. Samas tuleb selleks välja töötada märgalapuhastite rajamise juhend, et viia märgalapuhastite rajamine ühtsetele alustele.

Proovide tulemustest nähtub, et puhastussüsteemi jõudlus on kõikide komponentide osas olnud märkimisväärselt kõrge: BHT₇ osas oli keskmine puhastusefektiivsus 86%, hõljuvaine osas 75%, üldfosfori osas 85% ja fosfaatfosfori puhul 87%. BHT₇ väljavoolu keskmine kontsentratsioon on olnud 7,17 mg l⁻¹, hõljuvainel 5,98 mg l⁻¹, üldfosforil 0,46 mg l⁻¹ ja fosfaatfosfori puhul 0,2 mg l⁻¹. Süsteemi kõrge puhastusefektiivsus säilis ka talvisel perioodil kõikide parameetrite osas.

Seega vastavad Paistu märgalapuhasti kõikide puhastusparameetrite (BHT₇, hõljuvained, üldfosfor) keskmised väärtused p 2.2 väljatoodud 2000-9999 ie suuruste reoveepuhastite veekvaliteedile esitatud nõuetele ning seda enamasti igal mõõtmiskorral.

Paistu hübriidset märgalapuhastit võiks pidada Eesti üheks kõige korralikumalt rajatud ning väga hästi funktsioneerivaks märgalapuhastiks. Samuti tasub eraldi märkida, et süsteem näeb visuaalselt väga hea välja ning sulandub hästi ümbritsevasse keskkonda.

Negatiivse aspektina võib välja tuua selle teatavat üledimensioneeritust, mis tulenes lähteandmete vales hinnangust ning mis suurendas puhastussüsteemi maksumust. Samas võib Paistu märgalapuhastussüsteemi eeskujuks võtta sarnaste väikeobjektidele mõeldud pinnasfiltrite projekteerimisel ning edukalt demonstreerida kui pilootprojekti.

**Performance analysis of a LWA-filled hybrid constructed wetland for
wastewater treatment:
A case study from Paistu School, Estonia**

SUMMARY

The current thesis focuses on development of constructed wetlands (CW) and the situation today in Estonia. The practical part of the work analyses the purification efficiency of Paistu School constructed wetland. The CW consists of two subsurface flow filter system, using Lightweight Aggregate (LWA), one vertical subsurface flow filter (VSSF) and one horizontal subsurface flow filter HSSF with total area of 432 m². This constructed wetland, founded in summer 2002 by the Centre for Ecological Engineering Tartu (CEET), receives a septic tank effluent of about 64 population equivalents in Paistu, Viljandi County.

The current thesis describes how the system in Paistu was built and what are the first purification results of the new system. The main objective of this thesis was to find out purification efficiency of the system and accordance with the quality standards of wastewater treatment.

To obtain this objective ten series of water sampling (from 28.11.2003 to 18.01.2005) were undertaken. The water samples were taken from the inlet and outlet of the system. The samples were analysed in the laboratories of Tartu Waterworks and Estonian Environmental Research Centre. for PO₄-P, total P, suspended solids (SS), BOD₇ and pH. During each sampling session, the water temperature, O₂ (DO) concentration, and electric conductivity were measured using the portable equipment. Acquired data were processed using following programs: MS Excel 2000 and Statistica 6.0.

The analyses show outstanding purification effect of the system: for BOD₇ the average purification efficiency is 86%, for suspended solids 75%, for total phosphorus 85% and for phosphate 87%. The average outlet concentration of BOD₇ is 7,17 mg l⁻¹, for suspended solids 5,98 mg l⁻¹, for total phosphorus 0,46 mg l⁻¹ and for phosphate 0,2 mg l⁻¹.

According to the analyses all the purification parameters (BOD₇, suspended solids, total phosphorus) meet the standards set by the water act for wastewater treatment plants of 2000-9999 pe (15 mg l⁻¹, 25 mg l⁻¹, 1,5 mg l⁻¹).

The results show that hybrid constructed wetland systems, which consist of subsurface flow filters, can work efficiently in Estonian cold climate. Using LWA as a filter material in constructed wetlands has shown good hydraulic conductivity and phosphorus sorption capacity. Paistu CW can be considered as one of the best systems in Estonia with proper design and outstanding purification results.

KASUTATUD KIRJANDUS

Brix, H., Arias, C. A. and del Bubba, M. 2000. How can phosphorus removal be sustained in subsurface-flow constructed wetlands? In: *7th International Conference of Wetlands Systems for Water Pollution Control*, Nov 11 – 16, Grosvenor Resort, Lake Buena Vista, Florida, Vol 1, University of Florida, pp. 65-74.

Constructed Wetlands for Water Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation. 2000. International Water Agency (IWA) Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. Scientific and Technical Report No.8. IWA Publishing. pp.156 .

Cooper, P. (1999). A review of design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology*, 40. (3), 1-9.

Cooper, P., Griffin, P., Humphries, S. & Pound, A. 1999. Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 40 (3), 283-289.

European Council Directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment (91/271/EEC).

Häädemeeste, Nabala ja Paistu märgalapuhastite tööefektiivsuse analüüs. 2005. Tallinn: OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus (KUK).

Jenssen, P. D. Design of constructed wetlands hydraulic considerations and construction details – Ecological Engineering for Wastewater Treatment. Conference Proceedings, Agricultural University of Norway, Ås, 13-20 juuni, 2001. 15 pp.

Jenssen, P.D. & Krogstad, T. 2003. Design of constructed wetlands using phosphorus sorbing Lightweight Aggregate (LWA). In: Mander, Ü., Jenssen P.D. (Eds.) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates, Advances in Ecological Sciences*, Vol. 11, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 259-272.

Johansson, L. 1997. Phosphorus sorption to filter substrates-Potential benefits for on-site wastewater treatment. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden.

Juhend ekstensiivse reoveepuhastuse rakendamiseks väikese ja keskmise suurusega (500 kuni 5000 inimekvivalenti) asulastutes. 2001. Brüssel: Euroopa Komisjon, Keskkonna Peadirektoraat.

Kadlec, R. H. & Knight, R. L. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, pp. 893.

Kuusik, A. 1995. Reovee väikepuhastid Eestis. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, Keskkonnatehnika Instituut, 247 lk.

Laber, J., Haberl, R & Perfler, R. (2002). Enhanced nitrogen elimination in vertical-flow constructed wetlands in cold climates. In: Mander, Ü & Jenssen, P. (Eds.) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates. Advantages in Ecological Sciences* 11, WIT Press, Southampton, Boston, pp107-122.

Mæhlum, T. & Stålnacke, P. (1999). Removal efficiency of three cold-climate constructed wetlands treating domestic wastewater: effects of temperature, seasons, loading rates and input concentrations. *Water Science and Technology* 40 (3), 273-281.

Mander, Ü. & Muring, T. 1997. Constructed wetlands for wastewater treatment in Estonia. *Water Science and Technology* 35, 323-330.

Muring, T. 1995. Ökotehnoloogia veekaitse. Magistritöö maastikuökoloogia ja keskkonnakaitse erialal. TÜ Geograafia instituut, Tartu.

Paistu Põhikooli taimestik-pinnasfilter reoveepuhasti (tehniline projekt). 2002. Tartu: OÜ Bionext.

Zhu, T., Jenssen, P.D., Mæhlum, T. & Krogstad, T. 1997. phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA)-potential filter media in treatment wetlands. *Water Science and Technology* 35 (5), 103-108.

Vabariigi Valitsuse 31. juuli 2001.a määrus nr 269 "Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord" (RT I, 69, 424).

Vatmarksfiltre. 2001. Utførelse, Behandlings, Avløp Norsk Kommunalteknisk Forening (NKF), Norsk VA-verkforening (NORVAR). *Miljø Blad* Nr.49, 5 p.

Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Haberl, R., Perfler, R & Laber, J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. D. & Haberl, R. (Eds.) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys Publishers: Leiden, pp 17-66 .

Vymazal, J. 2001. Types of constructed wetlands for wastewater treatment: their potential for nutrient removal. In: Vymazal, J. (Ed.) *Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp 1-96.

Ökoloogiliste reoveekäitluse meetodite rakendamise juhend. 2003. Tartu: Ökoloogiliste Tehnoloogiate Keskus (ÕTK).

Water Framework Directive Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy

Internetiallikad:

1. <http://www.maxit.ee> (05.03.2005)
2. <http://www.ehitusmarket.ee>
3. <http://www.filtralite.com/> (05.03.2005)
4. <http://www.nordkalk.com/watergroup> (05.03.2005)
5. <http://www.ropkaliiv.ee> (05.03.2005)

LISAD

Lisa 1. Paistu märgalapuhasti puhastusparameetrite algandmed

Sissevool

Ühik	mgO/l	mg/l	mg/l	mg/l
Kuupäev	BHT7 (SV)	Üldfosfor (Püld)	Fosfaadid (PO4-P)	Hõljuvaine
30.10.2003	12,30	1,30	1,20	25,00
28.11.2003	68,00	2,70	1,90	36,00
20.01.2004	34,00	3,00	0,27	14,00
20.02.2004	90,00	2,50	0,21	21,00
10.03.2004	107,00	3,30	2,50	33,00
16.04.2004	189,00	8,50	8,10	58,00
20.04.2004	133,00	9,10	-	18,80
18.05.2004	117,00	4,80	0,60	155,00
30.09.2004	96,00	3,30	-	20,00
18.01.2005	16,00	2,10	-	18,00
Keskväärtus	86,23	4,06	2,11	39,88
Standardhälve	55,47	2,66	2,77	42,44
Min	12,30	1,30	0,21	14,00
Max	189,00	9,10	8,10	155,00

Ühik	m3/d	µs/cm	°C	mg/l	pH ühik	
Kuupäev	Vooluhulk	Elektrijuhtivus	Temperatuur vesi	Lahustunud O2	pH	Välitemperatuur
30.10.2003	4,10	768,00	9,80	6,18	7,44	0,4
28.11.2003	9,10	913,00	9,2	5,5	7,55	5,2
20.01.2004	12,40	761,00	5,50	5,50	7,75	-6,02
20.02.2004	17,70	920,00	5,60	4,50	7,20	-7,7
10.03.2004	5,90	1021,00	5,80	12,60	7,16	-0,4
16.04.2004	0,6	1775,00	5,10	12,75	7,24	8,6
20.04.2004	2,15	1723,00	7,90	0	7,82	13,4
18.05.2004	9,90	-	8,60	11,70	7,04	9,40
30.09.2004	2,00	870,00	12,10	0,30	7,70	8,50
18.01.2005	5,00	724,00	5,00	5,00	7,40	-0,60
Keskväärtus	6,89	1052,78	7,46	6,40	7,43	3,08
Standardhälve	5,37	405,70	2,43	4,62	0,27	7,01
Min	0,60	724,00	5,00	0,00	7,04	-7,70
Max	17,70	1775,00	12,10	12,75	7,82	13,40

Väljavool

Ühik	mgO/l	mg/l	mg/l	mg/l
Kuupäev	BHT7(VV)	Üldfosfor (Püld)	Fosfaadid (PO4-P)	Hõljuvaine
30.10.2003	6,60	0,49	0,47	6,00
28.11.2003	2,10	0,21	0,20	6,00
20.01.2004	3,00	0,09	0,05	4,00
20.02.2004	8,60	0,22	0,02	4,00
10.03.2004	6,00	0,33	0,09	4,50
16.04.2004	3,60	0,53	0,52	5,00
19.04.2004	2,80	0,56	-	2,30
18.05.2004	8,00	0,28	0,02	4,00
19.09.2004	28,00	1,20	-	16,00
19.01.2005	3,00	0,67	-	8,00
Keskväärtus	7,17	0,46	0,20	5,98
Standardhälve	7,68	0,32	0,21	3,84
Min	2,10	0,09	0,02	2,30
Max	28,00	1,20	0,52	16,00

Ühik	m3/d	µs/cm	°C	mg/l	pH ühik	
Kuupäev	Vooluhulk	Elektrijuhtivus	Temperatuur vesi	Lahustunud O2	pH	Välitemperatuur
30.10.2003	4,10	1216,00	6,80	8,80	7,61	0,4
28.11.2003	9,10	873,00	6,5	8,75	7,62	5,2
20.01.2004	12,40	843,00	4,50	6,54	7,71	-6,02
20.02.2004	17,70	790,00	4,40	4,90	7,16	-7,7
10.03.2004	5,90	825,00	4,10	13,10	6,78	-0,4
16.04.2004	0,6	730,00	4,00	13,13	6,98	8,6
19.04.2004	2,15	856,00	4,90	1,1	7,44	13,4
18.05.2004	9,90	-	5,70	12,60	7,52	9,40
19.09.2004	2,00	1017,00	11,50	0,00	7,45	8,50
19.01.2005	5,00	672,00	2,00	2,00	7,75	-0,60
Keskväärtus	6,89	869,11	5,44	7,09	7,40	3,08
Standardhälve	5,37	161,82	2,53	5,01	0,32	7,01
Min	0,60	672,00	2,00	0,00	6,78	-7,70
Max	17,70	1216,00	11,50	13,13	7,75	13,40

Lisa 2. Algandmete statistilise andmetötluse tulemused

Andmeteks on Paistu Põhikooli märgalapuhasti reovee keemilised ja füüsikalised näitajad sissevoolus ja väljavoolus.

Andmete vastavust normaaljaotusele (olulisusenivoo olgu 0,05), selleks kontrollitud hüpoteeside paari:

H0: on normaaljaotus

H1: ei ole normaaljaotus

Vaadeldud järgmiseid teste: Kolmogorov-Smirnovi test, Lilleforsi test ja Shapiro-Wilk test. Juhul kui olulisuse tõenäosus on väiksem kui 0,05, siis võtame vastu H1 (s.t. andmed ei ole normaaljaotusega).

1) SISSEVOOL

mgO/l	p	Tulemus
BHT7 (SV)		
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	>0,2	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,73519	>0,05 H0
mg/l		
Üldfosfor (Püld)	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	p<0,01	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,01658	<0,05 H1
mg/l		
Fosfaadid (PO4-P)	p	Tulemus
K-S	>0,02	>0,05 H0
Lillefors	<0,05	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,00646	<0,05 H1
mg/l		
Hõljuvaine	p	Tulemus
K-S	<0,20	?
Lillefors	<0,01	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,0007	<0,05 H1
m3/d		
Vooluhulk	p	Tulemus
K-S	>0,20	>0,05 H0
Lillefors	>0,20	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,45963	>0,05 H0
µs/cm		
Elektrijuhtivus	p	Tulemus
K-S	p>0,20	>0,05 H0
Lillefors	<0,05	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,0039	<0,05 H1
°C		
Temperatuur vesi	p	Tulemus
K-S	>0,02	?
Lillefors	<0,10	?
Shapiro-Wilk	0,1522	>0,05 H0
mg/l		
Lahustunud O2	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	<0,20	?
Shapiro-Wilk	0,15163	>0,05 H0
pH ühik		
pH	p	Tulemus

2) VÄLJAVOOL

mgO/l	p	Tulemus
BHT7 (SV)		
K-S	<0,2	<0,05 H1
Lillefors	<0,1	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,0015	<0,05 H1
mg/l		
Üldfosfor (Püld)	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	>0,2	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,13708	>0,05 H0
mg/l		
Fosfaadid (PO4-P)	p	Tulemus
K-S	>0,02	?
Lillefors	<0,20	?
Shapiro-Wilk	0,04939	<0,05 H1
mg/l		
Hõljuvaine	p	Tulemus
K-S	0,2	>0,05 H0
Lillefors	0,01	<0,05 H1
Shapiro-Wilk	0,00221	<0,05 H1
m3/d		
Vooluhulk	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	>0,2	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,45963	>0,05 H0
µs/cm		
Elektrijuhtivus	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	<0,10	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,21808	>0,05 H0
°C		
Temperatuur vesi	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	>0,2	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,0847	>0,05 H0
mg/l		
Lahustunud O2	p	Tulemus
K-S	>0,2	>0,05 H0
Lillefors	>0,2	>0,05 H0
Shapiro-Wilk	0,26876	>0,05 H0
pH ühik		
pH	p	Tulemus

Norm j
(?)

on

ei

ei

ei

on

ei

on

on

ei

on

ei

ei

on

on

on

on

Lisa 3. Spearmani astakorrelatsioonikordajate väärtused

Spearman Rank Order Correlations

MD pairwise deleted

Marked correlations are significant at $p < 0,05$

tunnuste vahel ei ole monotoonset
H0: R=0 seost

H1: R≠0 tunnuste vahel on monotoonne seos

Statistiliselt olulised on rasvases kirjas kordajad ($p < 0,05$)

SV sissevool

VV väljavool

PE puhastusefektiivsus

PM puhastusmäär

	BHT7 (SV)	ÜldP (SV)	Fos- faadid (SV)	Hõljuv- aine(SV)	Voolu- hulk (SV)	Elektri- juhtivus (SV)	Vee temp. (SV)	Lahus- tunud O2(SV)	pH (SV)	Välis- tempe- ratuur	BHT7 (VV)	ÜldP (VV)	Fos- faadid (VV)	Hõljuv- aine (VV)	Voolu- hulk (VV)	Elektri- juhtivus(VV)	Vee- tempe- ratuur (VV)	Lahus- tunud O2(VV)	pH (VV)	
BHT7(SV)	1,00																			
ÜldP(SV)	0,94	1,00																		
Fosfaadid(SV)	0,43	0,50	1,00																	
Hõljuvaine(SV)	0,45	0,27	0,57	1,00																
Vooluhulk(SV)	-0,35	-0,37	-0,89	-0,07	1,00															
Elektrijuht(SV)	0,90	0,73	0,66	0,62	-0,33	1,00														
Vee temp(SV)	-0,07	-0,01	-0,04	0,26	-0,15	0,03	1,00													
Lah O2(SV)	0,17	0,08	0,81	0,68	-0,02	0,16	-0,19	1,00												
pH(SV)	-0,20	0,05	-0,07	-0,66	-0,28	-0,23	0,20	-0,63	1,00											
Välis-temp	0,67	0,74	0,54	0,44	-0,60	0,55	0,39	0,04	0,13	1,00										
PHT(VV)	0,06	-0,09	-0,46	0,19	0,03	-0,03	0,32	0,03	-0,46	-0,11	1,00									
ÜldP(VV)	0,20	0,19	0,64	-0,18	-0,82	0,03	0,08	-0,29	0,15	0,41	0,20	1,00								
Fosfaadid(VV)	0,00	0,14	0,82	0,29	-0,93	0,31	0,07	0,58	0,36	0,43	-0,54	0,61	1,00							
Hõljuvaine(VV)	-0,43	-0,46	0,65	0,01	-0,43	-0,47	0,23	0,03	0,04	-0,11	0,15	0,46	0,84	1,00						
Vooluhulk(VV)	-0,35	-0,37	-0,89	-0,07	1,00	-0,33	-0,15	-0,02	-0,28	-0,60	0,03	-0,82	-0,93	-0,43	1,00					
Elektrijuht(VV)	-0,23	-0,07	-0,26	0,05	-0,13	-0,13	0,93	-0,18	0,53	0,33	0,13	-0,03	0,09	0,18	-0,13	1,00				
Vee temp(VV)	-0,16	-0,05	-0,32	0,12	-0,08	-0,13	0,95	-0,28	0,37	0,35	0,26	-0,02	0,00	0,18	-0,08	0,97	1,00			
Lah O2(VV)	0,25	0,13	0,86	0,75	0,04	0,33	-0,18	0,97	-0,64	0,08	-0,02	-0,38	0,61	-0,12	0,04	-0,17	-0,27	1,00		
pH(VV)	-0,73	-0,54	-0,46	-0,43	0,25	-0,87	-0,02	-0,24	0,38	-0,24	-0,36	-0,14	-0,07	0,31	0,25	0,13	0,18	-0,35	1,00	

	BHT7 (PE)	ÜldP (PE)	Fosfaadid (PE)	Hõljuvaine (PE)	Voolu- hulk (SV)	Elektrijuht (SV)	Vee temp (SV)	Lah O2(SV)	pH(SV)	Välitemperatuur (kuukesk)	Vooluhulk (VV)	Elektrijuht ivus (VV)	Veetemp (VV)	Lahustunud O2(VV)	pH (VV)
BHT7(PE)	1,00														
ÜldP(PE)	0,65	1,00													
Fosfaadid(PE)	0,50	0,21	1,00												
Hõljuvaine(PE)	0,77	0,55	0,89	1,00											
Vooluhulk(SV)	-0,14	0,36	0,00	-0,01	1,00										
Elektrijuht(SV)	0,75	0,37	0,89	0,88	-0,33	1,00									
Vee temp(SV)	-0,30	-0,33	-0,25	-0,08	-0,15	0,03	1,00								
Lah O2(SV)	0,29	0,12	0,52	0,50	-0,02	0,16	-0,19	1,00							
pH(SV)	-0,03	0,08	-0,86	-0,44	-0,28	-0,23	0,20	-0,63	1,00						
Välitemp (kuukesk)	0,12	-0,10	0,43	0,32	-0,65	0,44	0,59	0,01	0,01	1,00					
Vooluhulk(VV)	-0,14	0,36	0,00	-0,01	1,00	-0,33	-0,15	-0,02	-0,28	-0,65	1,00				
Elektrijuht(VV)	-0,35	-0,28	-0,77	-0,22	-0,13	-0,13	0,93	-0,18	0,53	0,44	-0,13	1,00			
Vee temp (VV)	-0,35	-0,19	-0,54	-0,18	-0,08	-0,13	0,95	-0,28	0,37	0,52	-0,08	0,97	1,00		
Lah O2(VV)	0,41	0,19	0,54	0,64	0,04	0,33	-0,18	0,97	-0,64	-0,01	0,04	-0,17	-0,27	1,00	
pH(VV)	-0,43	0,02	-0,68	-0,52	0,25	-0,87	-0,02	-0,24	0,38	-0,27	0,25	0,13	0,18	-0,35	1,00

	BHT7(PM)	ÜldP (PM)	Fosfaadid (PM)	Hõljuvaine (PM)	Voolu- hulk (SV)	Elektrijuht (SV)	Vee temp (SV)	Lah O2(SV)	pH (SV)	Välitemp (kuukesk)	Vooluhulk (VV)	Elektrijuht ivus (VV)	Vee temperatuur(VV)	Lahustunud O2(VV)	pH (VV)
BHT7(PM)	1,00														
ÜldP(PM)	0,88	1,00													
Fosfaadid(PM)	0,23	0,26	1,00												
Hõljuvaine(PM)	0,45	0,42	0,77	1,00											
Vooluhulk(SV)	-0,25	-0,10	-0,02	0,07	1,00										
Elektrijuht(SV)	0,93	0,77	0,42	0,60	-0,33	1,00									
Vee temp(SV)	-0,14	-0,22	-0,04	0,02	-0,15	0,03	1,00								
Lah O2(SV)	0,18	0,22	0,90	0,74	-0,02	0,16	-0,19	1,00							
pH(SV)	-0,26	-0,04	-0,46	-0,66	-0,28	-0,23	0,20	-0,63	1,00						
Välitemp (kuukesk)	0,45	0,26	-0,02	0,24	-0,65	0,44	0,59	0,01	0,01	1,00					
Vooluhulk(VV)	-0,25	-0,10	-0,02	0,07	1,00	-0,33	-0,15	-0,02	-0,28	-0,65	1,00				
Elektrijuht(VV)	-0,32	-0,25	-0,08	-0,15	-0,13	-0,13	0,93	-0,18	0,53	0,44	-0,13	1,00			
Vee temp (VV)	-0,24	-0,25	-0,14	-0,10	-0,08	-0,13	0,95	-0,28	0,37	0,52	-0,08	0,97	1,00		
Lah O2(VV)	0,28	0,32	0,94	0,83	0,04	0,33	-0,18	0,97	-0,64	-0,01	0,04	-0,17	-0,27	1,00	
pH(VV)	-0,76	-0,50	-0,36	-0,33	0,25	-0,87	-0,02	-0,24	0,38	-0,27	0,25	0,13	0,18	-0,35	1,00

Lisa 4. Mõõtmiskuupäevade ööpäevakeskmised õhutemperatuurid (°C)

Päev	2003	2003	2003	2004	2004	2004	2004	2005	2005
	Oktoober	November	Jaauuar	Veebruar	Märts	Aprill	Mai	September	Januar
1	10,4	3,8	-4,6	-0,9	-5	-1,2	9,5	14,9	-1,8
2	8,2	4	-8,3	-2,8	-2,1	-2,6	11,7	13,8	-0,1
3	9	5,4	-10,3	-3	-5	0,7	14,2	15,9	1
4	7,9	7,8	-6,9	1,4	-7,4	3,2	15,2	14,9	-0,1
5	10,7	6,4	-4	2,1	-6,3	5,1	19,1	13,3	0,8
6	7,2	6,4	-5,3	-1,2	-2,7	6,2	19,4	16,1	1,5
7	7,9	5,7	-7,1	0,5	-1,1	7,7	18,2	12,1	3,1
8	7,5	3,5	-11,9	-3,4	-0,4	7	17,6	8,7	6
9	5,7	2,8	-12,2	-3,1	-0,4	6,3	16	7,6	3,3
10	4,9	1,6	-13,3	-9,6	-0,4	3,4	12,9	12	2,2
11	8,7	1,8	-10,2	-12,9	-3,8	4,1	8	14,7	5,9
12	7,3	2,4	-6,5	-13,5	-2,1	3,3	5,2	14,6	4,7
13	6	1,4	-1,3	-8,2	-0,4	2,6	4,2	14,3	4,1
14	6	-1,7	-2,7	-0,5	0,5	4,6	4,5	14,8	2
15	3,1	0,5	-1,6	-0,4	1,3	6,9	6,5	14,1	-2
16	2,6	-2,8	-4,9	-1,9	2,7	8,6	7,5	11,2	-1,1
17	5,8	0,2	-7,1	-2,7	2,7	9,7	7,9	8,9	0,3
18	6,6	0,9	-7,1	-5,8	3,7	11,8	9,4	11,9	-0,6
19	1,5	1,1	-3,4	-14,1	2,4	11,8	9,5	13,2	-1,4
20	-2,1	1,4	-6,2	-7,7	3,4	13,4	8,8	13,9	-1
21	-1,6	0,5	-12,1	0,5	1,3	10	8,2	11,7	-0,2
22	-1,8	-0,8	-10,6	-4,4	0,8	7	7	10,7	-1,6
23	-3,5	-1,2	-8,4	-3,3	1,3	5,9	6,8	9,8	-1,5
24	-3,2	3,4	-13,5	-4,3	2,2	7,7	6,6	9,8	-2,8
25	0,4	0,2	-13,9	-3,9	0,8	7,2	6,8	10,1	-3,9
26	-1,3	2	-8,8	-1,5	0,4	6,4	10	11	-4,9
27	-4,4	4,8	-8	-2,8	-0,4	5,1	9,2	10,6	-8,8
28	3,7	5,2	-6,3	-3,1	1,6	4,4	11,3	11,3	-14
29	6,7	4,7	-5,8	-4,2	0,9	5,6	12,2	11,3	-13,2
30	0,4	3,7	-7,3		3,9	8	9	8,5	-13,2
31	1,9		-6,2		4		10,1	-	-3,4
Kesk- väärtus	3,94	2,50	-7,61	-3,96	-0,12	6,00	10,40	12,19	-1,31
Standard- hälve	4,44	2,62	3,44	4,25	2,99	3,57	4,29	2,36	5,12