

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Hanna Soe

**PINNASFILTRI VÄLJAVOOLU AASTASE TEMPERATUURI  
DÜNAAMIKA MODELLEERIMINE TRNSYS TYPE 979-GA**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: PhD Tõnu Muring

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja .....

Tartu 2014

## Sisukord

1	Sissejuhatus.....	3
2	Valdkonna ülevaade .....	5
2.1	Soojuspumpade ülevaade.....	5
2.1.1	Kanalisatsiooni soojuspumbad.....	6
2.1.2	Kanalisatsiooni soojuspumbad Eestis .....	8
2.2	Tehismärgalad .....	9
2.2.1	Pinnasfiltrite kasutamine külmas kliimas .....	10
2.2.2	Pinnasfiltersüsteemis toimuvate protsesside sõltuvus temperatuurist.....	10
3	Materjal ja meetodika .....	12
3.1	Simulatsiooniprogramm TRNSYS.....	12
3.2	Sisestatud parameetrid .....	13
3.2.1	Veerežiim.....	17
4	Tulemused ja analüüs .....	19
4.1	TRNSYS väljundid.....	19
4.1.1	Pinnasfilter pindalaga 40 m <sup>2</sup> .....	19
4.1.2	Pinnasfilter pindalaga 400 m <sup>2</sup> .....	20
4.1.3	Pinnasfilter pindalaga 4000 m <sup>2</sup> .....	22
4.1.4	Väljavoolu temperatuuri dünaamika sõltuvalt pinnasfiltri pindalast .....	23
5	Arutelu .....	25
6	Kokkuvõte.....	27
7	Summary .....	29
8	Tänuavaldused .....	31
9	Kasutatud kirjandus .....	32

# 1 Sissejuhatus

Energiatõhusus ja keskkonnasõbralikkus on viimastel aastatel muutunud väga aktuaalseks teemaks. Sellest tulenevalt on muutunud ka Eesti ehitusmaastik. Nimelt peavad alates 2019. aastast ehitatavad avalikud hooned ja alates 2021. aastast kõik ehitatavad hooned vastama liginullenergiamajadele kehtestatud nõuetele [1]. See tähendab, et ehitatavad majad peavad tootma peaaegu sama palju energiat, kui ise tarbivad. Seetõttu otsitakse ja uuritakse pidevalt energiatõhusaid meetodeid, et hoonete energiatarve oleks võimalikult väike. Selleks uuritakse ka kombineeritud energiasäästusüsteemide mõju keskkonnale ja hoone energiatarbe vähendamisele.

Hoonete energiatarve moodustab kaks kolmandikku maailma elektri tarbimisest ja ühe kolmandiku kasvuhoonegaaside emissioonidest [2]. See kulub peamiselt hoone kütmiseks, jahutamiseks ja sooja vee tootmiseks. Et vähendada fossiilkütuste kasutamist, on tähtis keskenduda hoone energiakadude põhjustele. Seda silmas pidades on viimastel aastatel tähelepanu koondatud peamiselt kütte- ja jahutuskulude vähendamisele, kuid sooja vee kasutamisega seotud probleemid on välja jäetud.[3] Schmid (2009) tehtud uuring näitas, et hoonesse sisenevast soojusenergiast väljub kanalisatsiooni kaudu 15%. See number tõuseb hästi soojustatud ja madala energiatarbega majades 30 protsendi juurde.[4] Nüüdisaja energiatõhusate hoonete üheks peamiseks soojusenergia kaoallikaks ongi soe vesi, mis majast ära juhitakse. See on aga suur energiakadu, sest näiteks Taani majapidamiste gaasitarbest moodustab sooja vee kütmine umbes 23% [3]. Seetõttu on viimasel ajal hakatud ka uurima, kuidas oleks võimalik seda energiat, mis on algselt kasutatud sooja vee kütmiseks, taaskasutada.

Välja on töötatud vesi-vesi põhimõttel töötav soojuspump, mis kasutab reovee kõrget temperatuuri, et kütta majja sisenevat vett. Selline kanalisatsiooni soojuspump on ühendatud kanalisatsioonitoruga ning kannab väljuva reovee soojust üle puhtale, kuid külmale veele, mis hoonesse siseneb. Sel moel on puhas vesi eelsoojendatud ja selle kütmiseks ei kulu enam nii palju energiat. Samal ajal väheneb protsessi käigus reovee temperatuur. Kui võtta arvesse seda, et reovesi juhitakse edasi tehismärgalasse, kus toimuvad bioloogilised puhastusprotsessid, mis on temperatuurist sõltuvad, võib reovee temperatuuri vähenemine mõjutada puhastusefektiivsust. Eriti on see oluline talvisel ajal, mille võimalikuks negatiivseks tagajärjeks lisaks protsesside aeglustumisele madala temperatuuri tõttu on ka

pinnasfiltri pindmine või osaline jäätumine, mis aeglustaks või peataks puhastusprotsessi täielikult.

Antud töös uuritakse kanalisatsiooni soojuspumba rakendamise tagajärgi pinnasfiltersüsteemi väljavoolu aastasele temperatuuri dünaamikale Eesti kliimas. Lisaks siseneva reovee temperatuuri mõju pinnasfiltri väljavoolule uuritakse ka pinnasfiltri mõõtmete, täitematerjali ja hüdraulilise koormuse mõju. Uuring viiakse läbi modelleerimisprogrammiga TRNSYS.

## 2 Valdkonna ülevaade

### 2.1 Soojuspumpade ülevaade

Mitmetes kontorihoonetes ja ka eramutes kulub sageli rohkem energiat küttele, kui tarvis. Kõetakse ruume, kus kedagi ei viibi, või hoitakse tavapärasest toatemperatuuriga ka siis, kui keegi kodus ei ole.[5] Kui küttesüsteemiks on elektriküte või iganenud keskküttesüsteem, mis tarbib 1 kW soojusenergia tootmiseks kordades rohkem loodusressursse kui tänapäevased uued tehnoloogiad, siis seda suuremad on kahjud keskkonnale.

Selleks, et küttekulusid vähendada, kasutatakse Eestis üha rohkem soojuspumpi [6]. Soojuspump on seade soojuse ülekandmiseks madalama temperatuuriga keskkonnalt kõrgema temperatuuriga keskkonnale ning neid kasutatakse kütte- ja konditsioneerimissüsteemides ning tehnoloogilistes protsessides [7]. Soojuspumbad võimaldavad kütta säästlikumalt ja hoiavad seega igakuised küttekulud madalamal [6]. Kuna soojuspumbad tarbivad vähem energiat kui muud kütteviisid, siis on soojuspumba tehnoloogia tähtis vähendamaks kahjulike gaaside, nagu süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>), vääveldioksiidi (SO<sub>2</sub>) ja lämmastikoksiidide (NO<sub>x</sub>) emissiooni ümbritsevasse keskkonda. Üleüldine keskkonna saastamise määr sõltub aga paljugi sellest, kuidas on soojuspumpa käitav elekter toodetud.[7]

Soojuspumbas võib ära kasutada nii välisõhu, veekogu kui ka maapinna soojust, mida tarbitakse eluruumide kütteks või sooja tarbevee tootmiseks. Näiteks kasutavad õhksoojuspumbad majast väljaminevat sooja õhku, et kütta sissetulevat õhku [7]. Selline soojuspump on kasulik ka hea sisekliima tagamiseks, sest see ei tekita ebameeldivat lõhna, vaid puhastab ja hoiab taas oleva õhu värskena. Üha rohkem kogub aga poolehoidu nii Skandinaavias kui ka Eestis õhk-vesi soojuspump. Selline soojuspump kasutab sooja tootmiseks välisõhku salvestunud soojusenergiat ja annab selle maja vesiküttesüsteemile edasi (radiaator- või põrandaküte). Soojuspumpa saab seadistada ka nii, et seda kasutataks kütte- ja tarbevee tootmiseks.[6]

Maasoojuspump on kütteseade, mis kasutab maapinda salvestunud päikeseenergiat. Energiaallikana saab kasutada maapinda, pinnase ülemisi kihte, kaljut või lähedal asuvat veekogu. Juba meetri sügavusel maapinnast on temperatuur üsna konstantne (4-12 °C), mis võimaldab maasoojuspumbal olla efektiivne kütteseade ka talvisel ajal. Ventilatsioonisoojuspump võtab soojuse maja väljatõmbeõhust ja annab selle edasi tarbe- või kütteveele. Kasutamine eeldab põrandakütte- või radiaatoriga vesiküttesüsteemi olemasolu.[8]

2013. aasta alguseks olid 2001. aasta oktoobris asustatud Eesti Soojuspumba Liidu liikmed paigaldanud 36221 soojuspumpa, sh 7080 maasoojuspumpa, 26775 õhk-õhk soojuspumpa, 1940 õhk-vesi soojuspumpa ja 426 kombineeritud ja ventilatsioonisojuspumpa. Hinnanguliselt on Eestis aastatel 1993-2012 paigaldatud *ca* 73500 soojuspumpa. Kõigi ESPLi liikmete paigaldatud soojuspumpade koguvõimsus oli 2013. aasta alguseks 275 MW, mis toodaksid arvutuslikult ligi 760 GWh maapinnast ja õhust ammutatud soojusenergiat, kulutades selleks umbes 250 GWh elektrienergiat. Kõikide Eestis paigaldatud soojuspumpade koguvõimsus on hinnanguliselt 440 MW.[9]

### **2.1.1 Kanalisatsiooni soojuspumbad**

Reoveel on suur potentsiaal olla energiaallikaks, mida saab kasutada hoone kütmiseks, jahutamiseks ning vee soojendamiseks, sest 1 m<sup>3</sup> vee mahajahutamisel ühe kraadi võrra tekib 1.16 kWh soojusenergiat [10]. Võrreldes teiste traditsiooniliste soojuspumpadega (pinnasevee, maa- ja õhksoojuspump), võimaldab reovesi suhteliselt kõrget temperatuuri terve kütteperioodi jooksul.[4] Üldiselt on olmereovesi soojem kui 20 °C, samas kui dušist tulenev hallvesi võib küündida isegi 35 kraadini C. Arvestades vee kogust, mis majapidamistes tekib, ning fakti, et vee soojust on võimalik kütteks kasutada, on reovesi kütteallikana sobiv.[11]

Välja on töötatud mitme erineva skaalaga reovee soojustagastussüsteeme: majapidamises (väiksed), kanalisatsiooni torudes (keskmised) või reoveepuhastusjaamades kasutatavad (suured) [3]. Hoolimata tagastussüsteemi tüübist on peamised elemendid samad: soojusvaheti ja soojuspump. Soojusvaheti on seade, mis lihtsustab kahe erineva temperatuuriga vedeliku vahelist soojusülekanget, samal ajal nende vahel otsesest kontakti loomata. Soojuspumpa iseloomustatakse kasuteguri järgi, mis näitab, mitu korda annab seade rohkem soojusenergiat suhtes kulutatud elektrienergiaga.[12] Näiteks kui COP väärtus on 5, siis see tähendab, et soojuspump kulutab 5 kWh soojusenergia tootmiseks 1 kWh.

Vesi-vesi põhimõttel toimivad soojuspumbad on üha populaarsemaks saamas, kuid katsetused nende arendamisega veel toimuvad. Seda tüüpi soojuspumba põhimõtte on kanda juba soojendatud, kuid ära kasutatud vee soojus puhtale kasutamata veele. Reovesi, mis majast väljub, läbib enne kanalisatsiooni jõudmist soojusvaheti, kus reovee soojus kandub üle puhtale veele, mis hoonesse siseneb. Nii hoitakse kokku küttekulude ja hoone energiatarbimise pealt, mis muidu kuluksid puhta, kuid külma vee kütmiseks. Protsess toimub

soojusvahetis, kus majast väljuva reovee toru ja majja siseneva vee toru pinnad puutuvad võimalikult palju kokku. Toru seinad on kõrge soojusjuhtivusega ning seega omastavad kiiresti nende sees oleva vee temperatuuri. Sel moel toimub soojusenergia kandumine soojemalt kehalt külmemale ja väljuva musta vee soojust on võimalik sisenevale veele üle kanda.[11]

Kanaliseerimise soojuspumba eelised:

- lihtsad ja passiivsed süsteemid, mida on lihtne paigaldada;
- vee kütmise energiatarvet saab vähendada 25-35 protsendi võrra;
- ei nõua palju ruumi;
- suuremates hoonetes saab vähendada kütteseadme mahtu;
- olemas on kalkulasiooni meetod, millega saab kergelt arvutada sääste.

Kanaliseerimise soojuspumba paigaldamisel tuleks meeles pidada, et:

- säästud on suurimad, kui soojuspumbad varustavad nii külma kui ka sooja vett;
- kui mitme duši külma veetoru on ühendatud ühe soojuspumbaga, siis külma dušid ei pruugi olla võimalikud;
- kraanikausi veetorusid ei soovitata ühendada soojuspumbaga, sest hambapasta ja habemeajamiskreemi jäägid võivad torude seintele jääda ning vähendada soojusülekanne;
- soojuspumbad, mis asendavad osa kanalisatsiooni torust, peavad olema installeeritud täiesti vertikaalselt.[11]

Schniedersi (2014) tehtud katsed uurisid kanalisatsiooni soojuspumba energiasäästu Saksamaa ridaelamus, kus pumpa läbis ainult hallvesi. Mõõdeti ka hoonesse siseneva puhta vee temperatuuri: suvel küündis peaaegu 20 kraadini C, talvel miinimumiks 6 kraadi, aasta keskmine väärtus 12.6 °C. Leiti, et süsteemi energiasääst oli 23%, majanduslik sääst 9.9 senti ühe kWh-i kohta. Suhteliselt madalat tulemust põhjendati sellega, et hallvee temperatuur jõudis juba 5 kraadi võrra jahtuda, kui see lõpuks soojuspumba jõudis. Lisaks moodustab duši hallvesi umbes 2/3 kogu kasutatavast veest. Kui oleks rohkem vett ühenduses, siis oleks tulemuseks suurem energiasääst. Kolmandaks, soojusvahetis toimuva protsessi maksimaalse tööefektiivsuse saavutamiseks läheb alghetkest alates 2.5 minutit aega.[11]

Sarnane süsteem on kasutusel ka Šveitsis, kus on ühendatud umbes 50 soojuspumba tsentraalse kanalisatsioonitoruga. Üks sellistest pumpadest kütab 800 korteriga elamut, teine kütab ja jahutab Šveitsi suurimat hoonet. Antud juhul aga kontrollitakse, et reovee temperatuur ei langeks alla 10 °C, kuna enamus reoveest liigub aktiivmudal põhinevatesse puhastusjaamadesse, kus nitrifikatsiooni protsessil on suur tähtsus ja mille efektiivsus kahaneb, kui temperatuur langeb liiga madalale.[10]

Kanalisatsiooni soojuspumpa on hinnatud oluliseks faktoriks hoone energiatõhususe parandamisel ning seda kavatakse üha enam arvestada ka hoone soojusbilansi arvutamisel.[11] Kahjuks on teadusartiklites vähe informatsiooni selle kohta, mida võib reovee temperatuuri vähenemine endaga kaasa tuua, kui see suunatakse edasi reoveepuhastusjaama, kus toimuvad protsessid on mõjutatavad temperatuuri poolt.

Ühe positiivse näitena saab tuua Seyboldi & Brunki (2013) tehtud uurimistööd, mis viidi läbi Saksamaal kuue erinevat tüüpi hoone uurimisel (ridaelamud, hotellid, ühiselamud), ja kus leiti, et kuigi reovesi jahtus pärast soojusvaheti läbimist 18 kraadi peale, ei tohiks madalam reovee temperatuur mõjutada protsesse, mis toimuvad reoveepuhastusjaamas.[13] Antud näites oli reovee lõpptemperatuur suhteliselt kõrge, kuid seda võivad veel mõjutada mitmed faktorid, näiteks reovee toru pikkus puhastusjaamani ning asjaolu, kas toru on isoleeritud. See on üks tegur, mis võib põhjustada edasist temperatuuri langust.

### **2.1.2 Kanalisatsiooni soojuspumbad Eestis**

Soojusvaheti, millega saab vähendada sooja vee kütmise energiakulu, on üldsusele suhteliselt uus tehnoloogia terves maailmas. Eestis on olemas mõned ettevõtted, kes pakuvad selliseid soojuspumpi, kuid ka nemad on tõdenud, et müük pole olnud suur [14;15]. Zyphe soojuspumpade edasimüüja Eestis ja Lätis on öelnud, et seisuga 07.04.2014 pole nendes piirkondades müüki veel toimunud [14]. Teine kanalisatsiooni soojusvahetite paigaldaja Eestis on OÜ Roheline Mõte, kes on viimased 3 aastat jälginud Tallinnas E. Vilde tee 59 korterelamusse paigaldatud soojusvaheti tööd [15]. See seade on paigaldatud ühe trepikoja kanalisatsioonitorule ja sellest voolab läbi neljale trepikojale sooja vee valmistamiseks vajalik külm vesi. 2012. aastal tehtud katsete tulemused näitasid, et antud soojusvaheti ühe trepikoja energiasääst on 24.65%, kahe trepikoja puhul 30% ja nelja trepikoja puhul tõuseks see juba 36



protsendini. Kui seade paigaldada kahe trepikoja peale, siis tasuvusajaks hinnati maksimaalselt 5 aastat.[16]

## **2.2 Tehismärgalad**

Reovee puhastamine on väga tähtis looduskaitse seisukohalt, kuna inimeste poolt tekitatav must vesi sisaldab liiges koguses loodusele kahjulikke ühendeid, mis tuleb eemaldada enne nende jõudmist loodusesse. Lisaks elusloodusele ohtlikele ühenditele sisaldab reovesi ka liiges koguses fosforit ja lämmastikku, mis võib põhjustada veekogu eutrofeerumist.

Tehismärgalade tehnoloogiat hakati esimest korda põhjalikumalt uurima Saksamaal Max Plancki instituudis 1952. aastal ning alates 1980ndate keskpaigast on nende kasutus maailmas järjest kasvanud. Seda peamiselt selle tõttu, et tehismärgalad on süsteemid, millel on mehaaniliselt lihtne ülesehitus, nad on bioloogiliselt mitmekesised ja suure puhastusefektiivsusega. Lisaks saab neid rajada kohalike materjale ja tööjõudu kasutades, mis muudab tehismärgalad lihtsaks ja kättesaadavaks ka maapiirkondades ja arengumaades.[17] Tehismärgaladel on veel mitmed kasulikud omadused: süsteem toimib väliskeskkonnast saadava päikeseenergia kulul, süsteemis toimub isekorrastumine ehk inimeste poolt tehtavat hooldust ei ole vaja, reovee puhastumise efektiivsus suureneb aja jooksul, süsteem pakub elukeskkonda ökosüsteemidele, toodab hapnikku ning neelab süsihappegaasi [18].

Taimestiku alusel saab jaotada tehismärgalasüsteeme veepinnal ujuvate taimede, ujulehtedega taimede, põhja kinnituvate taimede ning veeluste taimedega süsteemideks. Samuti saab tehismärgalasid jaotada ka vee voolamise järgi: avaveelised süsteemid ja pinnasisese voolamisega süsteemid ehk pinnasfiltrid. Pinnasfiltersüsteeme saab omakorda klassifitseerida vee liikumise järgi vertikaalseteks ja horisontaalseteks.[19;20]

Eestis on peamiselt pinnasfilter- ja tehismärgalasüsteeme kasutatud olmereovee puhastamiseks (Kõo asula, Kodijärve Hooldekodu, Paistu põhikool jt) aga samuti järelpuhastitena (Põltsamaa, Tapa). 2007. aasta seisuga on Eestis seni rajatud 28 erineva suurusega pinnasfilter- ja tehismärgalasüsteemi.[19]

### **2.2.1 Pinnasfiltrite kasutamine külmas kliimas**

Nagu eelpool mainitud, siis tehismärgalad on üha rohkem kasutusel tänu oma madalatele rajamis- ja hoolduskuludele ning lihtsale reoveepuhastuse lahendusele. Kuid avaveeliste tehismärgalade kasutamisel külmas kliimas on probleem nende külmumisega talveperioodil [21]. Külma kliima on regioon, kus keskmine ööpäevane õhutemperatuur jääb pikemaks ajaks alla 0 °C [22]. Seetõttu kasutatakse sellise kliimaga regioonides suletud tehismärgalasid, mis on pealt kaetud isoleeriva materjaliga, ehk pinnasfiltreid [21]. Mitte-avaveeliste tehismärgalade ehk pinnasfiltrite reoveepuhastussüsteemi eeliseks on, et süsteemi pealne veekiht ei ole avatud väliskeskkonnale, mis vähendab süsteemi energiakadusid aurustumise ja konvektsiooni tõttu, ning seetõttu muudab pinnasfiltersüsteemi efektiivsemaks [20].

Scott D. Wallace on täheldanud oma uurimistöös, et multši kasutamine kattematerjalina on väga efektiivne takistamaks pinnasfiltrite jäätumist. Tavaliselt pakub talveajal kaitset ka paks lumekiht, mis käitub lisasoojustusena, kuid Wallace leidis, et multšikate pakub ka adekvaatset kaitset talvekülma eest nendel juhtudel, kui lumesadu pole olnud suur.[18] Mairing *et al.* (2001) tehtud uuring Kodijärve pinnasfiltri kohta tõendas, et isegi kui lumesadu on talvisel ajal piiratud ja seega puudub lumekihi soojustav mõju, pinnasfiltersüsteem ei jäätunud rohkem kui 5-10 cm sügavuseni (antud juhul oli maapind jäätunud 40-50 cm sügavuseni). See oli ilmselt tingitud pinnasfiltrisse jõudva reovee kõrgest temperatuurist, mis ei langenud kunagi alla 8 °C.[23]

### **2.2.2 Pinnasfiltersüsteemis toimuvate protsesside sõltuvus temperatuurist**

Tehismärgalades toimuvad pidevalt protsessid, mis vähendavad reovees sisalduvate saasteainete, sh orgaanika, heljumi, lämmastiku, fosfori, raskmetallide ja patogeenide kontsentratsioone. Kuid nende protsesside efektiivsus sõltub lisaks muudele faktoritele ka pinnasfiltris olevast temperatuurist, mida mõjutavad nii välised kliimaatilised tingimused kui ka siseneva reovee temperatuur.

Nii nitrifikatsioon, denitrifikatsioon kui ka BHT on temperatuuritundlikud. Looduslikes süsteemides elavate bakterite populatsioonid suudavad aklimatiseeruda külmemate temperatuuridega ja säilitada oma rohkust, kuid nende elutegevuse aktiivsus väheneb. Optimaalne reovee temperatuur bakterite elutegevuse soodustamiseks võiks olla 25-35°C juures.[24] Siiski väidab Kadleci & Knighti (1996) tehtud uuring, et mitte-avaveelistes

pinnasfiltrites ei avalda temperatuur BHT toimumisele mõju [25]. Küll aga on pinnasfiltris toimuv lämmastikuärastus temperatuurist sõltuv ja mõned teadlased väidavad, et see peatub täielikult 4 °C juures [26]. Teised uuringud on leidnud, et tehismärgalad saavad ammooniumit oksüdeerida isegi 2.8-4.4 °C juures [18].

Mauringu (2001) uurimistöös jõuti järeldusele, et antud töös uuritud viie Lõuna-Eesti puhastusmärgala toimeefektiivsus ei vähenenud külmal aastaajal ning horisontaalsed pinnasfiltrid soovitati rajada vähemalt 80-90 cm sügavused, et pealmine 30-40 cm paksune kiht võiks talvel jäätuda ja seega käituda soojustava kihina.[27]

### 3 Materjal ja metoodika

#### 3.1 Simulatsiooniprogramm TRNSYS

Antud töö viidi läbi simulatsiooniprogrammiga TRNSYS (Transient System Simulation Program), mis on peamiselt tuntud erinevate süsteemide energiamuutuste modelleerimisel. Programm töötati välja 1970. aastatel Wisconsin-Madisoni Ülikooli mehaanilise inseneriteaduse osakonnas (ingl. *University of Wisconsin-Madison, Mechanical Engineering*), peamiseks autoriks võib pidada Sanford A. Kleini [28;29]. Tarkvara sisaldab mitmeid erinevaid arhiive, kust saab valida sobilikud modelleerimise tüübid, mida vajadusel kasutada. Antud töös on kasutatud tüüpi Type 979: Wetland water treatment cell (eesti k. märgala veepuhastuse üksus).

Type 979 modelleerib märgalas, mis võib kas osaliselt või täielikult olla mattunud maa alla, toimuva soojusenergia muutumist. Filter on täidetud poorse täitematerjaliga ning vee sissepumpamisel või väljajuhtimisel siseneb või väljub filtrist vastav kogus õhku. Mudel hindab energiaülekandeid vee, täitematerjali, filtri enda, seda ümbritseva pinnase ja väliskeskkonna vahel. Sissevoolu asukohta saab kasutaja ise määrata, kuid väljavool asub alati viimases kihis, et tagada pinnasfiltri täielik tühjendus.[30]

Kasutaja määrab ka muud parameetrid ja sisendid, mida kasutatakse soovitud simulatsioonis. Antud uurimistöö eesmärk oli leida, kuidas ja mil määral mõjutab reovee temperatuuri vähenemine pinnasfiltri külmumist. Et seda võimalikult erinevatest aspektidest uurida, varieeriti modelleerimisel peamiselt nelja faktorit:

- siseneva reovee temperatuur (°C);
  - 5
  - 10
  - 15
- pinnasfiltri mõõtmed (m<sup>2</sup>);
  - 40
  - 400
  - 4000
- hüdrauliline koormus (mm/ööp);
  - 20
  - 40

- 100
- pinnasfiltri täitematerjali osakeste suurus (mm).
  - 2-4
  - 4-10
  - 10-20

Kokku tehti 81 katset, kus kombineeriti omavahel kõik muutujad, ülejäänud muudetud parameetrid on välja toodud peatükis 3.2.

Teadaolevalt pole TRNSYS Type 979-ga ühtegi teadustööd varem tehtud.

### 3.2 Sisestatud parameetrid

Modelleerimisprogrammi TRNSYS sisestatud parameetrid on välja toodud tabelis 1, kus väärtuste vaikeseaded on jäetud tavalisse kirjastiili, kuid muudetud väärtused on välja toodud poolpaksus kirjas (**Bold** kirjastiilis).

Tabel 1. Parameetrid.

Parameetri number	Nimi	Ühik	Väärtus		
1.	Kõrgus	m	<b>1</b>		
2.	Pikkus	m	<b>6.32</b>	<b>20</b>	<b>63.25</b>
3.	Laius	m	<b>6.32</b>	<b>20</b>	<b>63.25</b>
4.	Pinnasfiltri põhja sügavus	m	<b>1</b>		
5.	Pinnasfiltri seina soojusjuhtivus	W/m <sup>2</sup> .K	1.39		
6.	Kõrguspunktide arv	-	10		
7.	Sissevooluava asukoht	-	1		
8.	Täitematerjali erisoojus	kJ/kg.K	1.00		
9.	Täitematerjali tihedus	kg/m <sup>3</sup>	<b>450</b>	<b>270</b>	<b>260</b>
10.	Täitematerjali soojusjuhtivus	W/m.K	<b>0.16</b>	<b>0.14</b>	<b>0.12</b>
11.	Täitematerjali poorsus	0..1	<b>0.45</b>		
12.	Täitematerjali kontaktpindala	m <sup>2</sup>	100.0		
13.	Algne temperatuur	C	20		
14.	Algne suhteline õhuniiskus	%	50.0		
15.	Algne õhurõhk	atm	1		
16.	Algne täituvus	0..1	0.5		
17.	Vedeliku erisoojus	kJ/kg.K	4.190		
18.	Vedeliku tihedus	kg/m <sup>3</sup>	1000.0		
19.	Vedeliku soojusjuhtivus	kJ/h.m.K	2.204		
20.	Vedeliku viskoossus	kg/m.h	3.20		
21.	Ventilatsiooni tüüp	-	2		

22.	Teoreetiline aurustumise kiirus	-	0.1
23.	Õhu erisoojus	kJ/kg.K	1.007
24.	Kuiva õhu tihedus	kg/m <sup>3</sup>	1.204
25.	Väikseim pinnaseosa suurus	m	0.0507
26.	Pinnaseosa suuruse kordaja	-	2.0
27.	Pinnase mõjuala horisontaalne kaugus	m	10.0
28.	Pinnase mõjuala vertikaalne kaugus	m	10.0
29.	Pinnase soojusjuhtivus	W/m.K	<b>2.0</b>
30.	Pinnase tihedus	kg/m <sup>3</sup>	<b>1650.0</b>
31.	Pinnase erisoojus	J/kg.K	800
32.	Keskmine pinnase temperatuur	C	<b>7.86</b>
33.	Pinnase temperatuuri amplituud aasta jooksul	ΔC	<b>37.06</b>
34.	Maapinna miinimumtemperatuuriga päev	päev	<b>19</b>
35.	Väljundfaili loogiline üksus	-	31
36.	Pinnase soojusülekanne ülemine piir	0 / 1	1
37.	Pinnase soojusülekanne alumine piir	0 / 1	1
38.	Pinnase soojusülekanne piir külgedel	0 / 1	1
39.	Ülemise kihi neeldumiskoeffitsent	0..1	0.2
40.	Külgede neeldumiskoeffitsent	0..1	<b>0</b>

1.-4. Antud töös valitud pinnasfiltri kõrguseks on läbivalt 1 m. See väärtus on valitud silmas pidades Noorvee *et al.* (2007) soovitusi rajada pinnasfilter Eesti tingimustes 1.0-1.3 m sügavusega [22]. Et paremini aru saada filtri suuruse olulisusest reovee temperatuurile, on valitud kolm erineva pindalaga pinnasfiltrit: 40, 400 ja 4000 m<sup>2</sup>, vastavalt mõõtudega 3.32x3.32, 20x20 ja 63.25x63.25 m. Need kolm pinnasfiltrit on võetud ka modelleerimise aluseks ja nendes hakatakse järgnevalt muutma täitematerjali omadusi, hüdraulilist koormust ning siseneva reovee temperatuuri. Pinnasfilter on modelleeritud maapinnaga tasaseks ehk põhi asub 1 m sügavusel.

5.-7. Pinnasfiltri seina soojusjuhtivus on jäetud 1.388 W/m<sup>2</sup>.K, sest tehismärgalale ei ole lisatud soojustust ning vaikimisi valitud väärtus jääb võimalike liiva- ja savipinnaste (0.15-2.0) [31] erisoojuste väärtuste sisse. Kõrguspunktide arv tähistab pinnasfiltri jaotumist kümneks erinevaks osaks vastavalt sügavusele, et iga kihi temperatuuri muutusi saaks vajadusel eraldi uurida. Kuna märgala sügavus on pidevalt 1 m, siis kõrguspunktid tähistavad 10 cm paksust kihti. Reovee sissevooluava asukoht asub kõrguspunktis nr 1 ehk siis esimese 10 cm sees.

8.-12. Täitematerjaliks on valitud erinevad Leca kergkruusad diameetritega 2-4, 4-10 ja 10-20 mm ning nende erisoojuseks on jäetud vaikeväärtus 1.00 kJ/kg.K, mille õigsust saab kontrollida raamatust „*Introduction to Building Physics*“ [32]. Vastavalt kergkruusa terasuurustele, muutuvad ka täitematerjali tihedus ja soojusjuhtivus (tabel 2) [33;34]. Täitematerjali poorsuseks on valitud 45% [33] ning kontaktpindalaks vaikeväärtus 100 m<sup>2</sup>. Leca kergkruusadel on kõrge hüdrauliline juhtivus, poorne struktuur ja hea fosfori sidumisvõime, mis teeb Leca väga heaks pinnasfiltri täite- kui ka isoleerivaks materjaliks [35].

Tabel 2. Leca kergkruusa erinevad karakteristikud vastavalt terasuuruste diameetritele.

Leca kergkruusa diameeter (mm)	2...4	4...10	10...20
Nimetus	Peentäide	Kergtäide	Termotäide
Tihedus	450 kg/m <sup>3</sup> *	300 kg/m <sup>3</sup> *	260 kg/m <sup>3</sup> *
Soojusjuhtivus	0.16 (W/mK)	0.14 (W/mK)	0.12 (W/mK)

\* kasutatud kirjanduses välja toodud andmete keskmised väärtused.

13.-16. Pinnasfiltri algsed omadused on jäetud vaikeväärtusteks, sest simuleeritakse kahe aasta muutusi, millest kasutatakse ainult teise aasta andmeid. Sel juhul ei põhjusta pinnasfiltri algsed andmed ebakõla tulemuste saamisel.

17.-20. Vedeliku omadused on samuti jäetud vaikeväärtusteks, sest tegemist on vee karakteristikutega.

21. Ventilatsioonirežiimiks on valitud nr. 2, mis tähendab, et õhk seguneb terve pinnasfiltri ulatuses, mitte ainult ülemises kihis.

22.-24. Teoreetilise aurustumise kiirus ja õhu karakteristikud on jäetud vaikeväärtustena.

26.-28. Väikseim pinnaseosa suurus, selle kordaja ning pinnase mõjuala horisontaalne ja vertikaalne kaugus on vaikimisi valitud väärtused, mis määravad soojuse leviku omadused ümbritsevas pinnases ning selle mõjuala kauguse.

29.-31. Ümbritsevaks pinnaseks on planeeritud kruusane või liivane pinnas, seega soojusjuhtivuseks on valitud 2.0 W/m.K [32]. Pinnase tiheduseks on valitud kuiva liiva ja kruusa segupinnase tihedus 1650 kg/m<sup>3</sup>. Erisoojus on jäetud vaikeväärtusena, sest see sobib valitud pinnasega.[36]

32.-34. Keskmise Eesti pinnase temperatuuri arvutati välja kasutades Eesti meteoroloogia aastaraamatut 2013 [37], kus olid välja toodud maapinna temperatuuri kuude keskmised,

miinimum- ja maksimumväärtused viies kliimajaamas: Tallinn-Harku, Tartu-Tõravere, Vilsandi, Võru ja Väike-Maarja. Pinnase temperatuuri amplituud on arvatud miinimumtemperatuuri suhtes, viidates punktile nr. 34, kus on vaja sisestada ka pinnase miinimumtemperatuuri toimumise päev.

35.-40. Väljundfaili loogiline üksus on väärtus, mis on TRNSYSi poolt määratud ja kasutaja ei saa seda muuta ning mis väljendab kõikide pinnaseosakeste temperatuuri. Pinnase soojuskande ülemine, alumine ja külgede piiri väärtus 1 väljendab pinnasfiltri ja seda ümbritseva keskkonna vahel soojusvahetuse toimumist. Ülemise kihi neeldumiskoeffitsient on jäetud vaikeväärtuseks, kuid külgede neeldumiskoeffitsient on muudetud nulliks, sest pinnasfiltri küljed asuvad maa all.

TRNSYSi sisendid ja nende väärtused on välja toodud tabelis 3.

Tabel 3. Sisendid.

Sisendi number	Nimi	Ühik	Väärtus		
1.	Sissevoolu temperatuur	C	5	10	15
2.	Sissevoolu vooluhulk	kg/h			
3.	Väljavoolu vooluhulk	kg/h			
4.	Välisõhu temperatuur	C			
5.	Väliskeskkonna absoluutne õhuniiskus	kgH <sub>2</sub> O/kgÕhk			
6.	Väliskeskkonna suhteline õhuniiskus	%			
7.	Ventilatsiooni/ infiltratsiooni kiirus	kg/h		0.0	
8.	Väliskeskkonna õhurõhk	atm			
9.	Õhu segunemiskiirus	kg/h		0.0	
10.	Vedeliku segunemiskiirus	kg/h		0.0	
11.	Õhu konvektiooni koefitsient täitematerjali	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		11	
12.	Õhu konvektiooni koefitsient vedelikku	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		11	
13.	Vedeliku konvektiooni koefitsient täitematerjali	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		20	
14.	Õhu konvektiooni koefitsient pinnasfiltri sein	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		11	
15.	Vedeliku konvektiooni koefitsient pinnasfiltri sein	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		20	
16.	Pinnasfiltri sein konvektiooni koefitsient väliskeskkonda	kJ/h.m <sup>2</sup> .K		20	
17.	Ülemisele pinnale langev päikesekiirgus	kJ/hr.m <sup>2</sup>			
18.	Külgedele langev päikesekiirgus	kJ/hr.m <sup>2</sup>		0	



1. Reovee sissevoolu temperatuur on üks sisenditest, mis on väga oluline leidmaks reovee soojuspumba mõju pinnasfiltersüsteemi toimimisele. Mida efektiivsemalt soojuspump töötab, seda madalamaks muutub reovee temperatuur. Et leida reovee temperatuuri mõju tähtsust pinnasfiltersüsteemile, eristatakse antud töös kolme erinevat sissevoolu temperatuuri: 5, 10 ja 15 °C.

2.-3. Antud sisendid on modelleerimisprogrammis ühendatud sissevoolu ja väljavoolu andmetega, milles on kasutaja poolt defineeritud soovitatavad väärtused. Täpsemalt saab antud töös kasutatud veerežiimidega tutvuda peatükis 3.2.1.

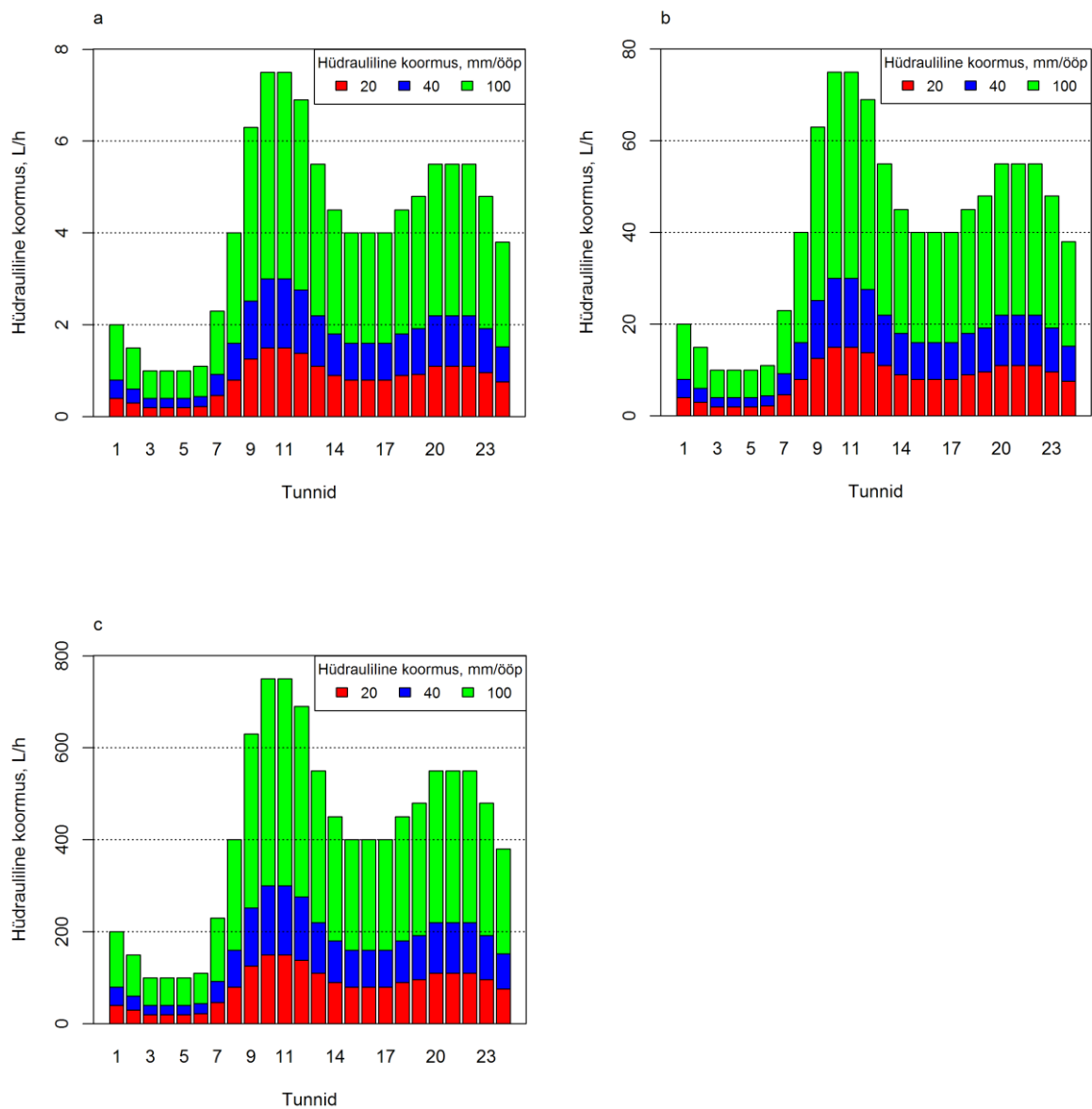
4.-6., 8., 17. Antud sisendid on ühendatud Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama kliimafailiga, milles on kajastatud Eesti standardaasta karakteristikud.

7., 9.-16., 18. Need väärtused on jäetud vaikimisi valituteks.

### **3.2.1 Veerežiim**

Olenevalt pinnasfiltri suurusest, on väga oluline faktor selle toimimises ka hüdrauliline koormus ja veerežiim. Kui veevool on pidev, siis on pinnasfiltri jäätumise tõenäosus väiksem, sest sellesse siseneb pidevalt uut vett, mis on talviti kõrgema temperatuuriga kui välisõhk.

Kuid enamasti on pinnasfiltritesse saabuv vee kogus ööpäevas suhteliselt fluktueriv. Veevool on suurenenud päeval ajal ning madal öösi. Et modelleerimise tulemused oleksid võimalikult realistlikud, sisestati TRNSYS mudelisse Põhja-Ameerika ühepereelamu tüüpilise päevase veerežiimi. Need andmed on saadud uurides 1188 ühepereelamu veekasutust 12nes erinevas asukohas antud kontinendil [38]. Veerežiim karakteristikud on sisestatud ka TRNSYS programmi, kus hüdrauliline koormus on muutuv vastavalt katsele (joonis 1). Nimelt uuriti kolme erineva hüdraulilise koormuse mõju pinnasfiltri temperatuuri dünaamikale. Varieeriti kolme väärtuse vahel: 20, 40 ja 100 mm/ööp. Kõigi kolme väärtuse kohta tehti katsed, kus muutusid pinnafiltri pindala, kergkruusa osakeste suurus ja reovee temperatuur.



Joonis 1. Pinnasfiltrite ööpäevased veerežiimid. a – 40 m<sup>2</sup>-se pindalaga pinnasfiltrite ööpäevane veerežiim, b – 400 m<sup>2</sup>-se pindalaga pinnasfiltrite ööpäevane veerežiim, c – 4000 m<sup>2</sup>-se pindalaga pinnasfiltrite ööpäevane veerežiim.

## 4 Tulemused ja analüüs

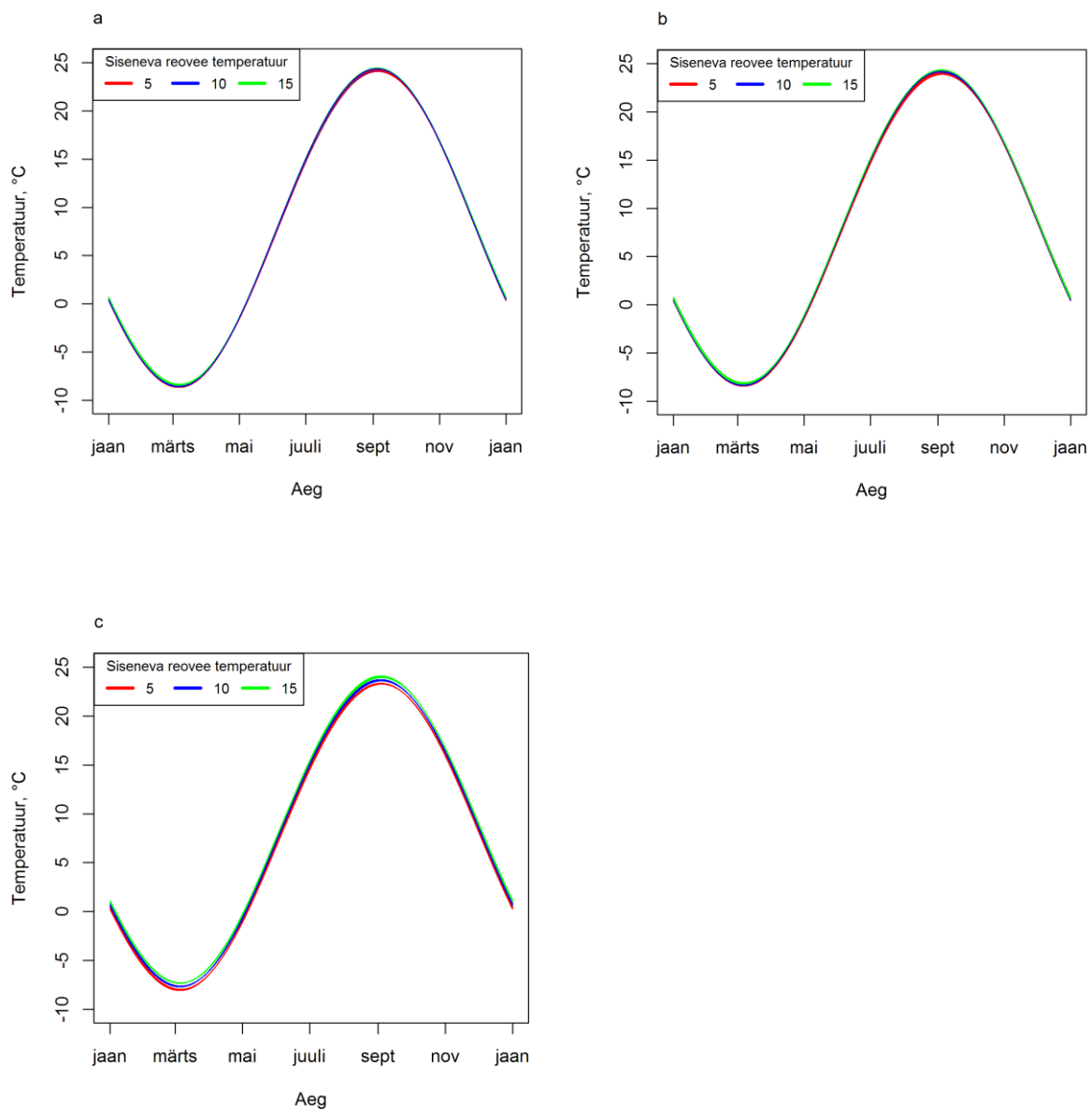
### 4.1 TRNSYS väljundid

Saadud TRNSYSi väljundid sisestati .txt formaadis RStudio statistikaprogrammi, kus vormistati analüüsivad graafikud.

#### 4.1.1 Pinnasfilter pindalaga 40 m<sup>2</sup>

Joonisel 2 on kujutatud 40 ruutmeetrilise pinnasfiltri väljavoolu aastase temperatuuri dünaamikat muutuvate reovee sissevoolu temperatuuridega, mis on märgitud joonisel erinevate värvidega (5, 10 ja 15 °C). Kõikide temperatuuride simulatsioonid on tehtud erinevate Leca kergkruusadega, mille lõimise suurused on 2-4, 4-10 ja 10-20 mm. Kokku on ühel joonisel 9 erinevat temperatuuri kõverat (3 erinevat temperatuuri korda 3 Leca kergkruusa).

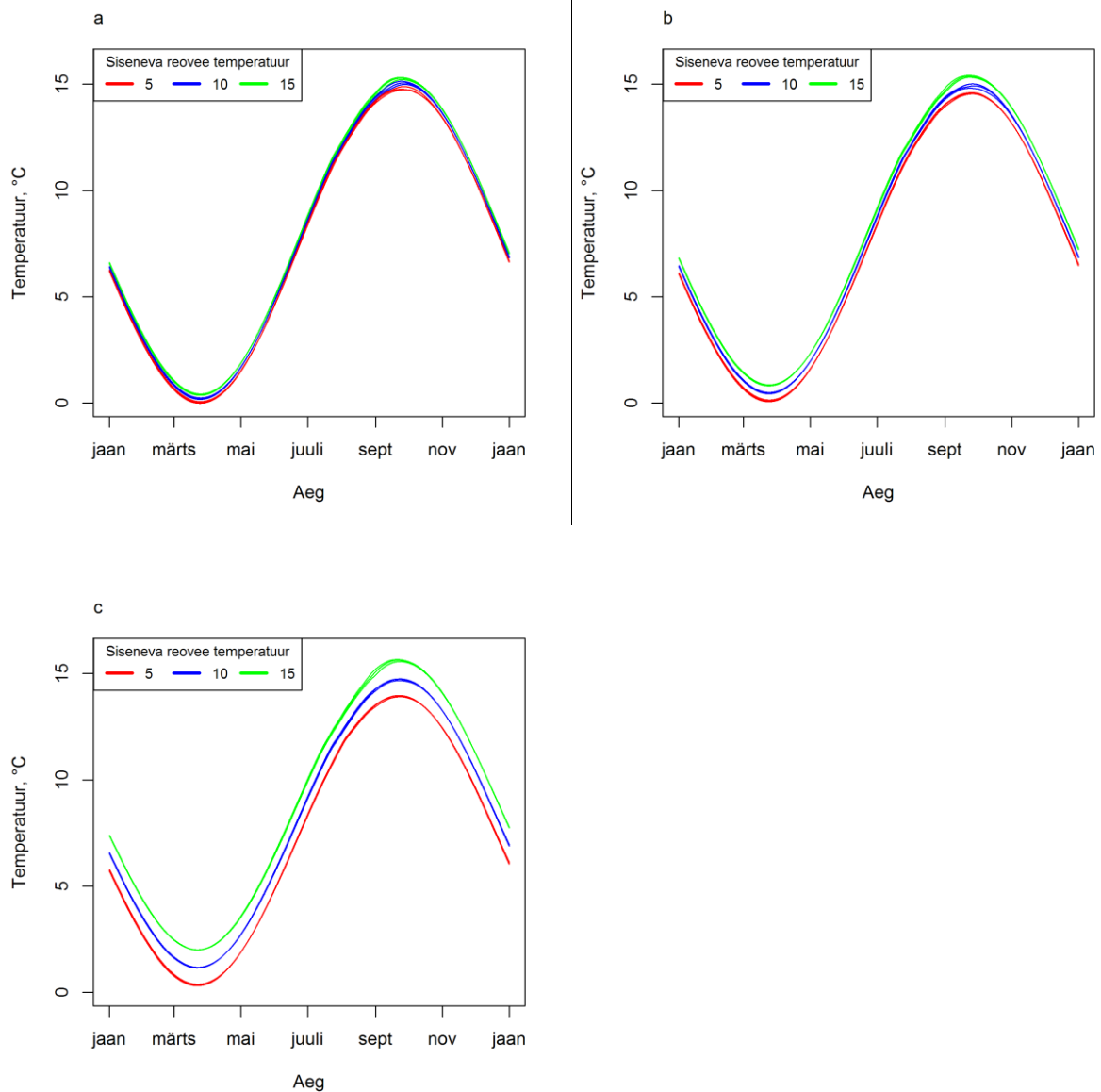
Antud graafikutelt on näha, et 2a väljavoolu temperatuurid on väga ühtlased, 2b temperatuurikõverad on juba natukene eraldunud ning 2c graafikult on juba selgelt eristatavad temperatuurikõverad sissevoolu temperatuuri järgi – kõige ülemine on 15 kraadise reovee sissevoolu puhul, keskmine 10 ja alumine 5 °C puhul. Graafikutel sissevoolu temperatuuri kaudu eristavate väljavoolu temperatuuride erinevus tuleneb järelikult hüdraulilise koormuse suurusest – mida väiksem on ööpäevane sissevool, seda rohkem on vee temperatuur mõjutatud ümbritsevatest tingimustest ja seda vähem tähtis on reovee enda algne temperatuur. 2c graafikult saab veel välja lugeda, et kuigi temperatuurikõverad on eraldatavad sissevoolu temperatuuri järgi, siis erinevad Leca kergkruusad on suhteliselt ühesuguse dünaamikaga antud sissevoolu temperatuuri juures.



Joonis 2c. 40 m<sup>2</sup>-lise pinnasfiltri väljavoolu temperatuurid aasta lõikes. a – hüdrauliline koormus 20 mm/ööp, b – hüdrauliline koormus 40 mm/ööp, c – hüdrauliline koormus 100 mm/ööp.

#### 4.1.2 Pinnasfilter pindalaga 400 m<sup>2</sup>

Sarnaselt eelmisele katsele on ka siin jäetud pindala konstantseks ning Leca kergkruus, sissevoolu temperatuur ja hüdrauliline koormus on muutujateks (joonis 3).



Joonis 3. 400 m<sup>2</sup>-lise pinnasfiltri väljavoolu temperatuurid aasta lõikes. a – hüdrauliline koormus 20 mm/ööp, b – hüdrauliline koormus 40 mm/ööp, c – hüdrauliline koormus 100 mm/ööp.

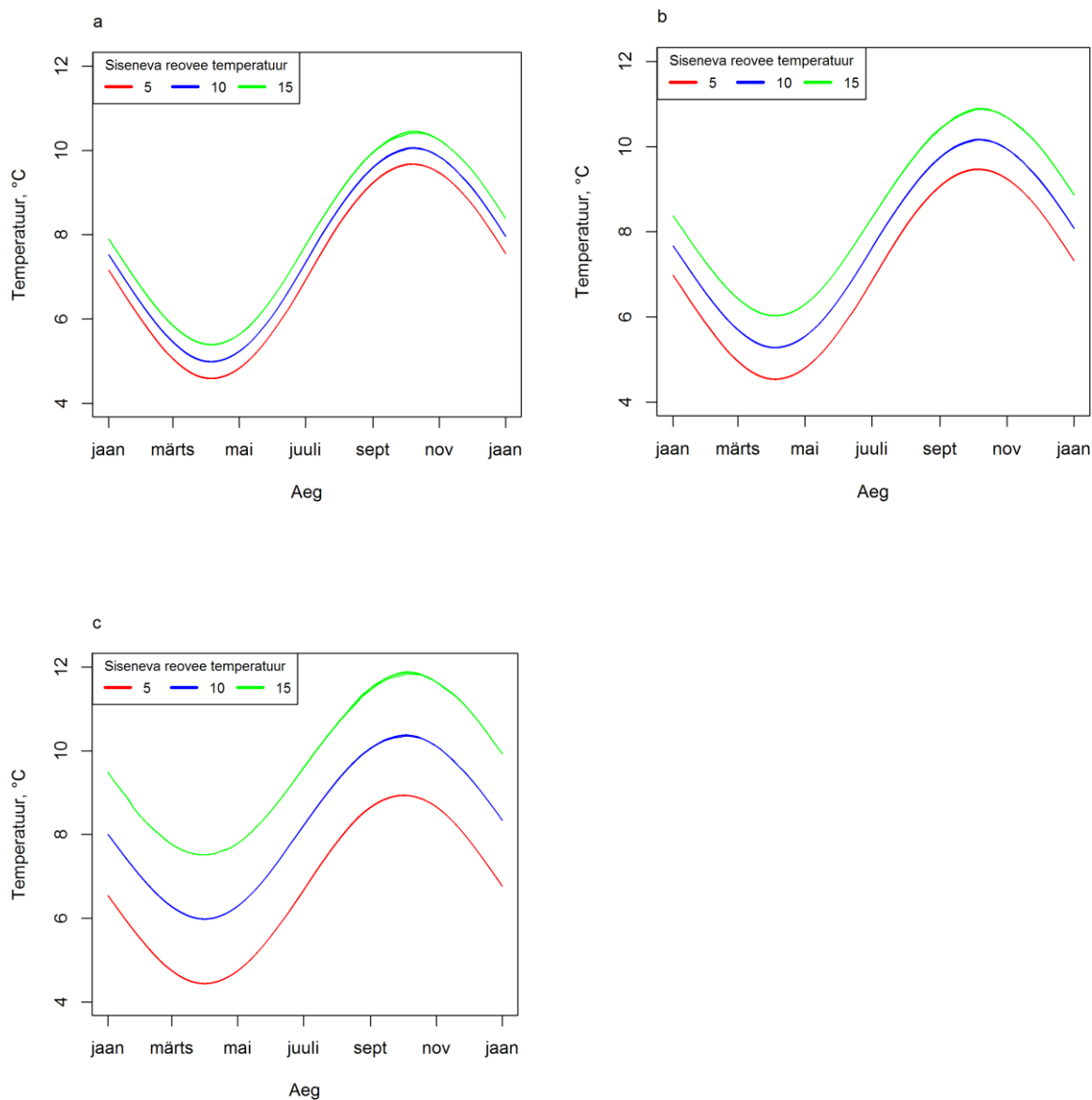
Graafikutelt on ka siin selgelt näha, et Leca kergkruusade erinevused ei mängi väljavoolu temperatuuris suurt rolli. Kuna talvekuudel on süsteemi temperatuur suhteliselt madal, sõltub väljavoolu temperatuur pigem filtrisse siseneva reovee temperatuurist. Kuid suvekuudel, kui süsteem on mõjutatav ka muudest asjaoludest, on näha suuremaid temperatuuri erinevusi Leca kergkruusades, kuigi need on üpriski vähe olulised. Suurema pindalaga filtri puhul joonistuvad temperatuuride jaotused siseneva reovee temperatuuri kaupa välja ning ka siin esineb trend – mida suurem hüdrauliline koormus, seda suuremad väljavoolu temperatuuride

erinevused. Kui 20 mm/ööp puhul on temperatuuride erinevused suhteliselt väikesed, siis 100 mm/ööp on juba mõne kraadiste erinevustega. Samuti on 100 mm puhul kõvera maksimum- ja miinimumväärtused tõusnud, võrreldes teiste graafikutega.

#### **4.1.3 Pinnasfilter pindalaga 4000 m<sup>2</sup>**

Joonisel 4 on 4000 ruutmeetrilise pindalaga tehismärgala väljavoolu aastase temperatuuri dünaamika, kus igal graafikul muutub hüdrauliline koormus. Ühel graafikul on 9 temperatuurikõverat väljendamaks sissevoolu temperatuuri (märgitud legendil erineva värviga) ja Leca kergkruusa erinevaid karakteristikuid.

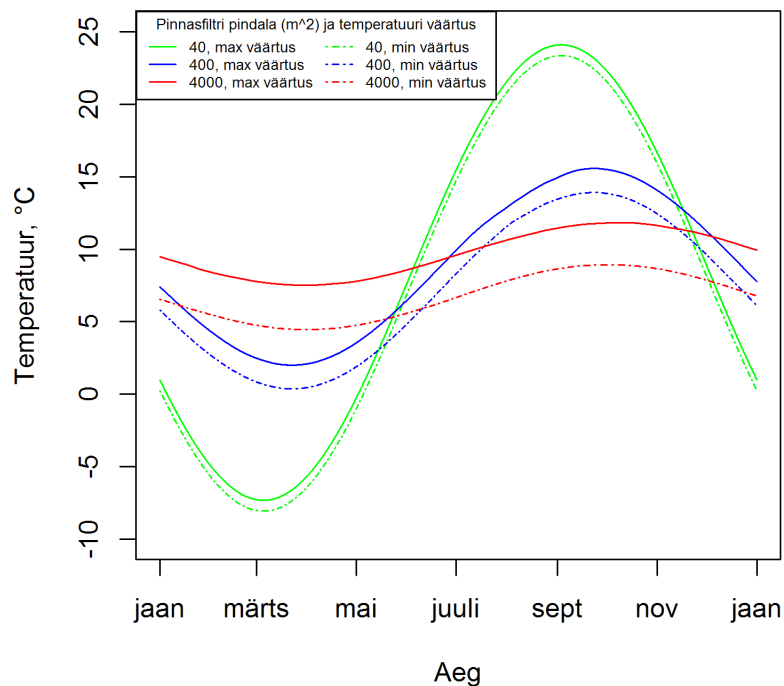
Graafikuid uurides on jällegi märgata sama trendi, mis väiksemate pinnasfiltrite puhul – mida rohkem vett pinnasfiltrit läbib, seda rohkem mõjutab väljavoolu temperatuuri siseneva reovee temperatuur. Sama võib tuletada ka pindala kohta – mida suurem filtri pindala, seda selgemini on eristatavad väljavoolu temperatuurikõverad siseneva reovee temperatuuri kaudu. Kui Leca kergkruusade mõju ei ole temperatuurile täheldatud talve- ja suvekuudel, siis septembris-novembris on märgata selle suuremat mõju (kõverad ei ole nii ühtlase peene joonega).



Joonis 4. 4000 m<sup>2</sup>-lise pinnasfiltri väljavoolu temperatuurid aasta lõikes. a – hüdrauliline koormus 20 mm/ööp, b – hüdrauliline koormus 40 mm/ööp, c – hüdrauliline koormus 100 mm/ööp.

#### 4.1.4 Väljavoolu temperatuuri dünaamika sõltuvalt pinnasfiltri pindalast

Joonisel 5 on väljatoodud kõikide graafikute omavaheline võrdlus. Kuna 81 temperatuurikõvera kuvamine ühel graafikul on visuaalselt keeruline, siis valiti igast tehismärgala pindala järgi liigitatud grupist kaks graafikut, mis kujutavad väljavoolu temperatuuri miinimum- ja maksimumväärtuseid antud pindala juures.



Joonis 5. Väljavoolu temperatuuri dünaamika sõltuvalt pinnasfiltri pindalast.

Jooniselt on näha, et mida suurem oli tehismärgala pindala, seda väiksema amplituudiga oli väljavoolu aastase temperatuuri kõikumine. Lisaks, mida suurem pindala, seda suurem on miinimum- ja maksimumtemperatuuride omavahelised erinevused. Sellest saab järeldada, et pindala suurenedes on hüdraulilise koormuse ja siseneva reovee temperatuuri mõju väljavoolu temperatuurile suuremad.



## 5 Arutelu

Kanalisatsioonitoruga ühendatav soojuspump oleks energiasäästlik lahendus, mis pakuks leevendust nii energiatarbimisele kui ka majanduslikele väljaminekutele. Vee soojendamine nõuab palju energiat, sest vesi on väga suure soojusmahtuvusega – näiteks 100 liitri dušivee kütmiseks 35 kraadini kulub 3.5 kWh energiat. Sellise koguse elektrienergia tootmisega kaasneb *ca* 3 kg CO<sub>2</sub> paiskamine atmosfääri.[39] Seega on vette salvestunud energia taaskasutamine olulisel kohal kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamisel.

Kuna kanalisatsiooni soojuspumba kasutamine vähendab reovee temperatuuri, on vajalik selle mõju uurimine puhastusjaamas toimuvatele protsessidele. Antud töös uuriti mõjusid pinnasfiltersüsteemile ja leiti, et rohkem kui siseneva reovee temperatuur oli väljavoolu temperatuurile oluline pigem pinnasfiltri mõõtmed ja hüdrauliline koormus. Küll aga tuleb kindlasti uurida, millise mõju on reovee temperatuuri vähenemisel bioloogilistele ja keemilistele protsessidele, mis puhastusjaamades toimuvad.

Antud töö tulemustest saab järeldada, et pinnasfiltri mõõtmed, hüdrauliline koormus, täitematerjal ja siseneva reovee temperatuur on väljavoolu temperatuuri mõjutavad tegurid:

- väiksematest osakestest koosnev täitematerjal on suurema tihedusega, mis tähendab, et vaba ruumi õhu liikumiseks on vähem ja seega on temperatuuri muutused väiksema amplituudiga kui suuremate osakestega täitematerjali puhul;
- suurema hüdraulilise koormusega jõuab rohkem reovett pinnasfiltrisse, mis hoiab süsteemi temperatuuri stabiilsemana. Külmemal ajal on reovesi kõrgema temperatuuriga kui välisõhk ja seega pinnasfiltrite jäätumise osakaal on väiksem;
- suurema pindala ja hüdraulilise koormusega pinnasfiltris olev vesi on vähem mõjutatud väliste tingimuste poolt ja üha suuremat rolli mängivad pinnasfiltrisse jõudva reovee temperatuur ja süsteemi enda genereeritud soojus;
- väikse pindala ja hüdraulilise koormuse puhul on siseneva reovee temperatuuri mõju väike, peamiseks teguriks on väliskliima;
- suurim väljavoolu temperatuuri amplituud oli väikseima pindalaga pinnasfiltris ja madalaima hüdraulilise koormuse puhul: vastavalt 40 m<sup>2</sup> ja 20 mm/ööp;
  - väljavoolu temperatuur küündis talvekuudel kuni -8.5 ja suvel +24.5 °C-ni
- väikseima temperatuuri amplituudiga oli kõige suurema pindala ja hüdraulilise koormusega katse: vastavalt 4000 m<sup>2</sup> ja 100 mm/ööp;

- väljavoolu aastane temperatuur jäi +4 ja +12 °C vahemikku
- Leca erinevate kergkruusade valik ei mängi olulist rolli väljavoolu temperatuuri mõjutamisel.

Väikese pindalaga tehismärgalades ei olnud sissevoolu temperatuuril suurt mõju väljavoolu temperatuurile ning suuremate pindalade puhul oli nii 5, 10 kui ka 15 °C-se reovee temperatuuri puhul väljavoolu temperatuur alati üle 0 kraadi. Seega võib järeldada, et reovee algtemperatuur ei mõjuta pinnasfiltri väljavoolu jäätumist, vaid pigem teeb seda hüdrauliline koormus ja pinnasfiltri suurus. Edasiseks aruteluks tuleks uurida, kuidas muutub suletud tehismärgala väljavoolu temperatuur, kui ümbritseda pinnasfilter soojustava materjaliga. Ilmselt on siis süsteemis oleva vee temperatuur rohkem sõltuv sissevoolu temperatuurist, kuid täpsemad mõjud on veel teadmata.

Kuigi kanalisatsiooni soojuspump säästab 1/3 energiakuludest, mis kulub sooja vee kütmisele [16], on sellel siiski suhteliselt madal kasutegur (25-35%) [11]. Soojuspumba efektiivsus on võimalik tõsta, kui katta torustikud, mis ühendavad nii soojuspumpa ja boilerit kui ka soojuspumpa ja äravoolu, isoleeriva materjaliga. Sel moel garanteeritakse, et reovesi ei jahtu enne soojusvahetisse jõudmist, kui ka see, et eelkõetud puhas vesi ei jahtu enne boilerisse sisenemist. Huvitav oleks võrrelda ka veerežiimi mõjusid soojuspumba efektiivsusele. Ühtlase veerežiimiga ei läheks reovee soojusenergia kaotsi, mis muidu voolaks tsentraalkanaliseerimisele selle 2.5 minuti jooksul, mis kulub soojusvahetis toimuva protsessi maksimaalse tööefektiivsuse saavutamiseks.

## 6 Kokkuvõte

Tänapäeva kiirelt arenevas maailmas on energiakasutus väga olulisel kohal. Üritatakse vähendada sõltuvust fossiilkütustest, kasutades selleks nii taastuvaid energiaallikaid kui ka energiaefektiivseid tehnoloogiaid. Eelkõige on tähtis erinevate meetodite ja lahenduste kombineerimine, et saavutada maksimaalne energiasääst. Sooja vee kütmisele kulub keskmiselt üks kolmandik hoone energiatarbest, mis aga pärast vee kiiret kasutamist kohe kanalisatsiooni ära kaob. Et võimaldada köetud tarbevee soojuse ära kasutamist, on välja töötatud vesi-vesi tüüpi kanalisatsiooni soojuspump. Antud töös uuritigi kanalisatsiooni soojuspumba rakendamise tuleneva reovee temperatuuri vähenemise mõju pinnasfiltersüsteemi väljavoolu temperatuurile. Katsete tulemustena saab järeldada, et reovee vähenenud temperatuur ei ole oluline faktor pinnasfiltri jäätumisele.

Töös analüüsiti pinnasfiltrite erinevate parameetrite mõju väljavoolu temperatuurile aasta jooksul. Muutuvateks karakteristikuteks olid siseneva reovee temperatuur ja hüdrauliline koormus, pinnasfiltri pindala ning täitematerjali osakeste suurus. Simulatsioon viidi läbi programmis TRNSYS, kasutades selleks Type 979: Wetland Treatment Cell üksust. Saadud tulemuste põhjal koostati statistikaprogrammis RStudio graafikud, kust oli võimalik uurida erinevate parameetrite kasutamise erinevusi. Neid analüüsides leiti, et kõige suurem väljavoolu temperatuuri amplituud tehtud katsetest oli väikseima pindalaga pinnasfiltris ja madalaima hüdraulilise koormuse puhul: vastavalt 40 m<sup>2</sup> ja 20 mm/ööp, kus miinimumväärtuseks oli talvekuudel -24.5 °C. Kõige väiksema temperatuuri amplituudiga oli kõige suurema pindala ja hüdraulilise koormusega katse: vastavalt 4000 m<sup>2</sup> ja 100 mm/ööp, kus väljavoolu aastane temperatuur ei kõikunud rohkem kui kümme kraadi ja ei langenud kordagi alla 0 °C. Kuigi uuriti ka erinevate Leca kergkruusa osakeste suuruste mõju väljavoolu temperatuuri käitumistele ning leiti, et antud erinevused ei olnud märkimisväärsed. Samuti ei mänginud siseneva reovee temperatuur suurt rolli pinnasfiltri külmumisel, väljavoolu temperatuuri erinevused 5, 10 ja 15 kraadi puhul olid väikesed.

Tulemuste põhjal võib väita, et kombineeritud energiasäästu tehnoloogiate rakendamine külmas kliimas on võimalik. Kanalisatsiooni soojuspumba tagajärjel vähenenud reovee temperatuur ei olnud oluline faktor pinnasfiltrist väljuva vee temperatuuris. Küll aga tuleb arvesse võtta, et ehitatav tehismärgala oleks piisava pindala ja hüdraulilise koormusega, et ei toimuks väljavoolu külmumist talvekuudel.

Edasiseks tuleks kindlasti uurida, mis mõju on reovee temperatuuri vähendamisel bioloogilistele ja keemilistele protsessidele, mis pinnasfiltrites toimuvad. Lisaks uurida viise, kuidas suurendada soojuspumba efektiivsust.

## 7 Summary

### **THE ANNUAL DYNAMICS OF THE SOIL FILTER'S OUTFLOW TEMPERATURE – MODELLING WITH TRNSYS TYPE 979: WETLAND TREATMENT CELL.**

In today's rapidly evolving world energy use is very important. Scientists are trying to find more ways on how to reduce the dependence on fossil fuels by using renewable energy sources as well as new energy efficient technologies. It is important to combine different solutions and methods to achieve maximum energy savings. Water heating takes up to one third of the building's energy consumption, although after a quick use the thermal energy retained in the hot water instantly goes down the drain. In order to use the energy of the sewage water a water-water based heat pump has been developed – the sewage water heat pump. As a consequence of applying the sewage water heat pump, the sewage water's temperature decreases. In this paper the influence of the sewage water's temperature decrease on the soil filter's outflow temperature was investigated.

The influence of different soil filter's parameters on the outflow's annual temperature was analyzed. The inflow's temperature, hydraulic load, soil filter's surface area, and the medium's different particle sizes were the variables. The simulation was carried out using TRNSYS modelling software Type 979: Wetlands Treatment Cell. The charts were formed by using RStudio, a programming language for statistical computing and graphics. By analyzing the charts, the greatest outflow temperature amplitude was found to occur in soil filter with the smallest surface area and hydraulic load (respectively 40 m<sup>2</sup> and 20 mm/d). The chart with the smallest outflow temperature amplitude was based on the biggest surface area and the largest hydraulic load – respectively 4000 m<sup>2</sup> and 100 mm/d – where the annual temperature did not vary more than 10 degrees. Though the influence of using different Leca lightweight aggregates was investigated, it was found that the differences between the outflow temperatures were insignificant. Likewise, the inflow's different temperatures did not play a major role in the soil filter's freezing.

Based on the research analysis, it is possible to apply combined energy efficient systems in cold climates. The decrease in the sewage water temperature due to the heat pump was not an important factor in the dynamics of the outflow's temperature. However, to prevent freezing during the winter, it must be taken into account that the constructed wetland should be of sufficient size and have a large hydraulic load.

For further discussion, the effect of the decreased sewage water temperature on the biological and chemical processes that take place in the wetland should be investigated. In addition, finding new ways how to increase the efficiency of the sewage water heat pumps is something to explore.

## **8 Tänuavaldused**

Töö autor sooviks tänada oma juhendajat, Tõnu Muringut, kes oli suureks abiks nii sisulise kui ka tehnilise poolega kuni töö valmimiseni. Tänuavaldused ka energiatõhusa ehituse tuumiklabori töötajatele, kes aitasid koguda andmeid ja ületada TRNSYS modelleerimisprogrammiga töötamisel tekkinud tõkkeid, ning Raul Reinsonile ja Kalle Riepulkile, kes olid nõus jagama kogutud andmeid ja informatsiooni vastavalt Leca kergkruusade ja E. Vilde tee 59 korterelamusse paigaldatud soojusvaheti kohta.

## 9 Kasutatud kirjandus

- [1] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta (uuesti sõnastatud). Euroopa Liidu Teataja, 18.06.2010, L 153/13-35.
- [2] Roodman, D., Lenssen, M. A building revolution: how ecology and health concerns are transforming construction, in: Book of papers, Worldwatch Institute Paper 24, Washington, DC, 1995.
- [3] Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M. The potential of (waste) water as energy carrier. *Energy Conversion and Management* 65, 2013, 357–363.
- [4] Schmid, F. Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers. Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants, Zurich, Switzerland, 2009.
- [5] Eesti Energia. Energiasäästu seadmed. URL: <https://www.energia.ee/kokkuhoid/seadmed> Viimati vaadatud 23.05.2014.
- [6] Ranniku, M. Kuidas õnnestub soojuspumbaga küttekulusid vähendada. URL: <http://www.konvil.ee/index.php/et/uudised-ee/item/130-kui-palju-onnestub-soojuspumbaga-kuttekulusid-vahendada> Viimati vaadatud 23.05.2014.
- [7] Paist, A., Poobus, A. Soojusgeneraatorid. Õppematerjal. Tallinna Tehnikaülikool, mehaanikateaduskond, soojustehnika instituut. TTÜ Kirjastus, Tallinn, 2008.
- [8] Eesti Soojuspumba Liit. Soojuspumbad. URL: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumbad> Viimati külastatud 23.05.2014.
- [9] Miks, J. ESPL. Soojuspumpade kasutuselevõtu statistika Eestis perioodil 2003 – 2012. URL: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Statistika> Viimati vaadatud 23.05.2014.
- [10] Dürrenmatt, D.J., Wanner, O. A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 2013, 48 (2014) 548-558.
- [11] Schnieders, J. Experience with drain water heat recovery. 18<sup>th</sup> International Passive House Conference 2014 – Conference Proceedings. Aachen, 25-26.04.2014, 543-548.
- [12] Cipolla, S.S., Maglionico, M. Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature. *Energy and Buildings*, 2013, 69, 122-130.



- [13] Seybold, C., Brunk, M.F. In-house waste water heat recovery. *REHVA Journal*, December 2013, 18-21.
- [14] Gredzens, I. 07.04.2014. toimus antud töö autori vestlus Zypho kontaktisikuga Lätis ja Eestis, Ivars Gredzensiga.
- [15] Riepulk, K. 07.04.2014. toimus antud töö autori vestlus OÜ Roheline Mõte kontaktisikuga Kalle Riepulkiga. Edasipidine suhtlus toimus e-posti teel, kus Riepulk saatis töö autorile soojusvaheti efektiivsuse kohta dokumente.
- [16] Saarse, H. 10.12.2012. 5-kordse paneelmaja tüüptrepikoja sooja vee valmistamiseks kuluva soojusenergia vähendamine kanalisatsiooni soojusvaheti Heateco C30V108 paigaldamise abil. Materjal omandatud K. Riepulkilt e-posti vestluse vahendusel.
- [17] Talpsep, I., Kasak, K., Tamme, I., Piirimäe, K. Tehismärgalad: põllumees puhastab vett. SA Eestimaa Looduse Fond. Tartu, 2012.
- [18] Wallace, S.D. Design and performance of cold climate wetland treatment systems. Proceedings of the 2000 National Onsite Wastewater Recycling Association (NOWRA) Annual Conference, 31 October – 3 November 2000, Grand Rapids, Michigan.
- [19] Noorvee, A., Mander, Ü., Karabelnik, K., Põldvere, E., Maddison, M. Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgalapuhastite rajamise juhend. Tartu, 2007.
- [20] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2010, 2, 530-549.
- [21] Wallace, S., Parkin, G., Cross, C. Cold climate wetlands: design and performance. *Water Science and Technology*, 2001; 44(11-12):259-65.
- [22] Noorvee, A. The applicability of hybrid subsurface flow constructed wetland systems with re-circulation for wastewater treatment in cold climates. Tartu Ülikooli Kirjastus, 2007, tellimus nr 241.
- [23] Mairing, T., Mander, Ü., Kuusemets, V., Öövel, M., Ihme, R., Pieterse, A. Wastewater purification efficiency in experimental treatment wetlands in Estonia. Transformation of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 2001, pp. 201-224.

- [24] Crites, R., Tchobanoglous, G. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. WBC/McGraw-Hill. International Editions, 1998.
- [25] Kadlec, R.H., Knight, R.L. Treatment Wetlands. Lewis Publishers, 1996.
- [26] USEPA (US Environmental Protection Agency). Design manual: nitrogen control. EPA/625/R-93/010. United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington DC, 1993.
- [27] Mauring, T. Wastewater treatment wetlands in Estonia: efficiency and landscape analysis. Tartu Univeristy Press, 2001.
- [28] University of Wisconsin-Madison. Faculty: Sanford A. Klein. URL: [http://directory.engr.wisc.edu/me/faculty/klein\\_sanford](http://directory.engr.wisc.edu/me/faculty/klein_sanford) Viimati külastatud 23.05.2014.
- [29] University of Wisconsin-Madison. A TRaNsient System Simulation Program. URL: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html> Viimati külastatud 23.05.2014.
- [30] TRNSYS 17 – a TRaNsient SYstem Simulation program. Type 979: Wetland Water Treatment Cell.
- [31] The Engineering ToolBox. Solids – Specific Heats. URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html) Viimati külastatud 16.05.2014.
- [32] Hagentoft, C.-E. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur, Lund, 2005.
- [33] Leca Trading & Concession A/S. Lightweight, Insulating Building Materials. URL: <http://www.gpm.org/e/uploads/131-b810984952.pdf> Viimati külastatud 16.05.2014.
- [34] Saint-Gobain Ehitustooted AS, Weber äriüksus. Leca kergkruus. URL: [http://www.weber.ee/uploads/tx\\_weberproductpage/Kergkruus\\_2013\\_small\\_01.pdf](http://www.weber.ee/uploads/tx_weberproductpage/Kergkruus_2013_small_01.pdf) Viimati külastatud 16.05.2014.
- [35] Maehlum, T., Jenssen, P.D., Warner, W.S. Cold-climate constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1995, Vol. 32, No. 3, pp 95-101.
- [36] The Engineering ToolBox. Densities of some common materials. URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/density-materials-d\\_1652.html](http://www.engineeringtoolbox.com/density-materials-d_1652.html) Viimati külastatud 16.05.2014.

[37] Kallis, A., Loodla, K., Tillmann, E., Krabbi, M., Juust, E., Pärn, R., Jõeveer, A., Šišova, V., Pärnpuu, P. Eesti meteoroloogia aastaraamat 2013. Keskkonnaagentuur, 2014.

[38] Mayer, P.W., DeOreo, W.B., Opitz, E.M., Kiefer, J.C., Davis, W.Y., Dziegielewski, B., Nelson, J.O. Residential end uses of water. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1999.

[39] OÜ Roheline mõte. Huvitavat lugemist. URL: <http://heateco.eu/index.php?id=10327>  
Viimati külastatud 23.05.2014.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Hanna Soe (sünnikuupäev: 28.12.90),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Pinnasfiltri väljavoolu aastase temperatuuri dünaamika modelleerimine TRNSYS Type 979-ga“, mille juhendaja on Tõnu Muring,
  - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 27.05.2014