



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

**MUUTUVA TEABEGA LIIKLUSMÄRKIDE
SOOJENDUSLAHENDUSTE VÕRDlus**

**COMPARISON OF HEATING SYSTEMS IN VARIABLE
MESSAGE SIGNS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Theodor Vegmann

Üliõpilaskood 234979EACB

Juhendaja: Dmitri Nešumajev, vanemteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"31" mai 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"31" mai 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Theodor Vegmann (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Muutuva teabega liiklusmärkide soojenduslahenduste võrdlus“,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Dmitri Nešumajev,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

31. mai 2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Theodor Vegmann, 234979EACB

Õppekava, peeriala: 167437 (EACB), Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia

Juhendaja(d): vanemteadur Dmitri Nešumajev, 6203910

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) **Muutuva teabega liiklusmärkide soojenduslahenduste võrdlus**

(inglise keeles) **Comparison of Heating Systems in Variable Message Signs**

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Katseliste ja numbriliste meetodite rakendamisel analüüsida muutuva teabega liiklusmärkide soojenduslahendused

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kooskõlastada lõputöö teema ja uurimiseesmärk juhendajaga	26.03.24
2.	Kirjanduse ülevaatus, katsete läbiviimine ja mudeli defineerimine	26.04.24
3.	Esitada lõputöö esimene versioon juhendajale	08.05.24
4.	Esitada lõputöö viimane versioon juhendajale	18.05.24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "31" mai 2024. a

Üliõpilane: Theodor Vegmann "31" mai 2024. a
/allkiri/

Juhendaja: Dmitri Nešumajev "31" mai 2024. a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
1 SISSEJUHATUS	8
2 MUUTUVA TEABEGA LIIKLUSMÄRGID	10
2.1 Seadmete olemus.....	10
2.1.1 Muutuva teabega liiklusmärkide ehitus.....	11
3 LUME EEMALDUMINE PINDADELT	13
3.1 Lume eemaldumine kalde all olevatelt pindadelt.....	13
3.2 Lume eemaldumise mehhanismid päikesepaneelidelt	15
3.2.1 Sulamine.....	15
3.2.2 Maha libisemine	16
3.2.3 Aeglane sulamine	16
3.2.4 Sulamine koos maha libisemisega	17
3.3 Lume sulatamine.....	18
4 VÕRRELDAVAD SOOJENDUSLAHENDUSED	19
4.1 Kasti ristmik	19
4.2 <i>Smart</i> E263/E77 projekt.....	21
4.3 Kohapealsed katsed	23
4.4 Modelleerimine.....	26
4.4.1 Kasti ristmik	28
4.4.2 <i>Smart</i> E263/E77 projekt	30
5 SÜSTEEMIDE VÕRDLUS	34
6 KOKKUVÕTE.....	36
7 SUMMARY	38
8 KASUTATUD KIRJANDUS.....	40
9 LISAD.....	41

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes autori isikliku ning tööalaste huvide kokkulangemise tulemusena. Põhilised alg- ning katseandmed koguti autori töökohal Transpordiametis. Töö koostati perioodil jaanuar 2023–mai 2024.

Nii soojustehniliste arvutuste, kui ka lõputöö üldisel koostamisel abistas autorit lõputöö juhendaja Dmitri Nešumajev. Töös võrreldavate süsteemide tööpõhimõtete osas nõustas autorit Traffest OÜ hooldusjuht Ivo Raudhäiding. Töö autor tänab Camilla Kasteina, kes aitas mõlemal objektil korduvalt empiirilisi katseid läbi viia.

Töö uurib kahe muutuva teabega liiklusemärgi soojenduslahenduse toimivust ning võrdleb neid. Töö käigus tutvutakse kuidas lumi muutuva teabega liiklusemärgidele sarnastelt pindadelt sulab ja eemaldub, võttes aluseks lume eemaldumise mehhanismid päikesepaneelidelt. Töö uurib, kas kasutusel olevad soojenduslahendused täidavad vajalikud kriteeriumid, et panna lumi muutuva teabega liiklusemärgidelt sulama või mitte.

Märksõnad: muutuva teabega liiklusemärgid, lume sulamine pindadelt, pindade soojendamine, Autodesk Inventor Nastran, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

LED – valgusdiod (light-emitting diode)

LWC – vedela vee sisaldus (liquid water content)

RGB – punane, roheline, sinine (red, green and blue)

VMS – muutuva teabega liiklusmärk (variable message sign)

VSL – muutuva teabega kiirusmärk (variable speed limit)

VWS – muutuva teabega hoiatusmärk (variable warning sign)

1 SISSEJUHATUS

Liiklusmärke kasutatakse selleks, et edastada liiklejatele informatsiooni. Tavapärased liiklusmärgid kuvavad püsivalt sama infot, mis on valdavalt seotud liiklusmärgi asukohaga. Olgu selleks siis keelu- ja mõjualamärgid, hoiatusmärgid või juhatusmärgid. Muutuva teabega liiklusmärgid võimaldavad aga kuvada ajakohast infot teeolude kohta. Muutuva teabega liiklusmärgid on programmeeritavad liikluskorraldusvahendid, mis on võimelised kuvama soovitud ajakohast infot, mida liiklejatele edastada. Muutuva teabega liiklusmärgid on tavaliselt püsivalt paigaldatud kas maanteede kohale või kõrvale. [1]

Eestis võeti esimesed muutuva teabega liiklusmärgid kasutusele 2006. aastal, kui Koidula ja Luhamaa piiripunktidesse paigaldati elektroonilised infotablood, mis kuvavad infot riigis kehtivate liiklusreeglite kohta. Esimesed muutuva teabega kiirusmärgid, muutuva teabega hoiatusmärgid ning nende kombinatsioonid võeti Eestis kasutusele 12 aastat hiljem, aastal 2018. Aastal 2020 võeti kasutusele teine teelõik, kus kasutatakse muutuva teabega kiirusmärke. 2022. aasta suvel võeti kasutusele kolmas taoline teelõik ning taoliste teelõikude osakaal kasvab ka edaspidi. Muutuva teabega kiirusmärk kehtestab lubatud suurima sõidukiiruse, mis võib olla nii kõrgem kui madalam Eestis kehtestatud üldisest asulavälisest piirkiirusest 90 km/h. Seetõttu peavad muutuva teabega kiirusmärgid olema liiklejatele loetavad ööpäevaringselt ning igasugustes ilmastikutingimustes. Samuti peab ööpäevaringselt ning igasugustes ilmastikutingimustes olema tagatud muutuva teabega hoiatusmärkide loetavus, sest märke kasutatakse hoiatuste edastamiseks ainult vastava ohuolukorra tekkimisel.

Esimeste aastate kasutajakogemuse põhjal on selgunud üks probleem mis ilmneb talveperioodil, lumesaju ning -tuisu korral. Probleemiks on olukord, kus sadav lumi kleepub muutuva teabega liiklusmärgi korpuse esipaneelile. See muudab muutuva teabega liiklusmärgi poolt kuvatava info liiklejale raskesti loetavaks või isegi täiesti loetamatuks olukorras, kus ajakohane info teeolude kohta on õigete sõiduvõtete valimiseks olulise tähtsusega. Eeltoodud probleemi lahendamiseks otsustas Transpordiamet kahe projekti raames hankida muutuva teabega liiklusmärgid, mille korpuse esipaneeli on võimalik soojendada. Muutuva teabega liiklusmärkide tootjatel puudus kogemus köetavate VMS-ide tootmisel. Kummagi projekti raames tarnitud VMS-ide soojenduslahendusi pole varem klientidele tarnitud.

Antud töö käigus tutvutakse muutuva teabega liiklusmärkide ehitusega ning nendes kasutatud soojenduslahendustega. Töö eesmärgiks on uurida kumba soojendusüsteemi kasutades sulab lumi märgi esipaneelilt kiiremini, kasutades selleks

katselisi ja numbrilisi meetodeid. Töö eesmärgi saavutamiseks tutvutakse teadustöödega, kus on uuritud lume sulamise mehhanisme VMS-idelt või sarnastelt pindadelt. Töö käigus viiakse läbi empiirilised katsed, mille käigus mõõdetakse VMS-i esipaneeli temperatuuri mõlema soojenduslahenduse töö käigus. Seejärel modelleeritakse mõlema soojendussüsteemi tööd, kasutades selleks sobilikku tarkvara. Tulemusena analüüsitakse mõlema soojendussüsteemi tööd, võrreldes omavahel katseandmeid ning modelleeritud tulemusi.

Töö teises peatükis tutvutakse muutuva teabega liiklusmärkide ehitusega. Töö kolmandas peatükis antakse ülevaade lume sulamise mehhanismidest ning neljandas peatükis tutvutakse läbi viidud katsete ning modelleerimiste tulemustega. Viiendas peatükis on toodud kahe küttesüsteemi lühivõrdlus. Lisades on toodud modelleerimiseks vajalikud lähteandmed ning tulemusena saadud toorandmed.

2 MUUTUVA TEABEGA LIIKLUSMÄRGID

Järgnevides peatükkides kirjeldatakse muutuva teabega liiklusmärkide olemust ja ajalugu ning nende ehitust.

2.1 Seadmete olemus

Muutuva teabega liiklusmärgid ei ole midagi uut. Esimesed muutuva teabega liiklusmärgid võeti teadaolevalt kasutusele 1950-ndatel Ameerika Ühendriikides. Hiljem hakati muutuva teabega liiklusmärke kasutusele võtma ka Euroopas. Neid kasutati samadel eesmärkidel nagu tänapäeval – liiklejate hoiatamiseks erakorraliste liiklusolude eest. Nendeks võisid olla näiteks liiklemist raskendavad ilmaolud, kui ka teel juhtunud liiklusõnnetused. [2]

Muutuva teabega liiklusmärgid saab jagada kaheks: mehaanilised tablood ning valgustablood. Mehaanilistel muutuva teabega märkidel on kaks või enam sõnumit mida saab vahetada märgi keeramise, pööramise või liigutamisega elektrimootori abil. Mehaanilisi tabloosid on kasutatud juba aastakümneid ning kasutatakse ka tänapäeval. Mehaanilised tablood sobivad kohtadesse, kus ajakohane info on võimalik tagada piiratud arvu sõnumite või kujutistega. Mehaaniliste muutuva teabega liiklusmärkide hulka kuuluvad ka prismaatilised muutuva teabega liiklusmärgid, vt joonis 2.1.

Valgustablood kasutavad sõnumite kuvamiseks valgust. 1950-ndatel USA-s kasutusele võetud valgustablood kasutasid teksti kuvamiseks neonlampe. Tabloole olid paigaldatud kindlad sõnad, mida sai vastavalt olukorrale tööle lülitada. [2] Alates LED-lampide väljatöötamisest on muutuva teabega liiklusmärkides hakatud kasutama LED-lampe. Tänapäeval kasutatakse peamiselt kolme tüüpi LED-lampidel põhinevaid muutuva teabega liiklusmärke: eeldefineeritud märgid, RGB (*red, green and blue*) täismaatriksmärgid ning märgid, kus kasutatakse kombineeritult mõlemat tehnoloogiat. Eeldefineeritud märkide puhul määratakse kindlaks vajalikud kujutised ning LED-lambid paigaldatakse tootmise käigus selliselt, et kõiki vajalikke kujutisi oleks võimalik kuvada. Eeldefineeritud liiklusmärke kasutatakse peamiselt kiiruspiirangute ning pildiliste hoiatuste edastamiseks. Näide eeldefineeritud VMS-ist on näha joonisel number 2.2.

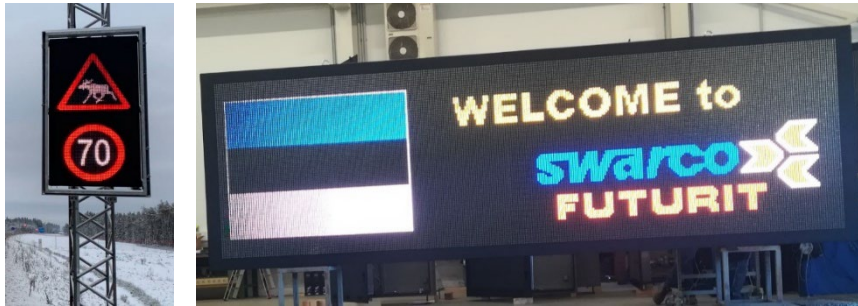


Joonis 2.1 Prismaatiline VMS infotabloo [3]



Joonis 2.2 Eeldefineeritud VSL + VWS [4]

Täismaatriksmärkide puhul paigaldatakse tervele märgi kujutise alale LED-lambid ning see võimaldab kuvada praktiliselt piiramatut valikut erinevaid kujutisi. Täismaatriksmärke kasutatakse nii kiiruspiirangute, pildiliste hoiatuste kui ka tekstilise info edastamiseks. Näited täismaatriksmärkidest on toodud joonisel number 2.3.



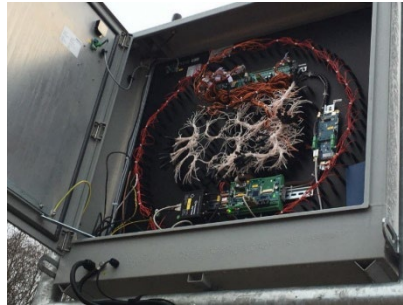
Joonis 2.3 Täismaatriksehitusega VSL+VWS ja infotabloo [4]

Mõlema eelpool toodud tehnoloogia kombineerimist kasutatakse peamiselt muutuva teabega infotabloode korral. Sellisel juhul on tabloo pildilist infot edastav osa toodetud täismaatrikstehnoloogiat kasutades ning tabloo tekstilist infot edastav osa on toodetud selliselt, et seal on võimalik kuvada kindlaksmääratud tähekõrgusega teksti. Eestis kasutatakse kiiruspiirangute ja pildiliste hoiatuste edastamiseks peamiselt eeldefineeritud muutuva teabega liiklusmärke. Tekstilise info edastamiseks kasutatakse Eestis nii eeldefineeritud märke kui täismaatriksmärke.

2.1.1 Muutuva teabega liiklusmärkide ehitus

Muutuva teabega liiklusmärgid on ehituselt lihtsad seadmed. Need koosnevad metallkorpusest, mille sisse on paigaldatud trükiplaadid või juhtmekimbud koos LED-lampidega. Lisaks asuvad korpuse sees veel mõned muutuva teabega liiklusmärgi tööks vajalikud lisaseadmed nagu näiteks toiteplokid, kontrollid ja ruuter. Muutuva teabega kiirusmärgi ehitus on nähtav joonisel number 2.4. Muutuva teabega liiklusmärgi esipaneelile, iga LED-lambi peale, on paigaldatud lääts, mis suunab ja

kontsentreerib LED-lambi poolt eritatavat valgust. Tänu antud läätsele on LED-lampe võimalik kasutada töövooluga, mis moodustab kõigest 20% nende lubatud maksimaalsest voolust. Võrreldes teiste valgusallikatega on LED-lampide sojuseraldus märkimisväärselt väiksem. Seega, LED-lambid ise ei eralda piisavas koguses soojust, mis võimaldaks talvistes oludes märkide esipaneelidele sadanud lund sulatada. Samuti ei eralda esipaneelidelt lume sulatamiseks piisavalt soojust märkide sees asuvad lisaseadmed.



Joonis 2.4 Eeldefineeritud VSL [4]

Vähene sojuseraldus on siinkohal probleemiks, kuna tuisu korral võib lumi kleepuda muutuva teabega liiklusmärgi korpuse esipaneelile. See muudab muutuva teabega liiklusmärgi poolt kuvatava info liiklejatele raskesti loetavaks või isegi täiesti loetamatuks. Antud olukorda esineb talveperioodil tugeva lumesaju ning tuule korral. Eriti terav on probleem juhul, kui õhutemperatuur jääb 0°C lähedale ning lumi on kleepuv.

3 LUME EEMALDUMINE PINDADELT

Muutuva teabega liiklusmärkide soojenduslahenduste teemadel tehtud teadustöid või -artikleid käesoleva töö autoril leida ei õnnestunud. Seega tuli otsingut laiendada ning otsida infot sarnaste seadmete kohta. Otsingut laiendades õnnestus autoril leida teadusartikleid päikesepaneelide soojenduslahenduste kohta. Autor leidis ühe teadustöö, mis käsitleb lume sulamise mehhanisme horisontaalsel ning kalde all olevatel pindadel, sõltuvalt soojusülekandest. Teine teadustöö käsitleb põhjalikumalt lume eemaldumise mehhanisme päikesepaneelidelt. Pinnad olid valmistatud kõrge tihedusega polüetüleenist ning pinna kalle maapinna suhtes oli sõltuvalt katsest kas 45° või 65° [5]. Kuigi muutuva teabega liiklusmärgid asetsevad maapinna suhtes 90° nurga all, annab see teadustöö hea ülevaate, kuidas pinna külge kleepunud lumi sealt sulab, maha libiseb või maha kukub.

3.1 Lume eemaldumine kalde all olevatelt pindadelt

Teadustöös „Prediction of wet snow shedding from surfaces under various heat transfer modes“ uuriti märja lume kogunemist pindadele. Märg lumi on poorne materjal, mis koosneb vedelas faasis olevast veest, jääst ja õhust ning on tavaliselt kleepuvate omadustega. Lume eemaldumine kalde all olevalt pinnalt on protsess, kus omavahel võistlevad jõud, mis soodustavad lume eemaldumist ning jõud, mis soodustavad selle nakkumist. Seda, kui tugev gravitatsioon nakkunud lumele mõjub, mõjutab lume tihedus, lumekihi kuju ning lumekihi paksus. Seda, kui tugevasti lumi pinnale nakkub, mõjutab kõige rohkem lume vedela vee sisaldus. Kuna vedela vee sisaldus lumes mõjutab lume tihedust, sidusust ning nakkuvust, on see üks tähtsamaid parameetreid, mis mõjutab lume eemaldumist pinnalt. Lume eemaldumine kalde all olevalt pinnalt toimub kas sulamise, libisemise või mõlema kombinatsioonina. Lume vedela vee sisalduse saab teada, kui uurida soojusvahetust lumekihi ja seda ümbritseva keskkonna vahel. [5] Konvektiivset soojusülekanget lume ja ümbritseva keskkonna vahel saab arvutada järgnevalt:

$$Q_{konv} = h * A * (T_{fluid} - T_s) \quad (3.1)$$

kus Q_{konv} on konvektiivne soojusülekanne, W;
 h on konvektiivne soojusülekandeegur, W/(m² * K);
 A on lume ja õhu kokkupuute pind, m²;
 T_{fluid} on ümbritseva keskkonna temperatuur, °C;
 T_s on lume pinnatemperatuur, °C. [5]

Nagu näha, on valemis 3.1 üheks soojusülekanne mõjutavaks suuruseks soojusülekannekoefitsient. Soojusülekannekoefitsient omakorda sõltub konvektiivsel soojusülekanne Nusselti arvust. Nusselti arv väljendab dimensioonita soojusülekannekoefitsienti. [6] Antud juhul on Nusselti arv ja soojusülekannekoefitsiendi vaheline seos järgmine:

$$Nu = h * \frac{L}{k_{fluid}} \quad (3.2)$$

kus Nu on Nusselti arv;

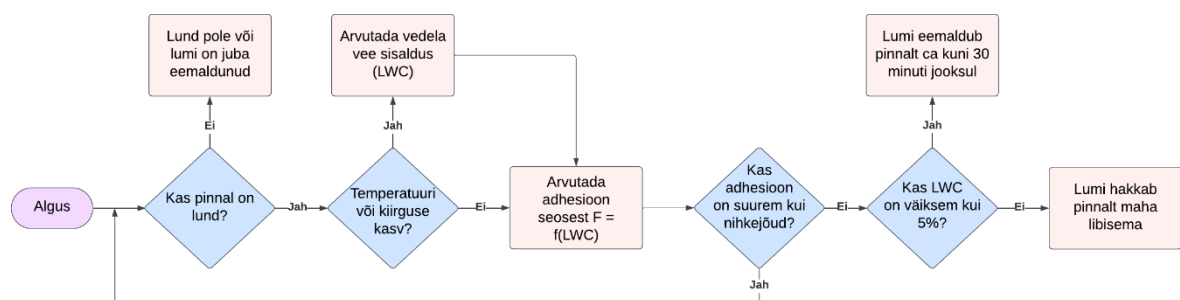
L on objektile iseloomulik pikkus, m;

k_{fluid} on ümbritseva keskkonna soojusjuhtivustegur, W/(m * K). [5]

Lume soojusjuhtivustegurit konkreetses olukorras mõjutavad väga paljud tingimused, mida käesoleva töö käigus ei mõõdetud. Seega kasutatakse edaspidistes arvutustes lihtsustusena lume keskmist soojusülekannekoefitsienti 120 W/(m² * K) [7]. Antud suurus on lume keskmine soojusülekannekoefitsient, mis on saadud uurimustööst, mis uuris lume soojusülekanne keevkihis.

Selleks, et ennustada lume sulamist, on osad uuringud uuritava lume kihi jaganud kaheks – märja lume ehk lõrtsi kiht, mis asetseb vahetult uuritava pinnal ning kuiva lume kiht, mis asetseb lõrtsikihi peal. Samas on selline jaotus kaheldav, kuna lumi on poorne ning kapillaarjõudude tõttu peaks osa veest jõudma ka kuiva kihi sisse. [5]

Uurimuse käigus töötati välja teoreetiline arvutusmeetod, ennustamaks lume vedela vee sisaldust. Lume vedela vee sisalduse arvutusmeetod on funktsioon temperatuurist, soojuskiirguse intensiivsusest ja tuule kiirusest. Tulemusena töötati välja algoritm, mis ennustab lume maha libisemist pindadelt. Selleks võrreldakse lume eemaldumist soosivaid jõudusid ehk nihkejõudusid, seda kinni hoidvate jõududega ehk adhesiooniga. [5] Algoritm on toodud joonisel number 3.1.



Joonis 3.1 Teoreetiline algoritm ennustamaks lume eemaldumist pinnalt [5]

Joonisel 3.1 toodud algoritmist saab järeldada, et kuni adhesioon on suurem kui nihkejõud ning lumele ei anta lisasoost, jääb lumi pinnale püsima. Selleks, et põhjustada lume eemaldumist pinnalt, tuleb sellele anda täiendavat soost. Täiendavat soost saab lumekihile anda näiteks läbi õhutemperatuuri tõusu, soojuskiirguse või soojusülekanne abil. Kui nihkejõud on suuremad kui adhesioon, sõltub lume eemaldumise viis lume vedela vee sisaldusest. Kui lumes on vedelat vett vähem kui 5%, peaks lumi pinnalt maha kukkuma ca 30 minuti jooksul. Kui lumes on vedelat vett rohkem kui 5%, hakkab lumi pinnalt maha libisema. [5]

3.2 Lume eemaldumise mehhanismid päikesepaneelidel

Teadustöös „Understanding mechanisms of snow removal from photovoltaic modules“ käsitletakse lume eemaldumise mehhanisme päikesepaneelidel. Kõik need mehhanismid tehti kindlaks visuaalse vaatluse käigus ning lume vedela vee sisaldust mõõtes. Lumi eemaldub päikesepaneelidel neljal erineval viisil: sulamine, maha libisemine, aeglane sulamine ning sulamine koos maha libisemisega. [8]

3.2.1 Sulamine

Lume sulamine päikesepaneelidel on protsess, mille käigus lumele antud soost suurendab lume vedela vee sisaldust, kuni lumi eemaldub paneelidel täielikult. Soost võib lumele anda kas soojuskiirguse, konvektsiooni, aurustumise / kondenseerumise või soojusjuhtivuse abil. Sulamine algab päikesepaneeli äärtest ning kandub edasi paneeli keskosasse. Lume sulamine oli soodustatud juhul kui lumekihi paksus oli väike, vahemikus 6–18 mm. Uurimuse käigus viidi läbi katse, mille käigus simuleeriti lume sulamist päikesepaneelil. Katse tulemusena tõusis lume vedela vee sisaldus 13,45% tunnis. Lumekihi keskmine vedela vee sisaldus tõusis 7,29%-lt 36,87%-ni 2,2 h jooksul, mille käigus lumi sulas täielikult. [8] Lume sulamist päikesepaneelil iseloomustab joonis number 3.2 a.

3.2.2 Maha libisemine

Lume pindadelt maha libisemine on nähtus, mille käigus kogunenud lumi libiseb pinnalt kiirelt maha, märkimisväärselt sulamata. Sellisel juhul libiseb lumi pinnalt maha kas ühe või mitme suure tükina. Lume maha libisemist ilma sulamata on täheldatud harva. Varasemad uurimustööd on leidnud, et lumi libiseb pinnalt maha siis, kui ümbritseva keskkonna kõrge temperatuur ja kõrge kiiritustihedus põhjustavad veekihi tekke paneeli ja lume piirpinnale. Veekiht alandab paneeli ja lume vahelist adhesiooni, lumi ei nakku enam paneeliga ja hakkab sellelt maha libisema. Lume libisemiseks vajalik objekti pinnatemperatuur on $0^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Uurimuse käigus viidi läbi katse, mille käigus saavutati lume maha libisemine päikesepaneelilt. Katse tulemusena tõusis lume vedela vee sisaldus kiiremini kui sulamise korral – 14,4% tunnis. Lumekihi keskmine vedela vee sisaldus tõusis 4,33%-lt 27,37%-ni 1,6 h jooksul, mille käigus kogu lumi libises paneelilt maha. Teise katse käigus libises lumi paneelilt maha oma raskuse tõttu. Lume vedela vee sisaldus maha libisemise hetkel oli ligikaudu 9% ning lumekihi paksus oli 80 mm. Ümbritseva keskkonna temperatuur oli -4°C . [8] Lume maha libisemist päikesepaneelilt iseloomustab joonis number 3.2 b.

3.2.3 Aeglane sulamine

Aeglane sulamine on olukord, kus lumi hakkab aeglaselt päikesepaneeli ülemisest osast sulama. Sulamine jõuab aegamisi paneeli alumise osani. Aeglaseks sulamiseks loetakse tavaliselt olukorda, kus lumekihi paksus on 20–80 mm ning lumi püsib paneelil vähemalt ühe ööpäeva. Aeglase sulamise puhul võib lumi päikesepaneelidel püsida isegi kuni 5 ööpäeva. Uuringu raames läbi viidud katse käigus oli lumekihi paksus paneelil 20 mm. Lume maha libisemist takistasid madalad õhutemperatuurid, mille tõttu ei tekkinud lume ja paneeli piirpinnale veekihti. Aeglase sulamise peamiseks põhjustajaks on õhutemperatuuri üles-alla kõikumine. Kui õhutemperatuur oli 0°C ringis, tekkis lume ja päikesepaneeli piirpinnale veekiht. Kui õhutemperatuur langes alla 0°C , siis tekkinud veekiht jäätus. Tekkinud õhukene jääkiht hoiab aga lund enda küljes tugevalt kinni. Kui seejärel jääb õhutemperatuur miinuspoolele, võib lumi paneeli pinnal olla päevi. [8]

Uuringu käigus tehtud katse ajal tõusis õhutemperatuur 0°C lähistelemel kolmel korral ning lõpuks ca 5°C -ni. Iga kord, kui õhutemperatuur 0°C lähistelemel tõusis, tõusis ka lume vedela vee sisaldus aga aeglaselt – 5,88% tunnis, 3,22% tunnis, 6,18% tunnis ja 7,92% tunnis. See viitab lume aeglasele sulamisele võrreldes tavalise sulamisega (vee sisalduse kasv 13,45% tunnis) või lume maha libisemisega (vee sisalduse kasv 14,4%

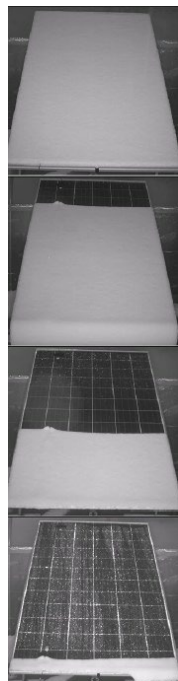
tunnis). Kui õhutemperatuur tõusis 5°C-ni, kasvas lume vedela vee sisaldus 15,92% tunnis. Selleks hetkeks olid aga lumekihi paksus ja selle mass liiga väikesed, et paneelilt maha libiseda. Seega, jätkus lume sulamine. Kuigi aeglast sulamist esineb harva – uuringu kohaselt ligikaudu 14% kordadest, on see kõik problemaatilisem olukord. [8] Lume aeglast sulamist päikesepaneelil iseloomustab joonis number 3.2 c.

3.2.4 Sulamine koos maha libisemisega

Sulamine koos maha libisemisega on olukord, kus paneeli külgedel olev lumi sulab aga ühtlasi libiseb paneelil olev lumi kihina ülevalt alla. Seda kahe olukorra kombinatsiooni esines katsete käigus kõige rohkem – 35% kõikidest katsetest. Lumekihi paksus oli vahemikus 10–70 mm ning lume eemaldumise aeg jäi vahemikku 11–62 h. Keskmise lume vedela vee sisalduse kasv oli 11,25% tunnis aga ühe katse käigus ulatus ka 83,02% tunnis. Selline suur vedela vee sisalduse kasv näitab, et lumi ja paneeli piirpinnale tekkis kiirelt veekiht, mis võimaldas lumel libisema hakata. Mainitud katse käigus oli lumekihi paksus 70 mm ning kui õhutemperatuur tõusis kiirelt plusspoolele, kasvas kiirelt ka vedela vee sisaldus, mis soodustas lumekihi maha vajumist. [8] Lume sulamist päikesepaneelil koos maha libisemisega iseloomustab joonis number 3.2 d.



Joonis 3.2 a [8]



Joonis 3.2 b [8]



Joonis 3.2 c [8]



Joonis 3.2 d [8]

3.3 Lume sulatamine

Nagu eelnevast järeldada saab, on lume sulatamiseks pinnalt vaja sellele pinnale lisasoojust anda. Kui soovime, et pind oleks lume ja jäävaba võimalikult kiirelt, peaks lisasoojuse andmiseks olema ette nähtud mingisugused seadmed. Eesmärgiks on soojendada pinda senikaua, kuni pinnale tekib veekiht, mille tõttu lumi libiseb pinnalt maha või soojendada pinda seni, kuni sellel olev lumi ja jää sulab täielikult [9]. Muutuva teabega liiklusmärkide puhul on ainukeseks võimaluseks, kuidas märgi esipinda soojendada, näha ette märgi korpuse sisse mingisugune soojenduslahendus. VMS-ide puhul on lume maha libisemine raskendatud nende ehituse tõttu. Iga LED-lambi peale on paigaldatud lääts, mis takistab lume maha libisemist. Seega tuleb soojendusseadmed dimensioneerida selliselt, et need oleks võimelised VMS-i esipinda soojendada seni, kuni lumi ja jää täielikult sulavad.

4 VÖRRELDAVAD SOJENDUSLAHENDUSED

Transpordiameti senise kasutuskogemise põhjal on selgunud, et muutuva teabega liiklusmärkide madala energiatarbega kaasnev vähene soojuseraldus võib talvisel perioodil osutada probleemiks. Kui märkide esipaneelid kattuvad tuisu korral lumega, ei eralda märk ise piisavalt soojust, et kogunenud lumi märgi esipaneelilt sulatada. Selliseid ilmaolusid ei esine tihti, kuid just taolistes ilmaoludes on liiklejate hoiatamine ning juhendamine olulised. Kui muutuva teabega liiklusmärgid on rasketes ilmaoludes liiklejatele loetamatud, tekib õigustatud küsimus nende märkide kasulikkusest. Joonisel 4.1 on toodud näide muutuva teabega kiirus- ja hoiatusmärkide loetavusest pärast lumetuisku.



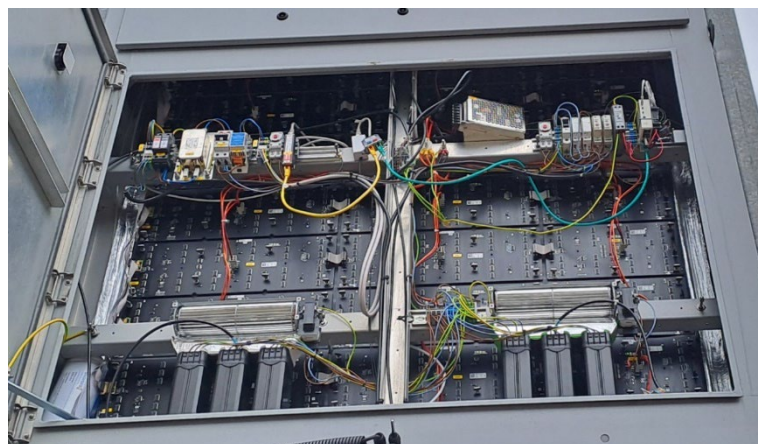
Joonis 4.1 Muutuva teabega kiirus- ja hoiatusmärkide seisukord pärast lumetuisku [4]

Muutuva teabega liiklusmärkide tootjatel puudusid standardlahendused antud probleemi lahendamiseks. Sellest hoolimata otsustas Transpordiamet eelpool kirjeldatud probleemi lahenduseks varustada tulevased muutuva teabega liiklusmärgid soojendusega. See tähendas, et järgmiste muutuva teabega liiklusmärkide rajamise projektide raames nõuti märkide tootjatelt ka nende soojenduslahenduse väljatöötamist. Kaheks esimeseks taoliseks projektiks olid muutuva teabega liiklusmärkide rajamine Tallinna–Pärnu–Ikla tee km 67,2 Kasti ristmikule ning Tallinna–Tartu–Võru–Luhamaa tee Peetri–Kose lõigule.

4.1 Kasti ristmik

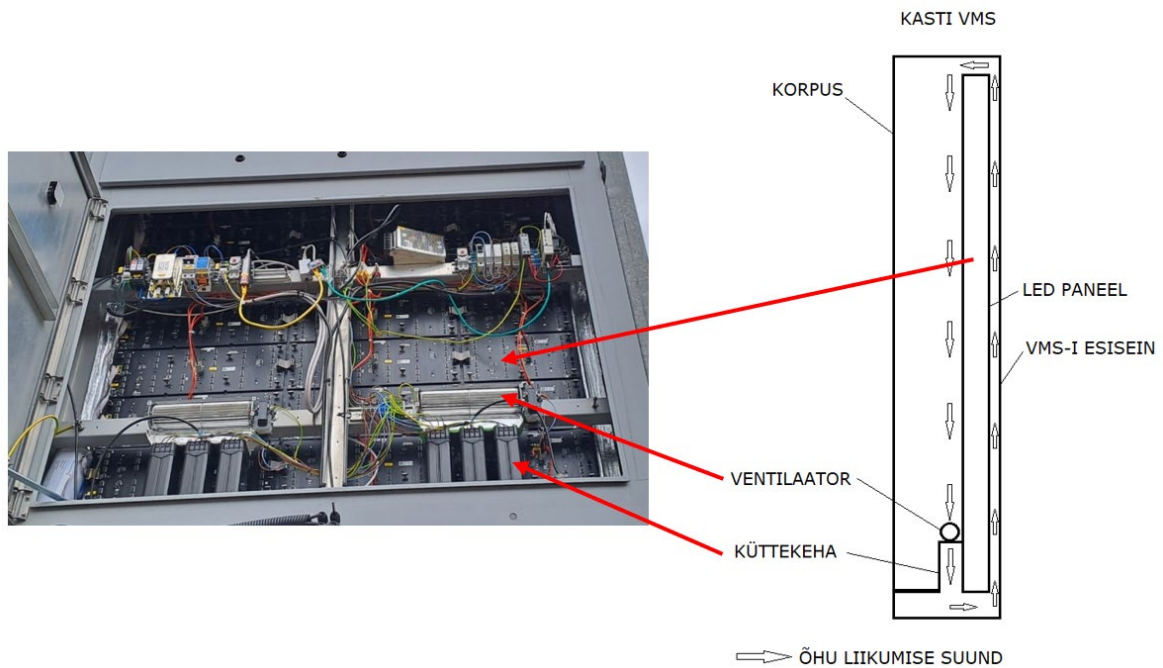
Esimeseks projektiks, mille käigus Transpordiamet nõudis seadmete tarnijalt VMS-idele soojenduslahenduse lisamist, oli Tallinna–Pärnu–Ikla tee km 67,2 Kasti ristmikule

adaptiivse kiiruspiirang süsteemi rajamise projekt. Projekti eesmärgiks oli põhimaanteel asuva liiklusohtriku ristmiku ümberehitamine ning selle varustamine adaptiivse kiiruspiirangu süsteemiga. See tähendab, et kui kõrvalteelt läheneb peateele sõiduk, kehtestatakse mõnisada meetrit enne ristmikku piirkiirus 70 km/h. Süsteem on mõeldud töötama autonoomselt, kuid on vajadusel juhitud ka keskse liiklusjuhtimistarkvaraga. Antud projekti raames tarniti Transpordiametile kaks muutuva teabega liiklusmärki. Mõlema puhul on tegu täismaatriksmärkidega, mis on mõeldud kuvama samaaegselt nii hoiatusmärki kui ka suurimat lubatud kiirust. Märkid on valmistatud alumiiniumsulamist AlMg₃. Mõlemad märkid varustasid soojendusega OÜ Traffesti insenerid. Antud soojenduslahendus peaks välistama lume, härmatise ja jäite tekke märkide esipaneelidele. Soojendusseadmete koosseisu kuulub küttekeha ning tööstuslik ventilaator. Tööstuslik ventilaator on paigaldatud küttekeha ette. See peaks tagama küttekehast eralduva soojuse ühtlase jaotumise märgi esipaneeli ning LED-moodulite vahelises ruumis. Soojendust on võimalik aktiveerida käsitsi või sõltuvalt välisõhu temperatuurist. Kui soojendus aktiveeritakse, töötab see pidevalt maksimaalsel võimsusel ning juhtautomaatikat selle koosseisus pole. [4]



Joonis 4.2 Kasti ristmiku muutuva teabega märgi sisemus

Nagu jooniselt 4.2 on näha, on märgi sisse paigaldatud kuus küttekeha, kaheks grupeerituna. Mõlema grupi juurde on paigaldatud üks tööstuslik ventilaator. Kohapealse vaatluse tulemusena selgus, et küttekeha mark on Fucsis HTM150 ning ventilaatori mark on TAS20. Joonisel 4.3 on toodud skeem Kasti VMS-i soojenduse tööpõhimõttega.



Joonis 4.3 Kasti VMS-i soojenduse tööpõhimõtte skeem lõikel

4.2 Smart E263/E77 projekt

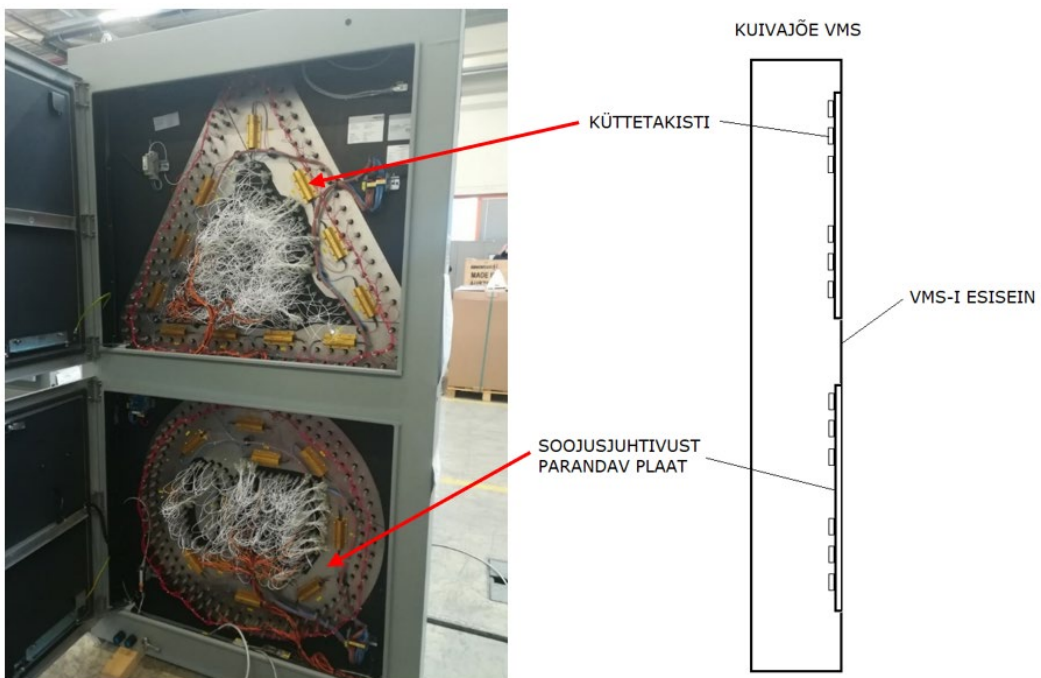
Teiseks projektiks, mille käigus Transpordiamet nõudis seadmete tarnijalt märkidele soojenduslahenduse lisamist, oli *Smart E263/E77* projekt. Kõik muutuva teabega kiirusmärgid ning kiirus- ja hoiatusmärgi kombinatsioonid on varustatud soojendusega, mille eesmärk on vältida lume, härmatise ja jäite tekkimine liiklusmärkide esikülgedele. Välja töötatud soojenduslahendus koosneb märgi sisse, esiseina tagumisele küljele paigaldatud soojust juhtivast plaadist ning sellele paigaldatud termotakistitest, mis neid läbiva voolu toimel soojenevad. Soojust juhtiva plaadi eesmärk on jaotada termotakistite poolt eritatav soojus ühtlaselt märgi esipinnale. Märgid ning soojust juhtiv plaat on valmistatud alumiiniumisulamist AlMg₃. [4]

Joonisel 4.4 on näha märgi sisse paigaldatud hõbedast värvi soojust juhtiv plaat ning kuldset värvi termotakistid. Joonisel 4.4 olevasse märgitüüpi on paigaldatud 23 termotakistit, muutuva teabega kiirusmärgi sisse on paigaldatud 12 termotakistit. Kohapealse vaatluse tulemusena selgus, et märgi sisse on paigaldatud termotakistid HS150, mille võimsus on 150 W [10].



Joonis 4.4 Termotakistitega varustatud VMS [4]

Soojendus toimib kaugjuhitavalt, liiklusjuhtimistarkvara abil. Antud tarkvara abil on võimalik soojendust sisse ja välja lülitada. Kui soojendus on sisse lülitatud, töötab see täisvõimsusel. Soojendussüsteem pole juhtautomaatikaga varustatud. Süsteem on varustatud kaitseautomaatikaga, mis ei lase seadmete temperatuuril tõusta üle 60°C. Samuti on võimalik kasutada taimerifunktsiooni, määrates mitme minuti pärast soojendus automaatselt välja lülitub. [4] Joonisel 4.5 on toodud Kuivajõe VMS-i lõige.



Joonis 4.5 Kuivajõe VMS-i lõige

4.3 Kohapealsed katsed

Selleks, et saada ülevaade soojenduslahenduse tööst, viis lõputöö autor läbi praktilise katse ühe Kasti ristmikule paigaldatud muutuva teabega liiklusemärgiga ning ühe Tallinna–Tartu–Võru–Luhamaa tee paigaldatud liiklusemärgiga. Katsed viidi läbi 20. aprillil 2024. aastal Tallinna–Pärnu–Ikla tee 66,9 kilomeetril asuva lõunasuunale paigaldatud liiklusemärgiga ning Tallinna–Tartu–Võru–Luhamaa tee 36,9 kilomeetril asuva Kuivajõe põhjasuunale paigaldatud liiklusemärgiga. Kõigepealt mõõdeti liiklusemärgi esipaneeli temperatuuri enne soojenduse tööle lülitamist. Seejärel lülitati liiklusemärgi soojendus sisse ning mõõdeti esipaneeli temperatuuri iga minuti järel. Pärast soojenduse sisse lülitamist alustavad kütteseadmed tööd ning märgi esipaneel peaks hakkama soojenema.

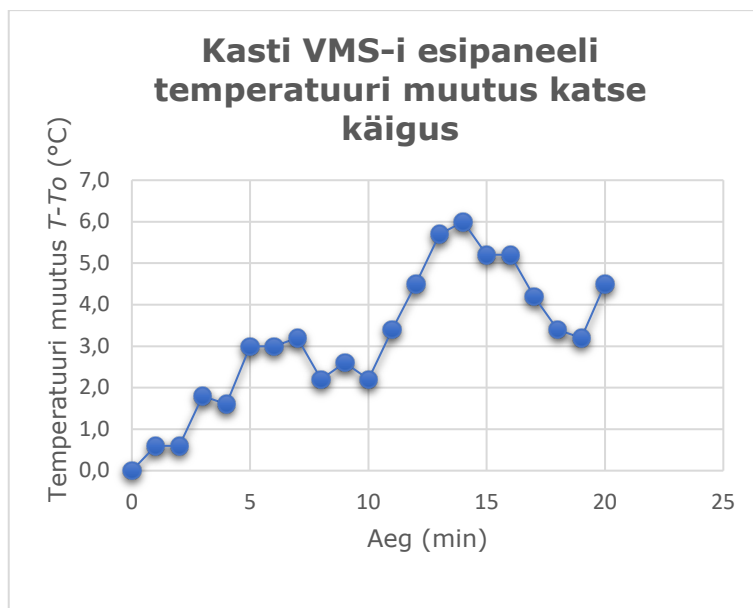
Mõõtmised tehti püromeetriga „Raytek MINITEMP MT6“. Mõõtmised tehti ligikaudu 1 meetri kauguselt. Antud püromeetri puhul tähendab see, et püromeeter mõõtis ligikaudu 10 cm diameetriga ala keskmist temperatuuri. Püromeetri mõõtevahemik on $-30\dots+500^{\circ}\text{C}$. Temperatuurivahemikus $+10\dots+30^{\circ}\text{C}$ on seadme mõõtetäpsus $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Väljaspool eeltoodud temperatuurivahemikku on püromeetri mõõtetäpsus $\pm 1,5\%$ mõõtetulemusest või $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, vastavalt sellele kumb väärtus suurem on. Seadme mustsusastmeks on seadistatud 0,95 ning seade teeb vajalikud korrektsioonid mõõtetulemustele automaatselt. [11] Kuna mõõtmine toimus nii eelpool toodud temperatuurivahemikus kui sellest väljaspool, tuleb arvestada mõõtetäpsusega $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Seda sellepärast, et madalaim mõõdetud temperatuur oli $-5,2^{\circ}\text{C}$ ning kõrgeim mõõdetud temperatuur oli $25,8^{\circ}\text{C}$.

Lähima teeilmajaama andmetel oli mõõtmiste alustamise hetkel õhutemperatuur Kasti VMS-i asukohas $-0,5^{\circ}\text{C}$ ning Kuivajõe VMS-i asukohas $0,2^{\circ}\text{C}$. Kastil oli tuule kiirus katse läbi viimise ajal vahemikus 1,7–2,2 m/s ning puhanguti kuni 4,5 m/s. Kuivajõel oli tuule kiirus katse läbi viimise ajal vahemikus 1,6–2,1 m/s ning puhanguti kuni 3,4 m/s. [12] Mõlema märgi esipaneeli temperatuur enne soojenduse sisse lülitamist oli mõõtmiste kohaselt $-5,2^{\circ}\text{C}$. Materjali pinnatemperatuur ei saa aga olla madalam, kui ümbritseva keskkonna temperatuur. Kõige tõenäolisemalt põhjustab taolist erinevust püromeetri mõõtemääramatus ning mustsusastme väärtus, mida pole kasutajal võimalik seadistada. Rolli võib mängida ka asjaolu, et lähim teeilmajaam, mille näit õhutemperatuur määramisel aluseks võeti, asub esimesel juhul ca 3 km kaugusel ning teisel juhul ca 7 km kaugusel. Selleks, et katse tulemustest oleks võimalik järeldusi teha, võetakse edasises analüüsis nullpunktiks enne katse alustamist mõõdetud esipaneeli temperatuur $-5,2^{\circ}\text{C}$.

Tabelis 4.1 on esitatud Kasti muutuva teabega liiklusemärgi esipaneeli temperatuur ning temperatuuri muutus suhtena algtemperatuuri, 20 minuti jooksul pärast soojenduse sisselülitamist. Joonisel 4.6 on toodud esipaneeli temperatuuri muutumine, suhtena algtemperatuuri.

Tabel 4.1 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuur pärast soojenduse sisse lülitamist

Aeg (min)	Temperatuur (°C)	Temperatuuri muutus $T-T_0$ (°C)
0	-5,2	0,0
1	-4,6	0,6
2	-4,6	0,6
3	-3,4	1,8
4	-3,6	1,6
5	-2,2	3,0
6	-2,2	3,0
7	-2,0	3,2
8	-3,0	2,2
9	-2,6	2,6
10	-3,0	2,2
11	-1,8	3,4
12	-0,7	4,5
13	0,5	5,7
14	0,8	6,0
15	0,0	5,2
16	0,0	5,2
17	-1,0	4,2
18	-1,8	3,4
19	-2,0	3,2
20	-0,7	4,5



Joonis 4.6 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri muutus katse käigus

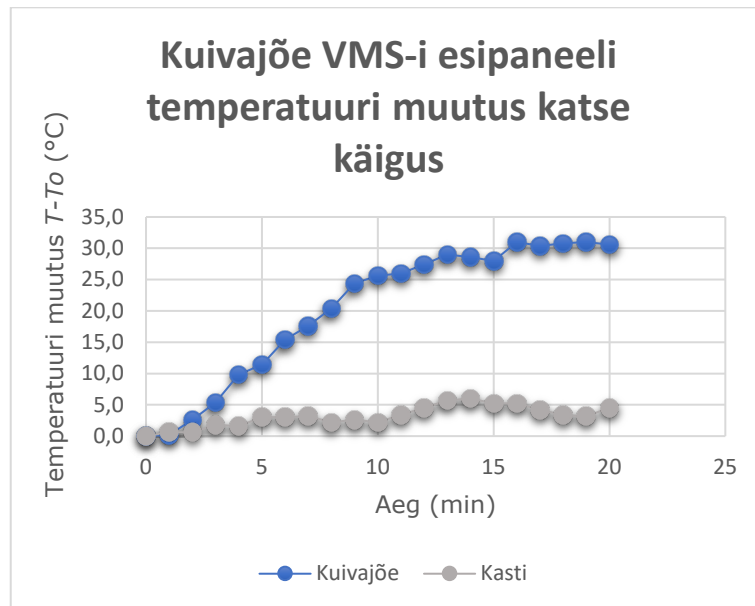
Tabelis number 4.2 ja joonisel number 4.7 on esitatud Kuivajõe muutuva teabega liiklusemärgi esipaneeli temperatuur ning temperatuuri muutus suhtena algtemperatuuri 20 minuti jooksul pärast soojenduse sisselülitamist.

Tabel 4.2 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuur pärast soojenduse sisse lülitamist

Aeg (min)	Temperatuur (°C)	Temperatuuri muutus $T-T_0$ (°C)
0	-5,2	0,0
1	-5,0	0,2
2	-2,6	2,6
3	0,2	5,4
4	4,6	9,8
5	6,2	11,4
6	10,2	15,4
7	12,4	17,6
8	15,2	20,4
9	19,2	24,4
10	20,4	25,6
11	20,8	26,0
12	22,2	27,4
13	23,8	29,0
14	23,4	28,6
15	22,8	28,0
16	25,8	31,0
17	25,2	30,4
18	25,6	30,8
19	25,4	31,0

Tabel 4.2 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuur pärast soojenduse sisse lülitamist

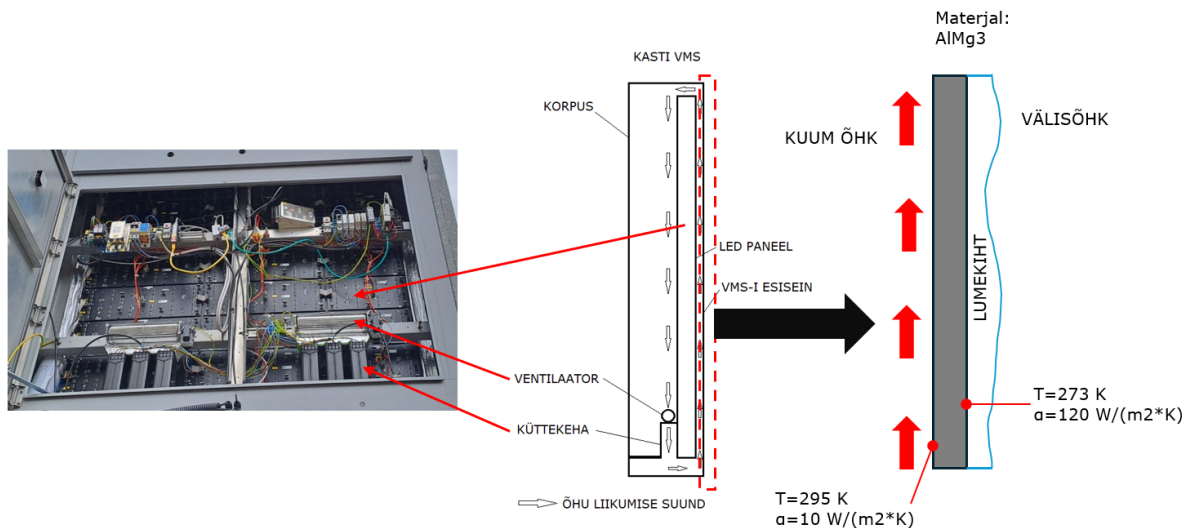
20	25,4	30,6
----	------	------



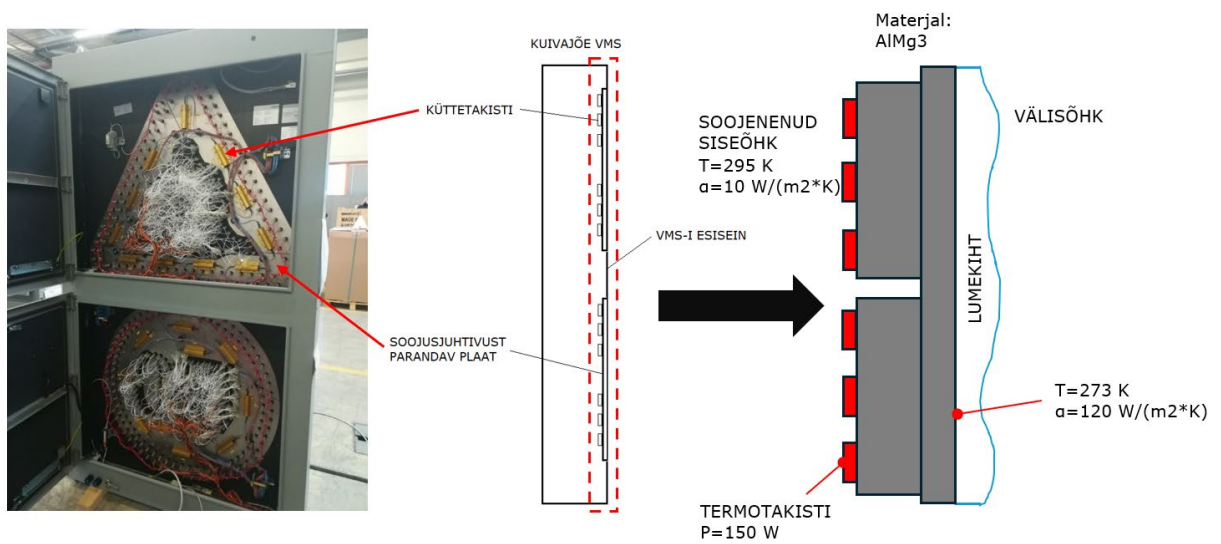
Joonis 4.7 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri muutus katse käigus

4.4 Modelleerimine

Töö käigus modelleeriti VMS-ide soojendussüsteemide soojusülekanne toimimist, võttes aluseks märkide sisse paigaldatud soojendusseadmete parameetrid. Modelleerimise tulemusena kuvab programm VMS-i esipaneeli temperatuuri selle erinevates punktides. Modelleerimine tehti kasutades tarkvara „Autodesk Inventor Nastran“, mis kasutab analüüsiks lõplike elementide meetodit. Modelleerimiseks tuleb tarkvarale ette anda mudel VMS-i esiseinast ning soojusülekanne modelleerimiseks vajalikud ääritingimused. Kuna töö autori arvutil polnud piisavalt arvutusvõimsust, tuli modelleerimine läbi viia väljalõigetega VMS-ide esipaneelidest. Kasti VMS-i puhul kasutati selleks 10 x 2300 mm suurust väljalõiget märgi esipaneelist ning Kuivajõe VMS-i puhul 438 x 188 mm suurust väljalõiget märgi esipaneelist. Joonistel 4.8 ja 4.9 on visualiseeritud modelleerimise põhimõtted.



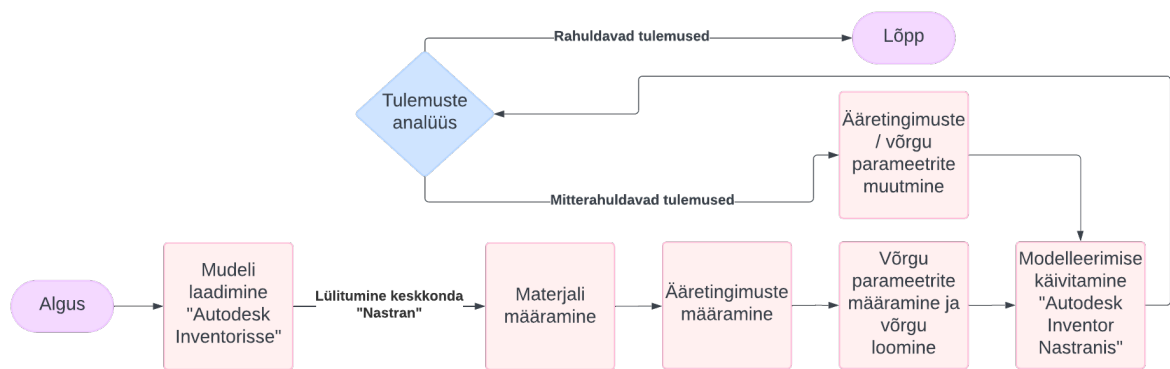
Joonis 4.8 Kasti VMS-i küttesüsteemi modelleerimise põhimõte



Joonis 4.9 Kuivajõe VMS-i küttesüsteemi modelleerimise põhimõte

Modelleerimiseks tuleb liikuda programmiselset keskkonda „Autodesk Inventor Nastran“. „Nastrani“ keskkonnas määrati kõigepealt sein materjaliks alumiiniumsulam, mis on oma omadustelt võimalikult sarnane materjalile, millest VMS-i korpus on valmistatud. Modelleerimise läbi viimiseks tuleb detail kõigepealt jagada lõplikeks elementidest. Seda teeb programm jagades detaili võrguks, mis koosneb kindla mõõtudega elementidest. Elementide suurus tuleb programmile ette anda. Antud modelleerimise käigus määrati ühe võrguelemendi suuruseks 1,5 mm. Lisaks modelleeriti soojusülekanne 20% väiksema ja suurema võrguga, kuid see ei omanud märgatavat mõju modelleerimise tulemustele. Seejärel tuli programmile ette anda ääritingimused. Ääritingimuste loetelu on toodud vastavalt Lisas 1 ja Lisas 2. Väga suurt rolli mängib ääritingimusena soojusülekandeegur – nii VMS-i sees kui ka väljas. Nii VMS-i sisemine kui välimine soojusülekandeegur olukorras, kus lund VMS-il ei ole, on valitud vastavalt töö juhendaja empiirilisele kogemusele. Välimine

soojusülekande tegur olukorras, kus VMS-il on lumi, on valitud tuginedes teadustööle „Viscosity and Heat Transfer in Fluidized Snow” [7]. Statsionaarses töörežiimis oli temperatuur VMS-i korpuse sees 22°C. Seda temperatuuri mõõdab Kasti küttesüsteemi integreeritud temperatuuriandur. Lihtsustusena on sama sisetemperatuuri kasutatud ka Kuivajõe VMS-i modelleerimisel. Esiseinte väljalõikeid vaadeldi kui termiliselt isoleeritud kehasid. See tähendab, et mõlema väljalõike kõikidele otsadele määrati soojusvoo suuruseks 0 W/m². Joonisel 4.10 on näidatud soojusülekande modelleerimise algoritm „Autodesk Inventor Nastranis”.

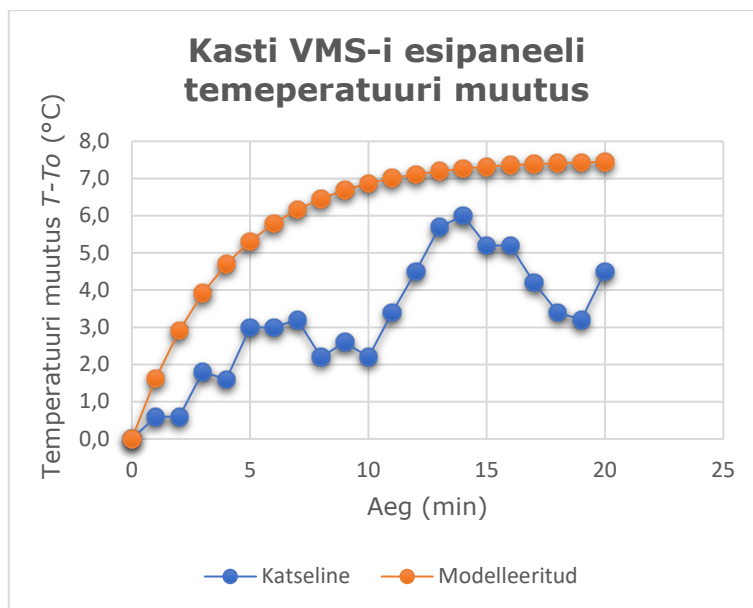


Joonis 4.10 Soojusülekande modelleerimise algoritm „Autodesk Inventor Nastranis”

Kasti VMS-i korral koosneb soojusülekanne konvektiivsest soojusülekandest õhult seinale, soojusjuhtivusest läbi selle sama seina ning konvektiivsest soojusülekandest seinalt õhule või lumekihile. Kuivajõe VMS-i korral koosneb soojusülekanne soojusjuhtivusest kütetakistitelt esipaneelile ning konvektiivsest soojusülekandest seinalt õhule või lumekihile. Kuna katseid polnud võimalik reaalsetes lumeoludes läbi viia, modelleeriti töö käigus ka olukorda, kus esipaneelil sulatatakse lund. See tähendab, et soojusülekande tegur esipaneelilt välisõhule on oluliselt suurem kui olukorras, kus paneelil lund ei ole.

4.4.1 Kasti ristmik

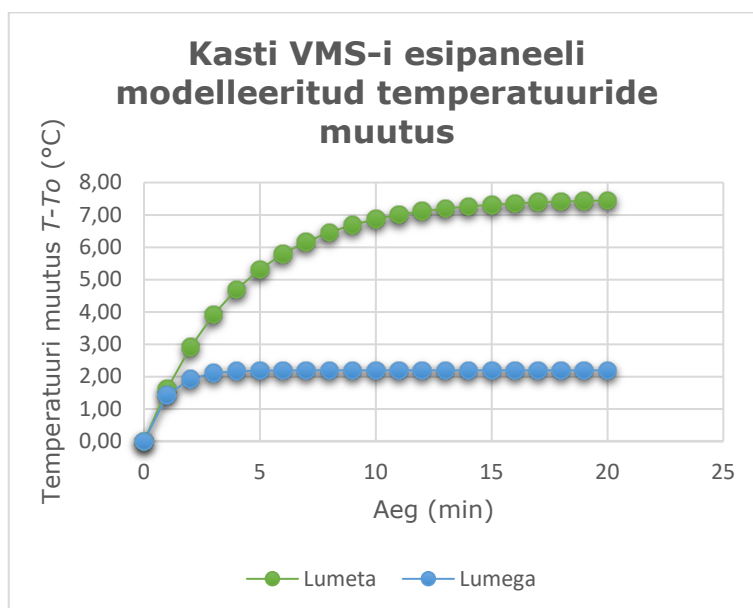
Käesolevas punktis vaadeldakse Kasti ristmikul asuva VMS-i küttesüsteemi modelleerimise tulemusi, võrreldakse neid omavahel ning katsetulemustega. Joonisel 4.11 on modelleerimise tulemused kantud samale graafikule koos kohapeal tehtud katse tulemustega.



Joonis 4.11 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri muutus katse käigus ning modelleerituna

Nagu graafikult on näha, peaks teoreetiliselt esipaneeli temperatuuri muutus olema suurem, kui see katse käigus oli.

Joonisel 4.12 on toodud VMS-i esipaneeli temperatuurimuutuse modelleerimise tulemused ilma lumeta ja koos lumega. Kahe olukorra modelleerimise tulemuste vahe on ligikaudu 5°C. Olukorras, kus esipaneelil lund pole, on esipaneeli maksimaalseks temperatuuri muutuseks ca 7,5°C, mis saavutatakse ligikaudu 15 minuti jooksul pärast soojenduse tööle lülitamist. Olukorras, kus esipaneelil on lumi, on esipaneeli maksimaalseks temperatuuri muutuseks kõigest ca 2,2°C, mis saavutatakse ligikaudu 5 minuti jooksul pärast soojenduse tööle lülitamist.



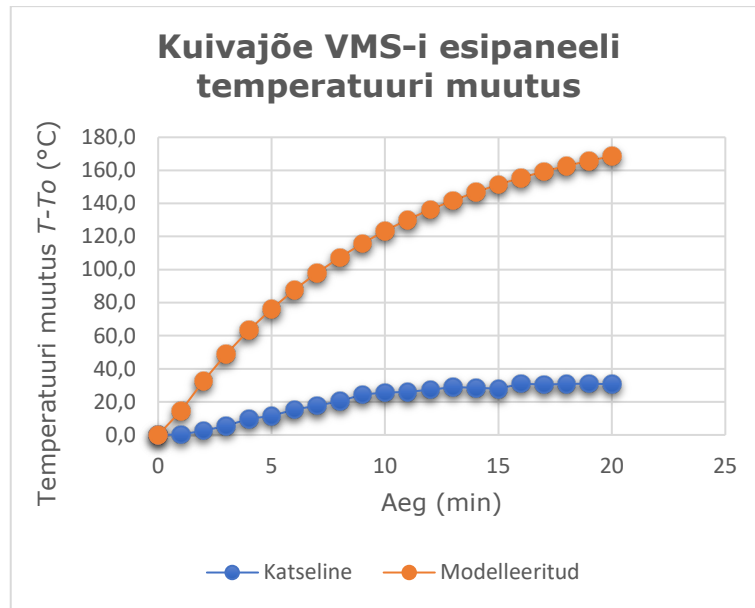
Joonis 4.12 Kasti VMS-i esipaneeli modelleeritud temperatuuri muutus lumega ning lumeta

Võrreldes modelleerimise tulemusi katse käigus saadud tulemustega, on näha, et reaalse katse käigus mõõdetud temperatuurimuutused jäävad oluliselt alla modelleerimise käigus saadud tulemustele. Üheks teguriks, mis mõjutab katsetulemuste usaldusväärsust, on püromeeter, millega katse läbi viidi. Antud püromeeter pole mõeldud teaduslike katsete läbi viimiseks, sellel pole võimalik seadistada mõõdetava pinna mustsusastet ning lisaks pole see taadeldud mõõteriist. Ilmselt mõjutas reaalse katse käigus mõõdetud temperatuure ka tuul, mida on modelleerimisel raske arvesse võtta. Samas näitab modelleerimise tulemus, et esipaneeli temperatuuri muutus ei ole nii suur, kui see teoreetiliselt võiks olla. Modelleerimisel võeti aluseks välisõhu temperatuur $-0,5^{\circ}\text{C}$, mille korral oli maksimaalne temperatuuri tõus ca $7,5^{\circ}\text{C}$. See tähendab, et kui õhutemperatuur on tugevalt miinuspoolel, ei pruugi VMS-i esipaneeli temperatuur plusspoolele jõudagi. Olulist rolli mängib modelleerimise juures nii soojusülekandeegur kuumalt õhult VMS-i esipaneeli siseseinale, kui ka esipaneeli välisseinalt õhule ja lumele. Selleks, et saada teada kuidas süsteem käitub madalamate temperatuuride korral, peaks täiendavalt uurima, katsetama ja modelleerima esipaneeli temperatuuri muutust madalamate õhutemperatuuride korral. Seetõttu pole antud süsteemi puhul üheselt selge, kas see tagab lume sulamise kõikide Eesti esinevate õhutemperatuuride juures või mitte.

Kuigi süsteemil puudub automaatika, mis tuvastaks lumesadu ning juhiks soojenduse tööd lähtuvalt lume olemasolust, pole mõtet taolist automaatikat täiendavalt VMS-i sisse ka paigaldada. VMS-id on varustatud valgusanduritega, üks esiküljel ning teine tagaküljel. Esiküljel oleva valgusanduri põhjal oleks võimalik teha järeldusi lumekihi olemasolu kohta esipaneelil. Mõttekas oleks küttesüsteemi juhtida vajaduse tekkides, käsitsi. Küttesüsteemi käsitsi juhtimine võimaldab küttesüsteemi käivitada ainult reaalse vajaduse korral ning seeläbi on võimalik elektrit kokku hoida.

4.4.2 Smart E263/E77 projekt

Käesolevas punktis vaadeldakse Kuivajõel asuva VMS-i küttesüsteemi modelleerimise tulemusi, võrreldakse neid omavahel ning katsetulemustega. Joonisel 4.13 on modelleerimise tulemused kantud samale graafikule koos kohapeal tehtud katse tulemustega.



Joonis 4.13 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri muutus katse käigus ning modelleerituna

Nagu graafikult on näha, peaks teoreetiliselt esipaneeli temperatuur tõusma oluliselt kiiremini ning kõrgemale, kui see katse käigus juhtus. Modelleerimine näitab, et esipaneeli temperatuur võiks 20 minuti jooksul tõusta lausa 169°C võrra. Selle võimalikkust kinnitab ka takisti pinnatemperatuuri ligikaudne arvutus, seoste 4.1 ja 4.2 abil.

$$Q_{konv} = 2,44A_s \frac{(T_s - T_{fluid})^{1,25}}{D^{0,25}} \quad (4.1)$$

kus Q_{konv} – elemendi võimsus, W;

A_s – elemendi pindala, m²;

T_s – elemendi pinnatemperatuur, °C;

T_{fluid} – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C;

D – elemendi läbimõõt, m.

$$A_s = 2 * \frac{1}{4} \pi D^2 + \pi DL \quad (4.2)$$

kus L – elemendi pikkus, m.

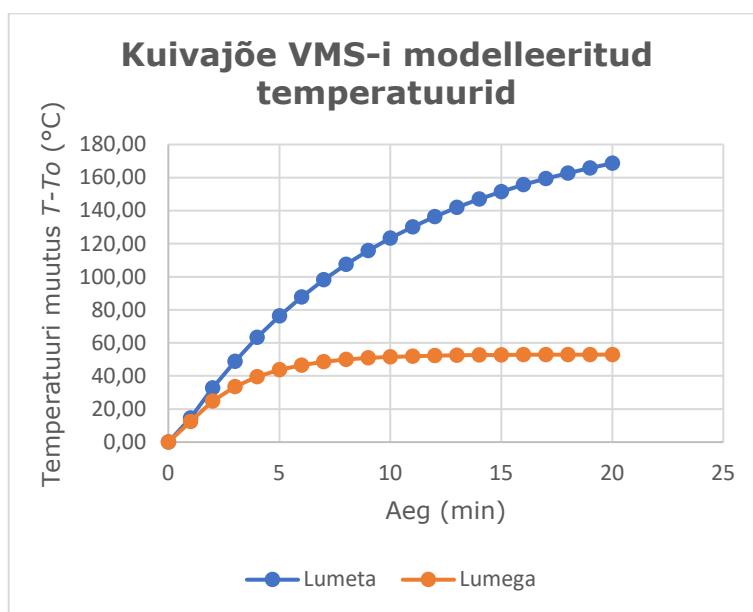
$$A_s = 2 * \frac{1}{4} \pi * 0,0273^2 + \pi * 0,0273 * 0,0977 = 9,55 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$150 = 2,44 * 9,55 * 10^{-3} \frac{(T_s - 22)^{1,25}}{0,0273^{0,25}}$$

$$T_s = 564 \text{ }^\circ\text{C}$$

Elemendi pinnatemperatuur tuleb niivõrd suur, kuna see ei võta arvesse soojuse kandumist sellega kontaktis olevatele pindadele. Eelnev arvutusmetoodika on saadud vestluste käigus lõputöö juhendajaga. Reaalselt ei ole modelleeritud ega ligikaudselt arvatud temperatuurimuutused seadme töörežiimis soovitavad ning selle vältimiseks rakendatakse kaitseautomaatikat, mis lülitab takistid välja, kui seadmete temperatuur on tõusnud 60°C-ni.

Joonisel 4.14 on toodud VMS-i esipaneeli temperatuurimuutuse modelleerimise tulemused ilma lumeta ja koos lumega. Kahe olukorra modelleerimise tulemused on vägagi erinevad. Olukorras, kus esipaneelil on lumi, on esipaneeli maksimaalseks temperatuuri muutuseks ca 53°C, mis saavutatakse ligikaudu 12 minuti jooksul pärast soojenduse tööle lülitamist. Temperatuuri tõus 25°C võrra saavutatakse juba 2 minutiga.



Joonis 4.14 Kuivajõe VMS-i esipaneeli modelleeritud temperatuuri muutus lumega ning lumeta

Nagu on näha modelleerimise tulemustest, ei tõuse lume olemasolu korral esipaneeli temperatuur üle 53°C esipaneeli algtemperatuurist. See näitab, et süsteemi projekteerimisel on arvestatud suure soojusülekandevõimega, mida lumi põhjustab. Olulist rolli mängib modelleerimise juures soojusülekandevõime VMS-i esipaneeli välisseinalt õhule ja lumele. Süsteem on projekteeritud saavutama maksimaalse temperatuuri esipaneeli pinnal võimalikult kiiresti, samal ajal saavutamata soovimatut temperatuuri. Esipaneeli temperatuuri tõus 25°C võrra peaks teoreetiliselt toimuma juba esimese 120 sekundi jooksul. Sellest võib järelda, et süsteem on suuteline tagama lume sulatamiseks vajaliku temperatuuri tõusu VMS-i esipaneelil. Katseliselt mõõdetud

temperatuur muut jääb küll 30°C juurde, kuid ka sellest peaks piisama, et tagada lume sulatamine kõikide Eestis esinevate õhutemperatuuride juures. Kuigi süsteemil puudub automaatika, mis tuvastaks lumesadu ning juhiks soojenduse tööd lähtuvalt lume olemasolust, pole mõtet taolist automaatikat täiendavalt VMS-i sisse ka paigaldada. VMS-id on varustatud valgusanduritega, üks esiküljel ning teine tagaküljel. Esiküljel oleva valgusanduri põhjal oleks võimalik teha järeldusi lumekihi olemasolu kohta esipaneelil ning mõttekas oleks küttesüsteemi juhtida vajaduse tekkides, käsitsi. Küttesüsteemi käsitsi juhtimine võimaldab küttesüsteemi käivitada ainult reaalse vajaduse korral ning seeläbi on võimalik elektrit kokku hoida.

5 SÜSTEEMIDE VÕRDLUS

Käesolevas peatükis võrreldakse kahte küttesüsteemi ning tuuakse välja nende positiivsed ja negatiivsed küljed. Kahe süsteemi tugevused ja nõrkused on välja toodud tabelis 5.1 ja 5.2. Lisaks tuuakse välja aspektid, mis vajaksid täiendavat uurimist.

Tabel 5.1 Kasti küttesüsteemi tugevused ja nõrkused

Tugevused	Nõrkused
Vähe komponente	Küttekehade grupeeritus
Temperatuuriandurid sisetemperatuuri mõõtmiseks korpuse erinevates punktides	Soojus jaotamise sõltumine ventilaatoritest
Võimalus seadistada süsteem töötama sõltuvalt välisõhu temperatuurist	Puudub temperatuuriandur esipaneeli sisetemperatuuri teada saamiseks
Ülekuumenemine on äärmiselt ebatõenäoline	Automaatse rikete tuvastamise võimaluse puudumine
Kuuma õhu suunamine õigesse kohta	Automaatse lume tuvastamise võimaluse puudumine
Vähene isoleerimisvajadus	Võimsust reguleeriva automaatika puudumine
Madalam energiakulu	Väikene temperatuuri muutus kõrge soojusülekande teguri korral

Tabel 5.2 Kuivajõe küttesüsteemi tugevused ja nõrkused

Tugevused	Nõrkused
Soojuse andmine vajalikesse kohtadesse	Palju komponente
Soojus jaotamise sõltumatus teistest komponentides	Ülekuumenemise võimalikkus
Väga suur temperatuuri muutus ka kõrge soojusülekande teguri korral	Puuduvad temperatuuriandurid sisetemperatuuride jälgimiseks
Esipaneeli väga kiire soojenemine	Automaatse rikete tuvastamise võimaluse puudumine
Kõrgem energiakulu	Automaatse lume tuvastamise võimaluse puudumine
Kaitseautomaatika ülekuumenemise vältimiseks	Võimsust reguleeriva automaatika puudumine
	Suurem isoleerimisvajadus

Kahte süsteemi omavahel kõrvutades on näha, et mõlemal on oma tugevused ja nõrkused. Kokkuvõtvalt tagab autori arvates kiirema lume sulatamise Kuivajõe VMS-i paigaldatud küttesüsteem. Sellel on ka omad nõrkused, kuid kahtlemata on see süsteem võimeline tõstma VMS-i esipaneeli temperatuuri oluliselt kiiremini, kui Kasti märkides kasutatud lahendus. Likvideerides osad nõrkused, oleks antud küttesüsteemi võimalik veelgi efektiivsemaks muuta. Energiakulude vähendamiseks ning süsteemi töö täpsemaks juhtimiseks võiks märkides kasutada temperatuuriandurit, mis tuvastaks VMS-i esipaneeli sisetemperatuuri. Selle temperatuuri põhjal saaks teha järeldusi, kas lumi hakkab märgi esiseinalt sulama või mitte. Samuti võiks soojenduse töö paremaks juhtimiseks arendada võimaluse kuvada juhttarkvaras esiküljel asuva valgusanduri näitu. See võimaldaks teha järeldusi lume olemasolu kohta. Selleks tuleks läbi viia ka täiendavaid katseid, et uurida kuidas mõjutavad erinevad lumekihi paksused

valgusanduri näitu. Võimsust reguleeriva automaatika lisamine ei tundu siiski vajalik, kuna märkide arv on hetkel ning lähitulevikus siiski piisavalt väikene, et tulla toime nende käsitsi juhtimisega.

Selleks, et saada Kuivajõe paigaldatud küttesüsteemist veelgi parem ülevaade ning leida kohad selle optimeerimiseks, tuleks teha täiendavaid katseid. Katsete käigus tuleks mõõta lisaks esipaneeli temperatuurile ka termotakistite ja nendega kontaktis olevate sisepindade temperatuuri muutuse sõltuvust ajast.

6 KOKKUVÕTE

Käesolev lõputöö uuris kahte muutuva teabega liiklusmärkidesse paigaldatud soojendussüsteemi. Ühte, mis põhineb konvektiivsel soojusülekanandel soojalt õhult VMS-i esiseinale ning teist, mis põhineb soojusjuhtivusel, mille tekitab kontakt soojusallika ja VMS-i esiseina vahel. Talvel halvendab VMS-ide esikülgedele kleepuv lumi nende loetavust. Vajaliku loetavus tagamiseks tuleb lumi VMS-ide esipaneelidelt sulatada. Selleks on vaja tõsta VMS-i esipaneeli temperatuuri selliselt, et esipaneelidel olev lumi hakkaks sulama. Töö eesmärgiks oli uurida, kumma soojenduslahenduse korral on VMS-i esipaneeli temperatuuri kasvu kiirus suurem. Eesmärgi saavutamiseks tutvuti avaldatud teadustöödega, mis käsitlevad lume sulamise mehhanisme erinevatelt pindadelt. Kuna VMS-ide kohta autor ühtegi teadustööd ei leidnud, võeti aluseks teadustööd, mis käsitlesid lume sulamist ning sulatamist päikesepaneelidelt. Muutuja teabega liiklusmärkide korral tuleb nendesse ette näha täiendavad süsteemid, mis annavad esiseinale lume sulatamiseks lisasoojust. VMS-ide puhul tuleb soojendussüsteem kindlasti dimensioneerida lume sulatamiseks, sest lume maha libisemine on takistatud VMS-ide ehituse tõttu.

Lisaks viidi läbi praktilised katsed ning modelleeriti mõlema soojenduslahenduse tööd kasutades selleks sobilikku tarkvara. Praktilised katsed viidi läbi talviste ilmaoludega. Katse käigus käivitati VMS-i soojendus ning seejärel mõõdeti VMS-i esiseina temperatuuri muutumist katse jooksul. Mõlema soojendussüsteemi puhul valiti üks VMS, millega katse läbi viidi. Katsete läbi viimise käigus selgus, et kiiremini saavutab kõrgema temperatuuri lahendus, mis põhineb soojusjuhtivusel.

Pärast praktiliste katsete läbiviimist modelleeriti mõlema soojendussüsteemi toimimist kasutades tarkvara „Autodesk Inventor Nastran“ ning võrreldi neid empiiriliste tulemustega. Modelleeriti kahte olukorda – olukorda kus VMS-i esiseinal sulatatakse lund ning olukorda kus esiseinal lund ei ole. Modelleerimise käigus selgus, et soojusjuhtivust kasutav süsteem peaks tagama lume sulatamise kõikide Eesti esinevate õhutemperatuuride juures. Konvektsiooni kasutava süsteemi puhul selgus, et sellest ei pruugi piisata VMS-i esipaneeli soojendamiseks kõikide Eesti esinevate õhutemperatuuride juures. Modelleerimise käigus selgus, et soojusjuhtivust kasutav süsteem on suuteline VMS-i esiseina lume olemasolul tõstma esiseina temperatuuri ligikaudu 53°C võrra ning konvektsiooni kasutav süsteem on suuteline VMS-i esiseina temperatuuri tõstma ligikaudu 2°C võrra. Katsete käigus selgus, et soojusjuhtivust kasutav süsteem on suuteline VMS-i esiseina temperatuuri tõstma ligikaudu 30°C võrra

ning konvektsiooni kasutatav süsteem on suuteline VMS-i esiseina temperatuuri tõstma ligikaudu 6°C võrra. Mõlemad temperatuurimuutused mõõdeti ilma lumeta.

Nii modelleerimise kui ka katsete tulemused näitasid, et temperatuur tõuseb kiiremini ning kõrgemale soojusjuhtivust kasutavas süsteemis. Mõlema süsteemi puhul tekib küsimus miks olid katse käigus mõõdetud temperatuuri tõusud niivõrd väikesed, võrreldes modelleeritud tulemustega. Tõenäoliselt tekivad realselt süsteemis täiendavad soojuskaod, mida modelleerimise puhul arvesse ei võetud. Kindlasti mängib rolli ka mõõtmiseks kasutatud püromeeter, mis ei ole täppismõõtmisteks ette nähtud seade ning tuul, mis esipaneeli katsete käigus jahutab.

7 SUMMARY

This thesis investigated two heating systems installed in variable message signs (VMS). One system is based on convective heat transfer from warm air to the front panel of the VMS and the other is based on conductive heat transfer, generated by direct contact between the heat source and the front panel of the VMS. In winter, snow sticking to the front of VMS' reduces their readability. To ensure the necessary readability, the snow on the front panels of the VMS' must be melted. For this purpose, the temperature of the VMS' front panel needs to be raised so that the snow on the front panels starts to melt. The objective was to determine which heating solution creates a more rapid temperature increase on the front panels of the VMS'. To achieve this goal, the study reviewed published research on snow melting mechanisms on various surfaces. Since the author found no specific studies on variable message signs, research on snow melting and removal from solar panels was used as a reference. Variable message signs require additional systems to provide extra heat for melting snow on the front panel. The heating system must be adequately dimensioned to ensure snow melting, as the construction of variable message signs prevents snow from sliding off.

Additionally, practical experiments were conducted and the performance of both heating solutions was modeled using appropriate software. The experiments were carried out under winter weather conditions. During the experiments the heating system of the VMS was activated and temperature changes on the front panel were measured over time. One VMS was chosen to test conductive heat transfer and one VMS was chosen to test convective heat transfer. The experiments revealed that the solution based on conductive heat transfer reaches higher temperatures more quickly.

Following the practical experiments, the operation of both heating systems was modeled using "Autodesk Inventor Nastran" software and compared with empirical results. Two scenarios were modeled: one where snow is being melted on the VMS front panel and one where there is no snow. The modeling results indicated that the conductive heat transfer system should ensure snow melting at all air temperatures occurring in Estonia. For the convective system, it was found that it might not be sufficient to heat the VMS front panel at all air temperatures occurring in Estonia. The modeling showed that the conductive system could increase the front panel temperature by approximately 53°C in the presence of snow, while the convective system could increase the temperature by about 2°C. The experiments showed that the conductive system could increase the front panel temperature by approximately 30°C (without snow), while the convective system could increase the temperature up to 6°C (without snow). Both the modeling

and experimental results indicated that the temperature rises faster and higher in the system using conductive heat transfer.

Both the modeling and experimental results showed that the temperature rises faster and higher in the system using conductive heat transfer. For both systems, the question arises as to why the temperature increases measured during the experiment were so small compared to the modeled results. It is likely that in the real system, additional heat losses occur that were not accounted for in the modeling. Certainly the pyrometer used for measurement, which is not a device intended for precision measurements as well as the wind which cooled the front panel during the tests, also play a role.

8 KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Texas Transportation Institute, „Variable message sign operations manual. Final report,” 2001.
- [2] Messagemaker displays, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.messagemaker.co.uk/a-guide-to-variable-message-signs-vms/>. [Kasutatud 2024].
- [3] Rotapanel, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rotapanel.com/traffic-variable-rotating-prism-signs/multiple-drives/>.
- [4] Transpordiamet.
- [5] B. Mohammadian, A. H. A. Yassine, M. Sarayloo ja H. Sojoudi, „Prediction of wet snow shedding from surfaces under various heat transfer modes,” 2021.
- [6] H. Käär, A. Paist, I. Mikk, A. Poobus ja T. Tiikma, Soojus- ja massilevi I osa. Põhikursus, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1998.
- [7] N. Maeno, K. Nishimura ja Y. Kaneda, „Viscosity and heat transfer in fluidized snow,” Journal of Glaciology, Sapporo, 1980.
- [8] A. H. A. Yassine, N. Namdari, B. Mohammadian ja H. Sojoudi, „Understanding mechanisms of snow removal from photovoltaic modules,” Elsevier Ltd., 2021.
- [9] R. E. Pawluk, Y. Chen ja Y. She, „Photovoltaic electricity generation loss due to snow– A literature review on influence factors, estimation, and mitigation,” Elsevier Ltd., 2018.
- [10] Arcol, „HS Aluminium Housed Resistors”.
- [11] Raytek, „Raytek-Direct,” 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.raytek-direct.com/product/raytek-raymt6u-minitemp-portable-ir-thermometer-29-to-500-c>.
- [12] Transpordiamet, „Teeilm,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://teeilm.teeinfo.ee/uus/>.

9 LISAD

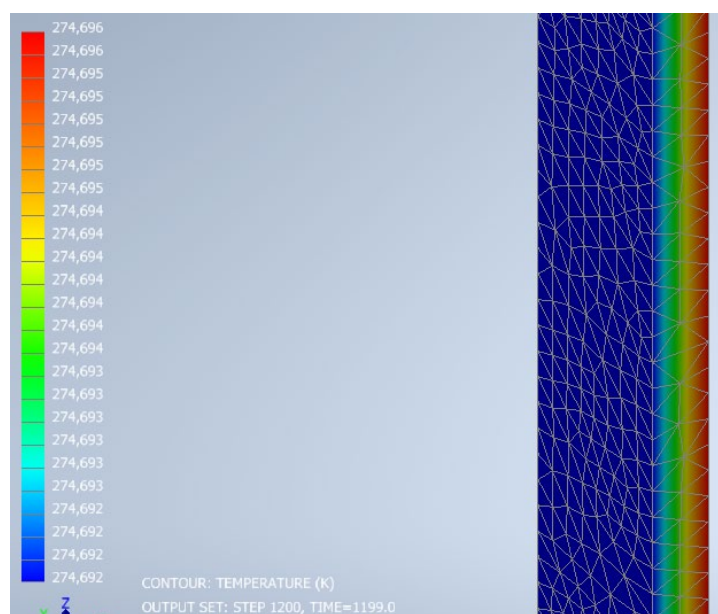
Lisa 1 Kasti VMS-i soojendussüsteemi modelleerimise toorandmed

Tabel 9.1 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused lumega

Aeg (s)	Temperatuur (K)					
		379	274,689		799	274,692
		399	274,690		819	274,692
0	273,000	419	274,691		839	274,692
19	273,129	439	274,691		859	274,692
39	273,598	459	274,691		879	274,692
59	273,926	479	274,692		899	274,692
79	274,155	499	274,692		919	274,692
99	274,316	519	274,692		939	274,692
119	274,429	539	274,692		959	274,692
139	274,508	559	274,692		979	274,692
159	274,563	579	274,692		999	274,692
179	274,602	599	274,692		1019	274,692
199	274,629	619	274,692		1039	274,692
219	274,648	639	274,692		1059	274,692
239	274,661	659	274,692		1079	274,692
259	274,670	679	274,692		1099	274,692
279	274,677	699	274,692		1119	274,692
299	274,681	719	274,692		1139	274,692
319	274,685	739	274,692		1159	274,692
339	274,687	759	274,692		1179	274,692
359	274,688	779	274,692		1199	274,692

Tabel 9.2 Kasti VMS-i temperatuuri modelleerimise ääritingimused lumega

VMS-i sisetemperatuur	295	K
Soojusülekande tegur õhult siseseinale	10	W/(m ² *K)
Soojusvoog äärtel	0	W/m ²
Esipaneeli välisseina temperatuur	273	K
Soojusülekande tegur välisseinalt õhule	120	W/(m ² *K)
Ümbritseva keskkonna temperatuur	272,5	K



Joonis 9.1 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemus lumega

Tabel 9.3 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused ilma lumeta

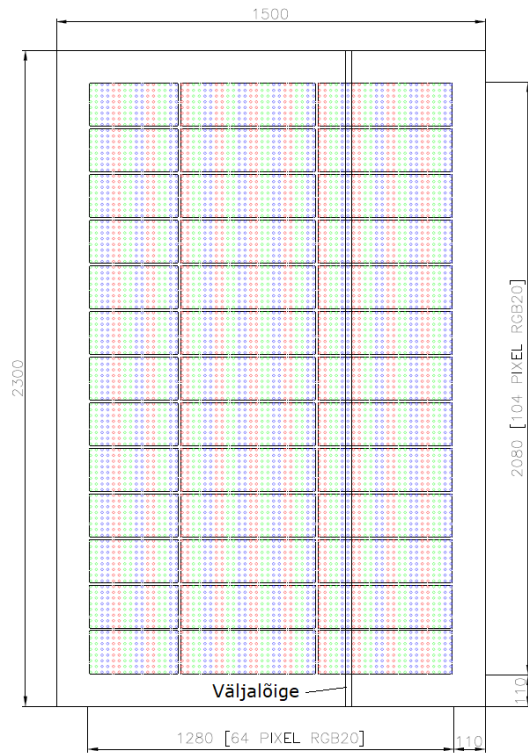
Aeg (s)	Temperatuur (K)				
0	272,500	379	278,428	799	279,721
19	273,065	399	278,553	819	279,743
39	273,614	419	278,667	839	279,764
59	274,119	439	278,773	859	279,782
79	274,585	459	278,870	879	279,799
99	275,014	479	278,959	899	279,815
119	275,409	499	279,042	919	279,830
139	275,772	519	279,117	939	279,843
159	276,107	539	279,187	959	279,856
179	276,415	559	279,252	979	279,867
199	276,699	579	279,311	999	279,877
219	276,960	599	279,365	1019	279,887
239	277,201	619	279,415	1039	279,896
259	277,422	639	279,462	1059	279,904
279	277,626	659	279,504	1079	279,912
299	277,814	679	279,543	1099	279,919
319	277,987	699	279,580	1119	279,925
339	278,147	719	279,613	1139	279,931
359	278,293	739	279,643	1159	279,936
		759	279,672	1179	279,941
		779	279,697	1199	279,946

Tabel 9.4 Kasti VMS-i temperatuuri modelleerimise ääritingimused ilma lumeta

VMS-i sisetemperatuur	295	K
Soojusülekanne õhult siseseinale	10	W/(m ² *K)
Soojusvoog äärtel	0	W/m ²
Esipaneeli välisseina temperatuur	272,5	K
Soojusülekanne esipaneelilt väliskeskkonda	20	W/(m ² *K)
Ümbritseva keskkonna temperatuur	272,5	K



Joonis 9.2 Kasti VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused ilma lumeta



Joonis 9.3 Kasti VMS-i tootejoonis koos kasutatud väljalõikega [4]

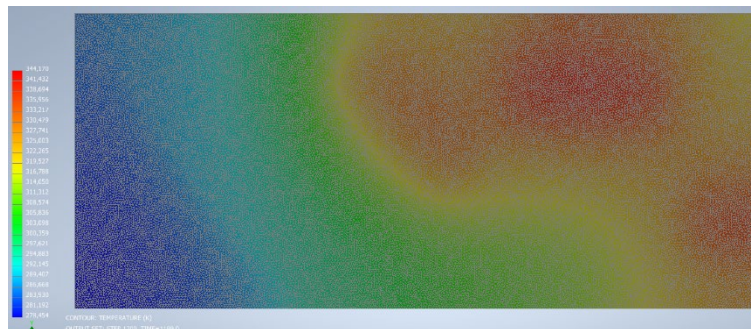
Lisa 2 Kuivajõe VMS-i soojendussüsteemi modelleerimise toorandmed

Tabel 9.5 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused lumega

Aeg (s)	Temperatuur (K)					
		379	320,501		799	325,759
0	272,190	399	321,159		819	325,808
19	275,701	419	321,742		839	325,852
39	280,688	439	322,257		859	325,891
59	285,691	459	322,712		879	325,925
79	290,281	479	323,115		899	325,956
99	294,395	499	323,471		919	325,983
119	298,053	519	323,785		939	326,006
139	301,298	539	324,064		959	326,027
159	304,173	559	324,310		979	326,046
179	306,718	579	324,527		999	326,062
199	308,970	599	324,720		1019	326,077
219	310,962	619	324,890		1039	326,090
239	312,725	639	325,040		1059	326,101
259	314,284	659	325,173		1079	326,111
279	315,662	679	325,290		1099	326,120
299	316,882	699	325,394		1119	326,128
319	317,960	719	325,486		1139	326,135
339	318,913	739	325,567		1159	326,141
359	319,755	759	325,639		1179	326,146
		779	325,703		1199	326,150

Tabel 9.6 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise ääritingimused lumega

Soojustootlikkus	2403850	W/m ³
VMS-i sisetemperatuur	295	K
Soojusülekanneõhult siseseinale	10	W/(m ² *K)
Soojusvoog äärtel	0	W/m ²
Esipaneeli välisseina temperatuur	273	K
Soojusülekanneõhult esipaneelilt väliskeskkonda	120	W/(m ² *K)
Ümbritseva keskkonna temperatuur	273,2	K



Joonis 9.4 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused lumega

Tabel 9.7 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused ilma lumeta

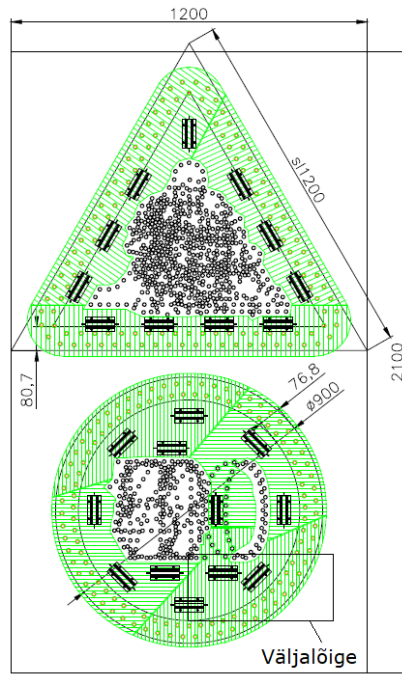
Aeg (s)	Temperatuur (K)				
0	273,190	379	364,503	799	416,771
19	275,883	399	367,948	819	418,452
39	281,582	419	371,272	839	420,078
59	287,790	439	374,480	859	421,650
79	293,982	459	377,577	879	423,172
99	300,011	479	380,566	899	424,644
119	305,837	499	383,453	919	426,069
139	311,450	519	386,242	939	427,447
159	316,853	539	388,936	959	428,781
179	322,052	559	391,538	979	430,071
199	327,055	579	394,053	999	431,320
219	331,869	599	396,484	1019	432,528
239	336,503	619	398,833	1039	433,697
259	340,964	639	401,104	1059	434,829
279	345,260	659	403,300	1079	435,924
299	349,398	679	405,423	1099	436,983
319	353,385	699	407,476	1119	438,009
339	357,227	719	409,461	1139	439,001
359	360,931	739	411,381	1159	439,961
		759	413,238	1179	440,891
		779	415,034	1199	441,790

Tabel 9.8 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise ääritingimused ilma lumeta

Soojustootlikkus	2403850	W/m ³
VMS-i sisetemperatuur	295	K
Soojusülekanalitegur õhult siseseinale	10	W/(m ² *K)
Soojusvoog äärtel	0	W/m ²
Esipaneeli välisseina temperatuur	273,2	K
Soojusülekanalitegur esipaneelilt väliskeskkonda	20	W/(m ² *K)
Ümbritseva keskkonna temperatuur	273,2	K



Joonis 9.5 Kuivajõe VMS-i esipaneeli temperatuuri modelleerimise tulemused ilma lumeta



Joonis 9.6 Kuivajõe VMS-i tootejoonis koos kasutatud väljalõikega [4]