



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

**LUME KASUTAMISE POTENTSIAAL TALLINNA
KAUGJAHUTUSVÕRGUS
SNOW COOLING POTENTIAL IN TALLINN DISTRICT
COOLING NETWORK
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Karl Järve

Üliõpilaskood 211562MASM

Juhendaja: Anna Volkova, professor

(Tiitellehe pöördel)

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.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Karl Järve (sünnikuupäev 20.12.1992)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Lume kasutamise potentsiaal Tallinna kaugjahutusvõrgus,

mille juhendaja on Anna Volkova ja kaasjuhendaja Sreenath Sukumaran,

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.

_____ (kuupäev)

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

TalTech Instituudi nimetus
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karl Järve, 211562MASM (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: MASM02/18 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika
(kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Anna Volkova, kaasprofessor tenuuris (EI - energiatehnoloogia
instituut) (amet, nimi, telefon)
Konsultant: Sreenath Sukumaran (nimi, amet)
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Lume kasutamise potentsiaal Tallinna kaugjahutusvõrgus.

(inglise keeles) Snow cooling potential in Tallinn district cooling network.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida lumijahutus võimalusi;
2. Lumest saadav jahutusenergia;
3. Lumest saadava jahutusenergia saamine ja kasutamine Tallinna kaugjahutusvõrgus;
4. Lumijahutusega kaasnevad kasutegurid.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.		
2.		
3.		

Töö keel: **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

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

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
ÜLEVAADE KASUTATUD KIRJANDUSEST.....	7
SISSEJUHATUS.....	10
1. LUMIJAHUTUS.....	11
1.1 Lume kogumine ja säilitamine jahutusperioodiks	11
1.1.1 Lume säilitamine hoones	14
1.1.2 Lume säilitamine allpool pinnast	17
1.1.3 Lume säilitamine süvendis	18
1.2 Erinevate jahutsüsteemide isolatsioonimaterjalid ning soojus- ja külmakaod....	20
1.2.1 Ideaalseim isolatsioonimaterjal.....	23
2. UUE LUMIJAHUTUSSÜSTEEMI KONTSEPTSIOONI VÄLJA PAKKUMINE	27
2.1 Süsteemi toimimine	28
2.2 Väljapakutud süsteemi eelised	33
3. LUMIJAHUTUS TALLINNA KAUGJAHUTUS SÜSTEEMIS	34
3.1 Lumekoristus Tallinnas.....	35
3.2 Lumest saadav jahutusenergia	37
3.2.1 Tallinna Lennujaam	46
KOKKUVÕTE.....	52
SUMMARY	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	56

EESSÕNA

Käesolev magistritöö „Lume Kasutamise Potentsiaal Tallinna Kaugjahutusvõrgus“ on loodud juhendaja Anna Volkova ettepanekul ja juhendamisel. Töö kaasjuhendajaks on Sreenath Sukumaran, kes koos põhijuhendaja Anna Volkovaga aitas töö ellu viia! Teema osutus kohe minu jaoks väga intrigeerivaks ning huvi lumijahutuse arendamise vastu kasvas töö käigus.

Täna töö juhendaid Anna Volkovat ja Sreenath Sukumarani ning Tallinna Linnavalitsust Raestipendiumi määramisest eest!

ÜLEVAADE KASUTATUD KIRJANDUSEST

Lume säilitamise võimalusi ja näiteid nende kohta leitud mitmes uurimustöös. Nendes töödes esitletud meetodid kattusid ning kinnitasid sisaldanut infot. Analüüsi erinevaid võimalusi lume säilitamiseks tuues välja iga süsteemi positiivseid ja negatiivseid aspekte. Nendes sisaldasid ka võimalused lumest energia kätte saamise kirjeldused. Kirjeldatud meetodid olid põhiliselt seotud lume paigutamise ja maapinna suhtes – selle peale, pooleldi sisse või alla. [1], [2], [3]

Omapärasel viisil lahendatud lumijahutus süsteem on Hokkaidos, Jaapanis, kus lumi kogutakse olemasoleva hoone kõige alumisele korrusele, mis varem oli kasutusel kui parkla. Uurimustöös sisalduv info ilmestab lumijahutuse toimimist ja laiendab arusaama jahutussüsteemide rajamise võimalusest. [4]

Üheks domineerivaks allikaks lumijahutus süsteemide uurimisel kujunes Kjell Skogsbergi doktoritöö "Hooajaline lume ladustamine ruumide jahutamiseks ja protsessijahutuseks," 2005 (originaalis *Seasonal Snow Storage for Space and Process Cooling*) [3]. Doktoritöös sisaldus nii teoreetiline analüüs lumijahutuse rakendamiseks, kui ka reaalsed katsetused mille tulemusel sai teoks lumijahutuse rajamine Sundsvalli haiglale, Rootsis. Rajatud süsteemi analüüs ja kasutamise käigus kogutud andmestik annab aluse käesoleva magistritöö sisule, milleks saab olemasoleva süsteemi uurimine ja sellega kaasneva edasiarendamine. Edasiarenduse vajadus tekib süsteemides kirjeldatud probleemidest nagu näiteks sulaveest tingitud korrosioon torustikus või vetikate kasv soojusvahetis.

Kõikidest uuritud allikatest, mis sisaldasid infot lume säilitamise kohta või kirjeldasid lumijahutuse toimimist, ilmnes asjaolu, et loomuliku sulamise teel tekivad suured kaod. See toob kaasa ka jahutusenergia vähenemise. Tekib vajadus efektiivsema isoleerimise järele. Erinevaid isolatsioonimaterjale ja nende toimivust on kirjeldanud spetsiaalsed uurimustööd. Uuringud on läbiviidud Pekingis ja uuringute andmeid on võrreldud artiklis nimega "Erinevate soojusisolatsiooni katmisskeemide näitajate arvuline hinnang kolmes lumehoiukohas," 2021 (Qin Da-He, Ren Jia-Wen, Wang Fei-Teng, Wang Xing, tõlge inglisekeelsest pealkirjast "*Numerical Estimation of Thermal Insulation Performance of Different Overage Schemes at Three Places for Snow Storage*"). [5]

Kogutud info isolatsioonimaterjalide kohta annab aluse paremaks lume katmise arendamiseks.

Lumega jahutamine on kasulik paikades, kus on lund. Kuid lumega kaasnevad ka teised probleemid, nagu reostus ja saastunud sulavesi. Käesoleva magistritöö autori üheks eesmärgiks on luua ka lumijahutus süsteem, mis lahendab rohkem kui ainult jahutusega seotud probleemi. Sellest tulenevalt on loodud uus ja seni katsetamata kontseptsioon, mis peaks olema edasiarendus lumijahutus valdkonnas. Kjell Skogsbergi uurimustöö Sundsvalli haigla lumijahutuse kohta [3] ja Jesper Moe uurimustöö Oslo lennujaama lumijahutuse kohta [6] said uue loodava kontseptsiooni alusteks, millest tehti edasiarendus. Edasiarendus ise on oma toomiselt erinev eelpool mainitud süsteemidest.

Kuna töö üheks eesmärgiks on uurida lumijahutuse rakendamise võimalust kaugjahutuses Tallinnas, siis väga palju teavet sisaldus varem tehtud Evelin Tõniste magistritöös "Lumega Jahutamise Potensiaal Tallinnas," 2016 [7]. Tõniste uuritud info oli vajalik näitamaks, et milliseid andmeid on vaja otsida, et süsteem rajada (kaug)jahutuse osana. Samuti oli võimalik tema kogutud andmete ja koostatud järelduste põhjal hinnata lumijahutuse toimimise võimalikust. Samuti oli töös eraldi peatükk mereveega jahutuse kohta, milles sisalduva info põhjal on koostatud väike analüüs ka käesolevasse töösse.

Kaugjahutuse rajamiseks ja toimimiseks vajalike parameetrite ja kombineeritavate süsteemide miinimumnõuete kohta oli infot "Koostootmisjaamade jääsoojuse efektiivne kasutamine kaugjahutusvõrgus," 2021 (Tanel Kirs, Igor Krupenski, Aleksander Ledanov, Kertu Lepiksaar, Anna Volkova, Henrik Pieper, inglise keelne pealkiri "*Efficient Use of Heat From CHP Distributed by District Heating System*") [8] ja teisest artiklist "Kaugjahutuse planeerimine Tallinna näitel," 2022 (Anna Volkova, Aleksandr Hlebnikov, Aleksandr Ledvanov, Tanel Kirs, Urmas Raudsepp, Eduard Latõšov, "*District Cooling Network Planning. A Case Study of Tallinn*") [9]. Kaugjahutuse osade kombineerimise puhul sisaldus seal infot mereveega jahutuse kohta, mis võib aidata kaasa lumijahutuse toimimisele.

Selleks aga, et ühe süsteemi toimimine ennast õigustaks oli vaja koguda andmeid lume koristuse ja koristatavate koguste kohta Tallinnas. Vastav info oli kättesaadav Tallinna Linna ja Tallinna Linnavolikogu kodulehelt ja andmebaasidest [10], [11], [12] ning Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalameti kodulehelt [13].

Väga palju olulist infot kaugjahutuse kohta – nii olemasoleva kui planeeritava võrgu kohta sisaldas Aleksander Ledanovi 2021. aasta magistritöö „Ülemiste City kaugjahutuse arengukava“ [14] ning see allikas aitas lumijahutust paigutada paremini reaalsesse olukorda.

Eraldi on töö lõpus alapeatükk Tallinna Lennujaama kohta. Autoril tekkis huvi, kui palju lund oleks võimalik lennujaama aladelt kokku koguda ning kas lumijahutuse rajamine aitaks lennujaamal endale seatud kliima eesmäärke ellu viia. Lennujaama enda eesmärgid on sõnastatud nii riigi poolses ootuses, kui ka sellest tulenevalt lennujaama enda strateegiates ja aastaaruannetes [15], [16], [17], [18].

SISSEJUHATUS

Initsiatiiv lund kasutada jahutuses on väga lihtne – esiteks Eesti geograafiline asukoht võimaldab seda ning teiseks lume kasutamine energiasüsteemides viib meid kliimaneutraalsusele lähemale.

Kliimaneutraalsus on suur eesmärk, tingituna globaalsest kliima soojenemisest, mille takistamiseks on seatud erinevad meetmed ja eesmärgid. Eestis on järgimisel Euroopa roheline leppe põhimõttest seatud strateegia, mille eesmärk on saavutada 2050. aastaks Tallinnas kliimaneutraalus (ja ka kogu ülejäänud Eestis). See näeb ette esimese eesmärgina 2030. aastaks vähendada kasvuhuonegaaside heitkogust 40% ja sealt edasi juba eelpool mainitud 2050. aasta eesmärk. [11]

2,7% Euroopa Liidu hoonetes kasutatavast energiast kulub jahutusele. Prognoside kohaselt kolmekordistub see aastaks 2050. [8]

Lumi, mis teedelt ja tänavatelt kogutakse kokku hunnikutesse seisma, saaks tänu lumijahutusele panna elanike kasuks tööle. See mitte ainult ei vähendaks süsinikujalajälge, vaid annaks kogu lumekoristus tööle ka suurema eesmärgi!

Käesolev lõputöö hakkab uurima erinevaid lumijahutus süsteeme ning lume potentsiaali jahutajana. Toodud on näiteid erinevate võimaluste kohta lund säilitada ja kokku koguda. Erinevate juba olemasolevate lumijahutus süsteemide näitel proovib autor neid edasi arendada ja lõpuks sobitada see Tallinna kaugjahutusse. Kuna süsteem ei koosne ainult lumega jahutamisest vaid ka lume säilitamisest suvekuudel on autor edasi arendanud peale soojusvaheti ka isolatsioonimaterjali lume peale. Varasematest töödest on selgunud, et loomuliku sulamise näol on tegu väga suure energia kaoga, seetõttu tuleb leida lahendus, millega kaod vähenevad ja lume hulk suvekuudel ei sõltuks liiga palju välistest teguritest.

1. LUMIJAHUTUS

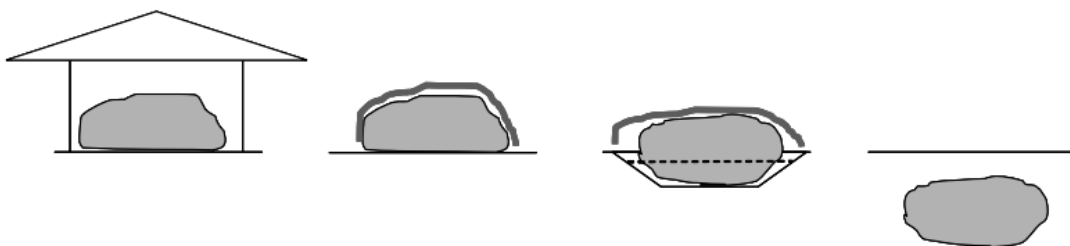
Kliimaneutraalsuse saavutamisele aitab kaasa taastuvate energiallikate rakendamine. Kui enamlevinumad taastuvenergia rakendused on juba pikemalt arendatud, siis lume kohta on üsna vähe vastavasisulisi uuringuid tehtud. Lume hoiustamine jahutuse eesmärgil tundub aga väga hea lahendus just põhjapoolsetele riikidele, kuna talveperioodil maha sadav lumi korjatakse igaljuhul teedelt ja tänavatelt kokku ühte kohta (lihtsalt sulama). Lund jahutusena rakendavad lahendused ja nende kasutamine on uus ja innovaatiline lähenemine energia salvestamiseks ning on vähemalt sama efektiivsed süsiniku jalajälje vähendajad nagu teised taastuvenergia allikad. [1]

1.1 Lume kogumine ja säilitamine jahutusperioodiks

Jää kasutamine pole sugugi tundmatu tehnika Eestis. 1938. aasta Järva teataja jaanuarikuu artiklis kirjeldatakse jää säilitamise võimalusi suveks. See hõlmab endas jää kokku kogumist ja selle katmist õlgede, saepuru (50 – 70 cm paksune kiht) ja laudadest katusega. [19]

Tegu on väga sarnase viisiga, kuidas käib lume säilitamine suvekuudeks. Järgnevatest peatükkidest selgub, et 1938. aasta eestlased katsid oma jää väga korralikult, sest käesolevas lõputöös uuritud süsteemid katavad vaid ühe kihiga lund, mille paksus on 20 – 40 cm.

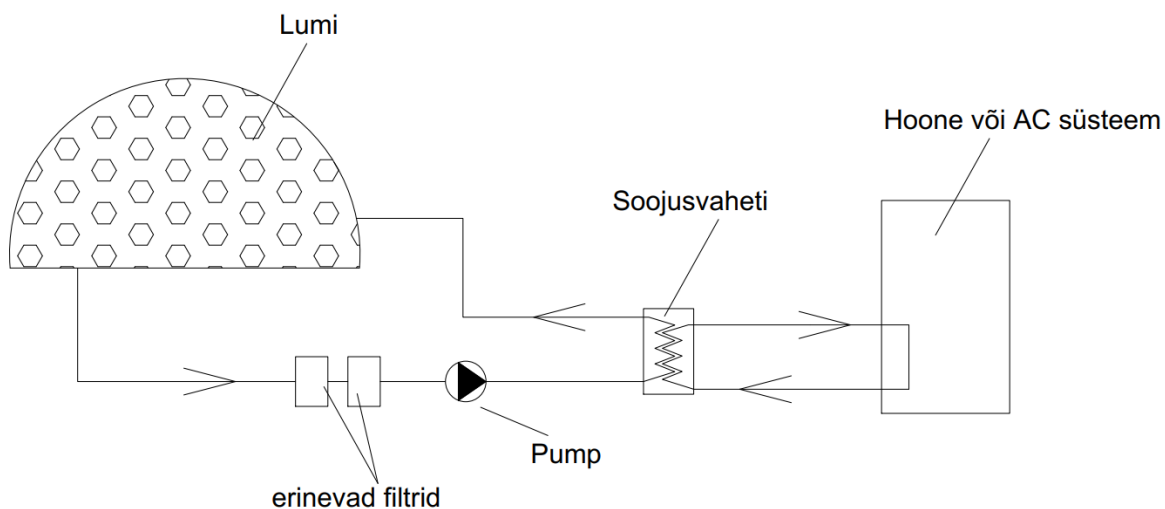
Lume säilitamiseks on 4 tüüpi lahendusi. Võimalik on säilitada ruumis (hoones), pinnasel, süvendis või allpool maapinda (Pilt 1). Hoones säilitatav lumi on hoone enda näol juba väliskeskkonnast isoleeritud ja hoone ehitus määrab energiakaod. Pinnasel ja süvendis olevad süsteemid vajavad eraldi isolatsioonivat materjali, mis kaitseb energiakadude eest ja aeglustab lume sulamist. Allpool maapinda olevad süsteemid vajavad kõige vähem isoleerivaid materjale, sest pinnas kaitseb neid välistemperatuuri eest. [3]



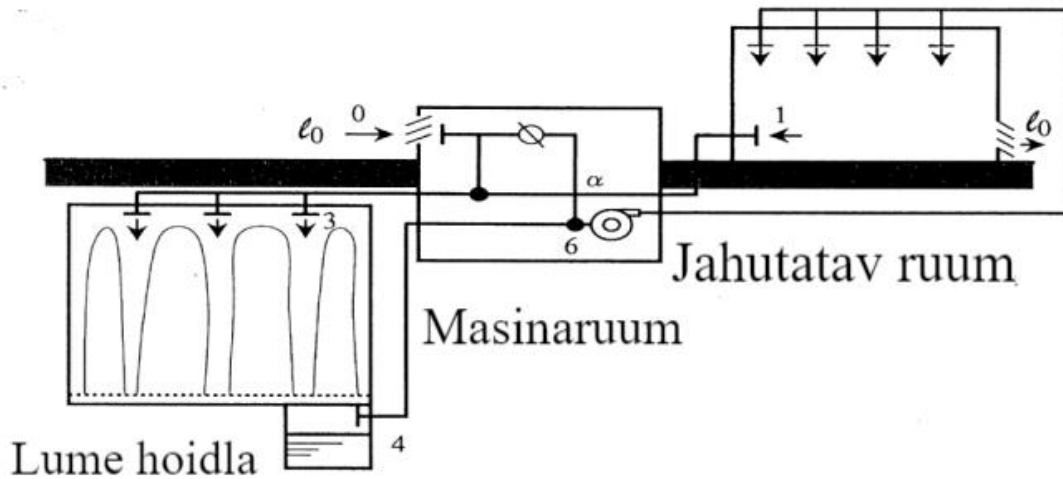
Pilt 1. Lume säilitamise viisid. Vasakult paremale – hoones sees, pinnasel, süvendis ja allpool maapinda [3]

Erinevaid disaine vaadates on näha, et mahutatavus on kõige enam piiratud hoones ja allpool maapinda loodud süsteemides. Hoone suurus seab piiri lume kogusele. Samuti ka allpool maapinda asuvas süsteemis mõjutab kaevatud süvise suurus mahutatavust. Allpool maapinda rajatud süsteem vajab siiski mingisugust konstruktsiooni, et vältida sulavee äravoolu ja vähendada energiakadu. Pinnasel ja süvendis olevate süsteemide mahutatavus sõltub teistsugustest teguritest nagu näiteks kasutada olev ala ja tehnoloogia olemasolu ladustamisalasisid täita, sest üldiselt on võimalik minna kõrguslikult lume(hunnikuga) nii kõrgele kui suudetakse ja lubatakse.

Lumijahutus süsteeme jaotatakse veel ka toimimise järgi. Enamlevinumad võimalused on jahutavaks energiakandjaks kasutada lumest tekkivat sulavett (Joonis 1) või puhuda läbi lume sooja õhku, mis jahtub jahedama keskkonnaga kokkupuutudes (Joonis 2). Sula on jaheda temperatuuriga ja juhitakse soojusvahetisse. Soojusvahetist väljuv sulavesi on kõrgema temperatuuriga ning suunatakse tagasi lume hoiustamispaika, kus see sulatab lumest uut vett juurde. Üks sellistest süsteemidest on "tavaline lume säilitamise süsteem" (inglise keeles *Conventional Snow Storage System (CSS)*) ja see on näidatud Joonis 1. [2]



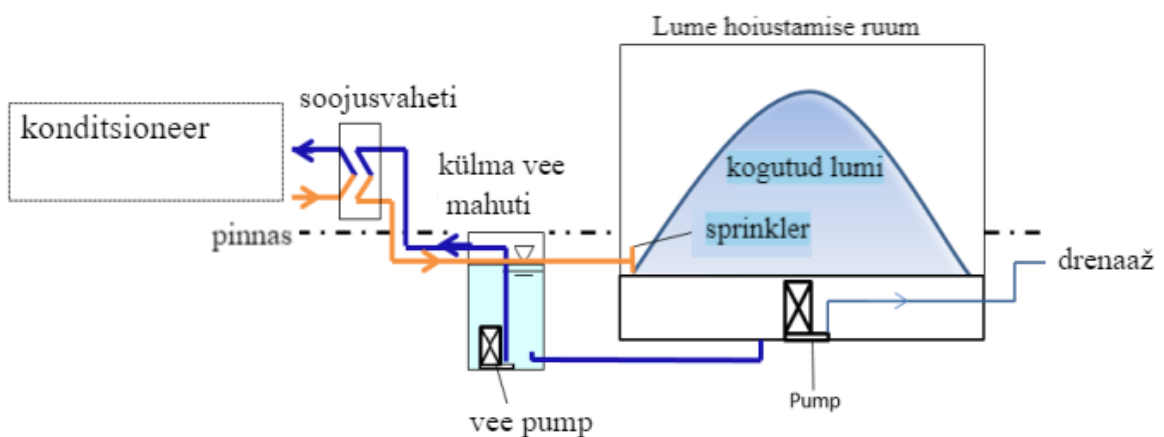
Joonis 1. Üldine plaan, kuidas lumest jahutusenergiat juhitakse. Levinud energiakandjaks on sulavesi (autori koostatud)



Joonis 2. Süsteem, kus jahutavaks agensiks on õhk, mida jahutatakse läbi lume puhumisega [3]

Kui sulavee kogumiseks kaetakse kaetend või süvend millegi veekindlaga, siis nimetatakse süsteemi "veekindlaks lume säilitamis süsteemiks" (inglise keeles *watertight snow storage system (WSS)*). Rajatud veekindel kiht hoiab ära sulavee imbumise pinnasesse ja sellega kaasneva pinnase saastumise. Sulavesi tagastatakse lumesse viisil, kus see hakkab lund "kokku pakkima" ehk suurendama lume tihedust. Mida tihedam on lumi, seda suurem on selle energiasaldus. Teiseks eeliseks on võimalus opereerida masinatega tihedama lume peal. Selliseks tiheduseks loetakse lund massiga umbes 650 kg/m^3 . [1]

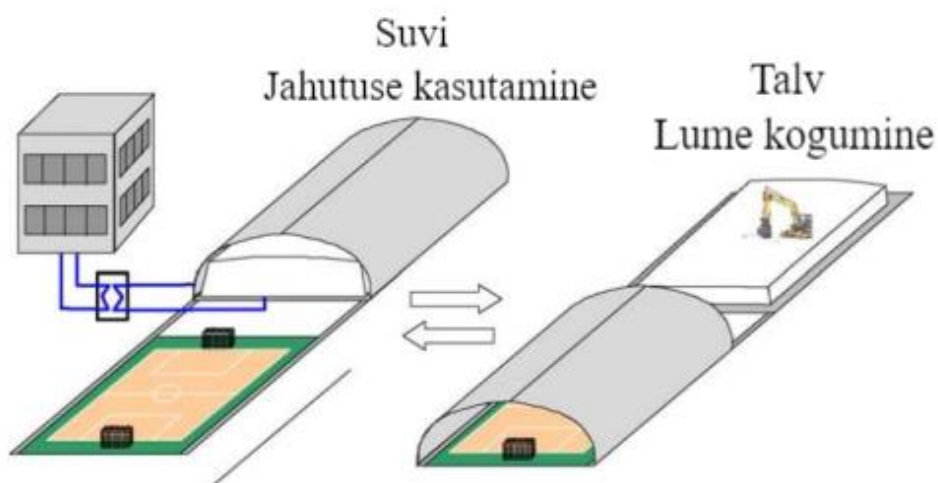
Kolmas enamlevinud meetod lund säilitada on see mehaaniliselt enne kokku pressida. Saavutatakse lume tihedus umbes $750 - 800 \text{ kg/m}^3$ ja sellise meetodi eelis, peale energiasalduse suurendamise, on ka ruumi maksimaalne ära kasutamine. Sellist meetodit kasutatakse rohkem süsteemides, kus on piiratud lume mahutatavus ja nimetatakse "suure tihedusega lumehoidlaks" (inglise keeles *high-density snow storage system (HSS)*) ja kui süsteemile lisada ka võimalus lund veega piserdada on võimalik saavutada lume tihedus kuni 920 kg/m^3 . [1]



Joonis 3. Suure tihedusega lumehoidla [2]

1.1.1 Lume säilitamine hoones

Selle alapeatüki alustuseks on toodud üks näide mobiilsest viisist, kuidas lund säilitada hoones (Joonis 4). Selline meetod võimaldab kasutada loodud hoonekonstruktsiooni suvisel ja talvisel perioodil erinevalt ning mõlemal aastaajal kasulikult. Suvisel perioodil katab konstruktsioon lund ja aitab kaasa selle säilitamisele. Talvisel perioodil siirdatakse kattekonstruktsioon mõne rajatise peale – näiteks tenniselplatsi peale ning lume säilitus alale tekib lume kogumiseks kerge ligipääs. [1]

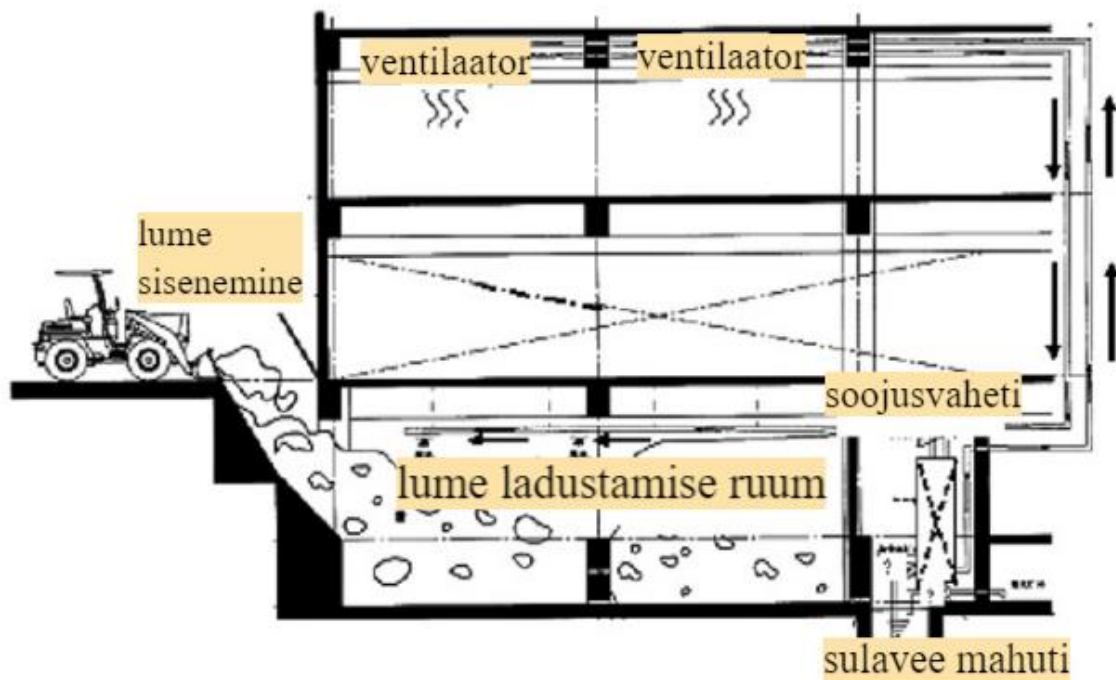


Joonis 4. Mobiilne lume säilitamise süsteem [1]

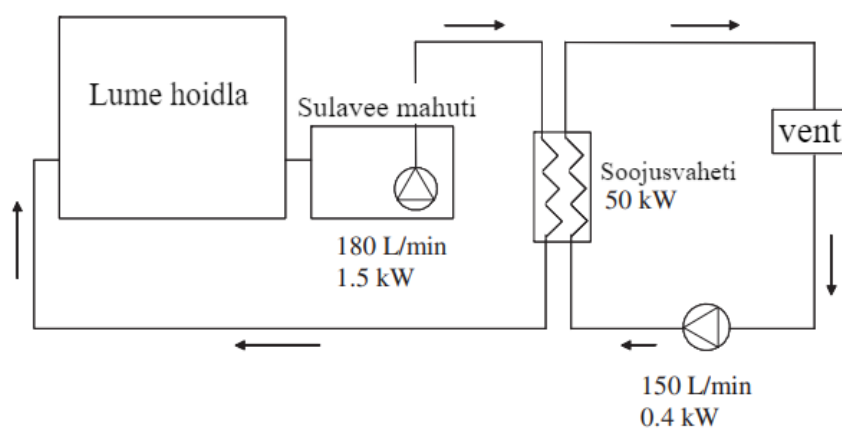
Lume säilitamiseks hoones on võimalik rajada spetsiaalseks selleks eesmärgiks hoone, koos vastava karakteristikuga, kuid on võimalik ka ära kasutada olemasolevaid hooneid või nende osi.

Jaapanis, Hokkaido linnas eraldati hoone maa-alusest parklast osa lumijahutus süsteemi ja lume ladustamise jaoks. Hoone parkla asus allpool maapinda, esimesel korrusel asus restoran ja raamatupood. Teisel korrusel olid kontoriruumid. Osa maa-alusest parklast, mis eraldati lume kogumise jaoks oli suurusega 14,24x11,78 m ning selle põrand eemaldati, et saavutada vajalik mahutatavus, milleks sai lõpuks 616,8 m³. Parkla seinad kaeti 100 mm paksuse tugeva isolatsioonimaterjaliga. Kuna ligipääs parklale oli keeruline, siis tuli lumi transportida parklasse õuest. Jahutuseks rajati toruarmatuur ning soojusvaheti (Joonis 5, Joonis 6). Lume sulavesi hakkab ringlema armatuuris energiakandjana. Torustik läbib soojusvahetit ning vesi soojeneb. Soojenenud vesi juhtakse läbi lume, mis asub parklas ning seal see jahtub taas ning suundub tagasi soojusvahetisse. Enne lumijahutussüsteemi oli hoonesse rajatud gaasi-jahtussüsteem (87,2 kW). Uut lumega jahutussüsteemi rakendati 777 m² suurusele alale ja jahutust

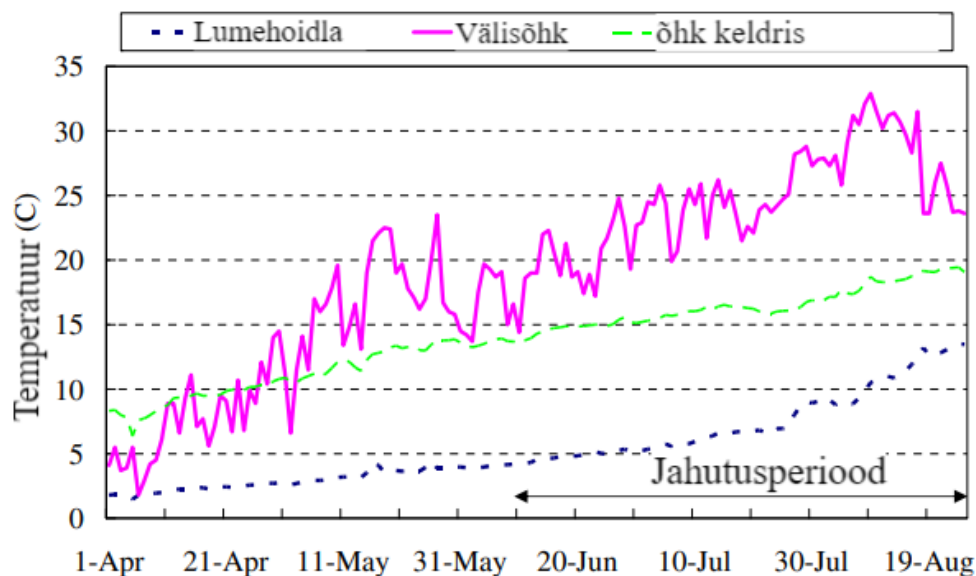
juhitakse läbi ventilatsiooni (kogu hoone peale kokku oli koos parklaga 4889 m² põrandapinda). Kasutatud lume tihedus on 550 kg/m³ ümbruses ning maksimaalselt mahutab parkla 330 tonni sellist lund, mis kolme aastase katseperioodi jooksul jõudis teisel aastal maksimaalse mahutatavuse täitumiseni ning selle lähedale ülejäänud aastatel. [4]



Joonis 5. Olemasoleva hoone parklasse rajatud lume säilitus ja jahutus süsteemi skeem (Jaapan, Hokkaido) [4]

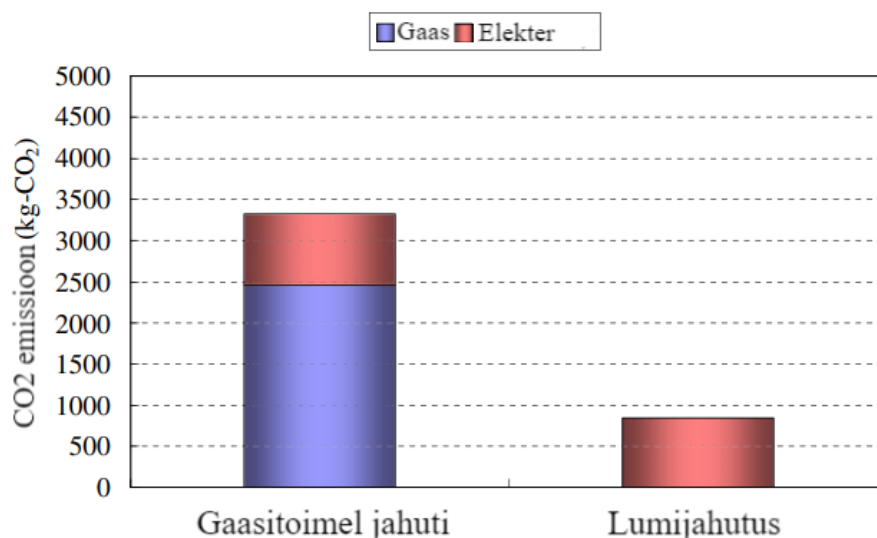


Joonis 6. Torustiku skeem olemasolevas hoones (Jaapan, Hokkaido) [4]



Joonis 7. Temperatuur lume hoiustamiskohas - parklas ning selle ümbruses (Jaapan, Hokkaido) [4]

Kolme aastase katseperioodi jooksul olid teine ja kolmas aasta kõige edukamad. Esimesel aastal olid suured soojuskadud ja peale seda hakati tegema süsteemis muudatusi. Siinkohal on energiakadudeks soojuse ligipääs lumele. Jahutusperiood oli juuli algusest augusti lõpuni, kuid lumi sulas reservuaarist tavaliselt umbes 25. augustiks. Keskmiselt suudeti ära kasutada ligi 50% lumes olevast jahutusenergiast, ülejäänud 50% kadus soojuskadude näol läbi konstruktsiooni. Sellest tulenevalt olid katse tegijad ka märkinud, et efektiivsemaks kasutuseks tuleks isolatsioonikihte teha paksemaks. Siiski kõige edukamal aastal saadi lumest 65,2 GJ jahutusenergiat (autori märkus, et $1 \text{ GJ} = 277,78 \text{ kWh}$, seega $65,2 \text{ GJ} = 18,11 \text{ MWh}$). Jahutusenergia arvutati korrutades omavahel külma vee erisoojus, vee tihedus, ringleva vee voolukiirus ja temperatuuride erinevus soojusvahetis. Teise aasta keskmine EER (inglise keelest *Energy Efficiency Ratio*) oli 14,8 ja kolmanda aasta EER 11,9. Lumijahutus kasutas ligi 6 korda vähem primaarenergiat, võrreldes varem kasutusel olnud gaasi pealt toimiva jahtussüsteemiga ning seetõttu ka eraldas vähem CO₂ heitmeid (Joonis 8). [4]



Joonis 8. CO2 heite erinevus võrreldes omavahel varem kasutatud süsteemi ja lumijahutust (Jaapan, Hokkaido) [4]

1.1.2 Lume säilitamine allpool pinnast

Lume säilitamisest maa all on väga vähe infot ning olemasolev info kinnitab ainult seda, et selliseid süsteeme on väga mõistlik rajada, kuid reaalsete katsetuste kohta puudub infot. Teoreetilised arvutused näitavad, et kui näiteks Stockholmis rajada maa-alla mahuti suurusega 25000-150000 m³, milles hakkab olema lumi tihedusega 650 kg/m³ ning loomulik sulamiskadu on u 3% aastas, siis selline süsteem tasub ennast ära vähem kui aastaga. [3]

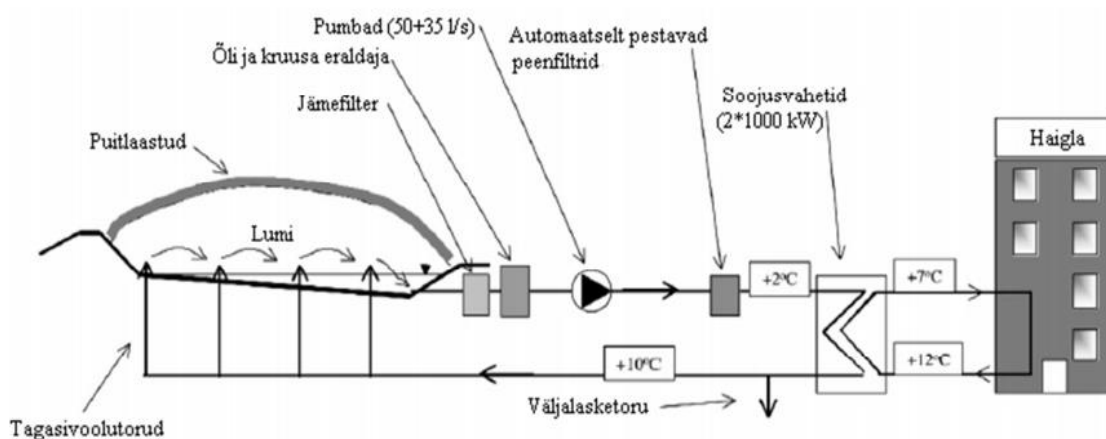
Esiteks poleks sellisele süsteemile vaja eraldi soojustust ning teiseks on see võimalik rajada kohe paika, kus on suur jahutuskooormus (Joonis 9). [20]



Joonis 9. Maa alune lume säilitamise võimalus [20]

1.1.3 Lume säilitamine süvendis

Arvatavasti üks esimesi süvendisse rajatud süsteeme, kus lund säilitatakse ja sellest jahutust saadakse asub Rootsis, Sundsvalli haigla territooriumil. Sulavesi tsirkuleerib soojusvaheti ja lumehoidla vahel ning isolatsioonimaterjaliks kasutatakse hakkepuitu. Lumehoidla on planeeritud mahutavusega 60 000 m³ ning haigla põrandapind 190 000 m². Süvend rajati mõõtmetega 130x64x2 meetrit, mille põhjale on antud kerge umbes 1% kalle. Süvendi põhjas on veekindel asfalt, mille all on 100 mm soojustuskiht ja see on rajatud omakorda killustikalusele. Jahutus saadakse lume sulaveest, mis juhitakse soojusvahetisse. Soojusvahetis soojenenud vesi juhitakse tagasi lume hoidlasse ning see sulatab omakorda uut lund, mida soojusvahetisse juhtida. Peale filtreid on kaks pumpa, mis juhivad vee soojusvahetitesse (1000+2000 kW) (Joonis 10). Hoones on lisaks lumijahutusele rajatud ka tavaline jahuti ja vabajahutus, mis töötab, kui välistemperatuur on 6 °C või vähem. [3]



Joonis 10. Sundsvalli haigla lume hoiustamis- ja jahutussüsteem [3]

Torustikus voolava jahutusvee temperatuur on juuni alguseks umbes 3 °C ja püsib sellisena kuni lumevarud ei muutu liiga väikeseks. Lumevarude vähenemisest ja suurtest vihmadest võib augustis olla jahutusvee temperatuur isegi +15 °C. Süsteemi parandati väga palju just esimese aasta kasutamise käigus. Näiteks juhtudel, kui sulavee temperatuur tõusiski liiga kõrgeks, rajati eraldi tsirkulatsioon pumbahoone ja sulavee vahele, et vesi torustikus saavutaks madalama temperatuuri. Muuta tuli ka torustiku asetust, et lume all ei tekiks kohtasid, kus vesi sulatab mingit osa lund eriti kiirelt, sest see tekitab vajumisi ja vajumised omakorda puiduhakke ühtlase jaotumise lõhkumist. Kui puiduhake ei ole ühtlast kihti moodustanud siis lumi hakkab loomulikult teel kiiremini sulama. Vesi soojeneb soojusvahetites vahemikus 1-8 °C. Avatud mahutisse ettenähtut 60 000 m³ lund esimeste aastatega kokku ei kogunenud. Veelgi enam, sõltuvalt aastast moodustas kogutud lumest kuni 52% tehislumi (2005. aasta tehislume osakaal 70%). Tehislume tootmine toob kaasa suurenenud elektri- ja

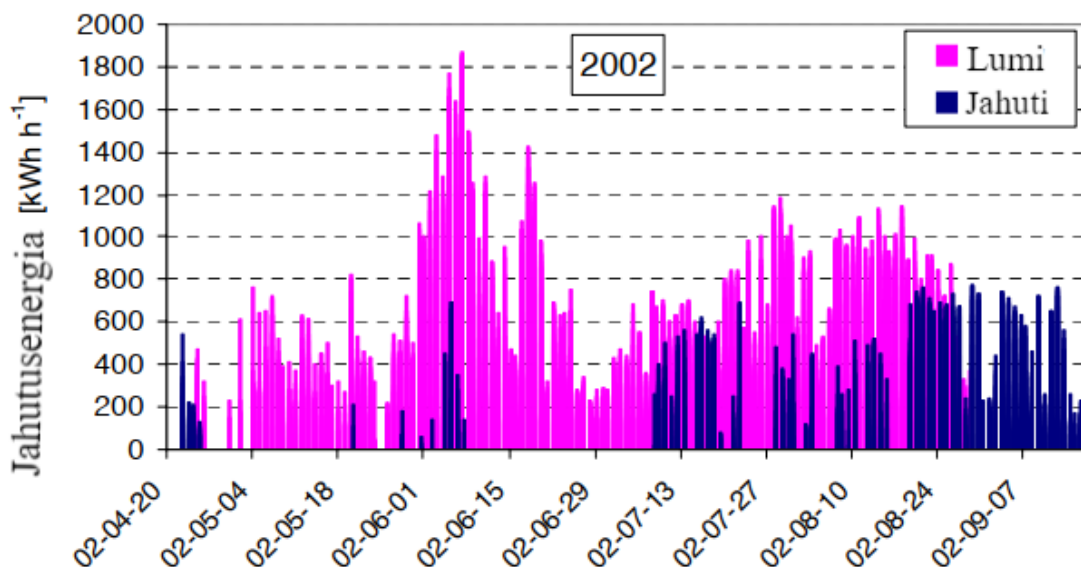
veekulu. Lõplik disain ja sellest tulenev maksumus ning lisakulud on seotud kõik olemasoleva olukorraga ehk uue jahutussüsteemi rajamise vajaduse ja maa ala olemasoluga, et rajada lume säilitamiseks süvend. Enne olukorra analüüsimist puudub kindel vastus, et milline lumijahutussüsteemi disain on parim. Rootsi lumijahutussüsteemi näitel on tasuvus võimalik saavutada ühe kuni kuue aastaga. [3] Sundsvalli haigla on heaks näiteks lumijahutussüsteemi rajamisel, kuna esimese viie aasta jooksul tehti mitmeid parandusi ja tuli välja hulk ettenägematuid probleeme, mis vajasisid lahendamist. Üheks ootamatuks probleemiks oli soojusvahetisse tekkinud vetikad, mis pärssisid soojusvahetust ja see omakorda tingis soojusvaheti puhastuse ja edaspidise hoolduse. Samuti eespool väljatoodud lume ebaühtlase sulamisega seotud probleemid, mida tuli lahendada. [3]

Sundsvalli jaam suutis saavutada esimese kuue opereerimise aasta jooksul maksimaalse võimsuse 1,873 kW ja tagas jahutusenergiat 1345,3 MWh. Lumijahutus kattis pea alati vähemalt 84 – 92% jahutusvajadusest (välja arvatud 2001. aasta, Tabel 1). [21]

Tabel 1. Sundsvalli jaama esimese 6 aasta statistika. [21]

Aasta	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Lume maht, m³	18800	27400	40700	36800	35400	39900
Millest tehislund, %	49	59	57	38	52	70
Jahutusperiood	6/6 – 29/8	26/3 – 22/8	25/4 – 29/8	6/5 – 17/8	28/4 – 3/9	22/4 – 19/9
Jahutusenergia, MWh	655,5	1159,1	1345,3	1068,4	870,5	941,9
Lume osakaal jahutuses, %	93	77	84	84	92	92
Maksimaalne lumijahutusvõimsus, kW	1366	1148	1873	1508	1594	1610
soojustegur COP lumest (Coefficient of Performance)	4,3	11,2	16	6,2	5,7	Info puudub
COP lumi / COP elektriline jahutus	2	3,3	6,6	2,6	2,4	Info puudub

Joonis 11 on näha, et 2002. aastal, mil lumijahutus saavutas oma suurima võimsuse, tuli siiski rakendada nõudmise tagamiseks ka tavapärast jahutussüsteemi. Augusti lõpus muutus tavapärane jahuti juba ainsaks jahutust tagavaks süsteemiks.

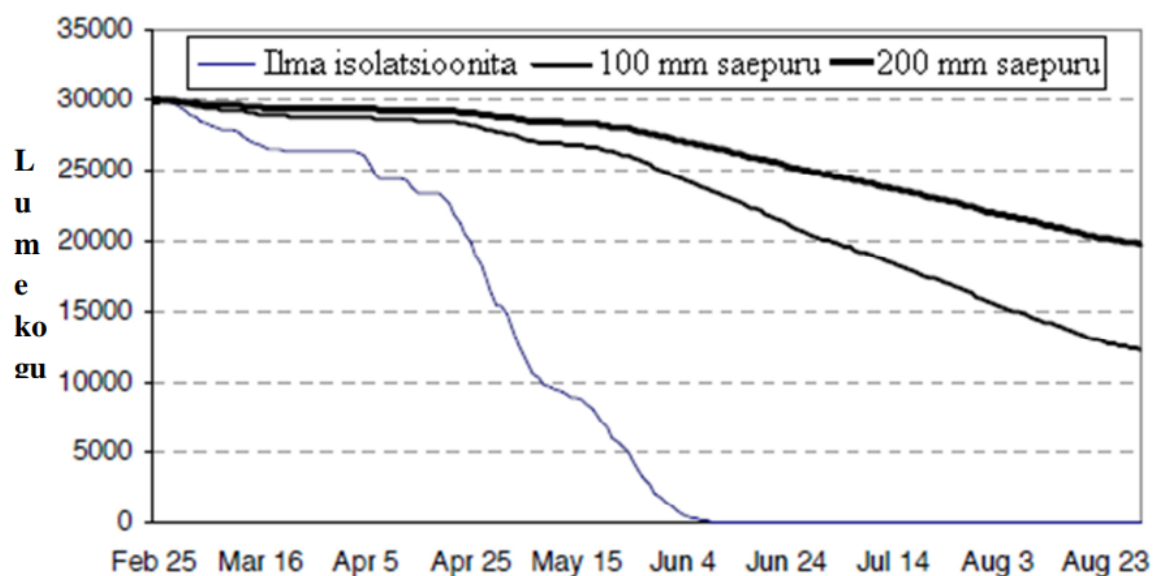


Joonis 11. Sundsvalli haigla jahutusüsteemide töötamine aastal 2002 [3]

1.2 Erinevate jahutsüsteemide isolatsioonimaterjalid ning soojus- ja külmakaod

Lume säilitamisel mängib väga olulist rolli, kuidas kaitsta lund loomuliku sulamise eest. Väga levinud on lumekuhja katmine puiduhakke, saepuru või mõne muu loodusliku jäägiga nagu roog või multš. Loodusliku isolatsioonimaterjali tuleb iga paari aasta tagant välja vahetada, mis tekitab lisakulusid. Eeliseks aga looduslike isolatsioonimaterjalide hilisem kasutamine (põletamine) energia saamiseks. Ilma lund isoleerimata välistest teguritest nagu päikesekiirgus ja välis temperatuur sulaks see juba põhjamaise jahutusperioodi alguses. Sulamist erinevate puiduhakke kihtidega on näidatud Joonis 12. Sulamisgraafiku aluseks on simulatsioon, kus on 30 000 m³ suurune lumehunnik on kaetud 200 mm paksuse saepurukihiga ja sellest sulab 9149 m³ lund pinnapoolt sisenenud soojuse tagajärjel. Süvendi põhjas tekkinud sulamise tagajärjel kadus 1421 m³ lund ning vihmavee tõttu 390 m³. Järeldati, et põhiosa lumest tuleks hoiustada ikkagi all-pool maapinda ehk süvendis ning võimalikult vähem pealpool pinnast, kus välisolustikud seda tugevasti mõjutavad. Eelpool kirjeldatud simulatsioonis oli kuiva saepuru soojuseriitvuseks 0,1 W/mK. [3]

Olgu siinkohal mainitud, et mida suurem on soojuserijuhtivus tegur, seda paremini kannab materjal sooja edasi. Näiteks betooni soojustegur on 2 W/mK ja kivivilla vastav parameeter jääb tavaliselt 0.04 ja 0.03 W/mK vahele.



Joonis 12. Lume sulamiskiirus ilma isolatsioonita ning 100 ja 200 mm paksuse saepuru kihiga kaetult [3]

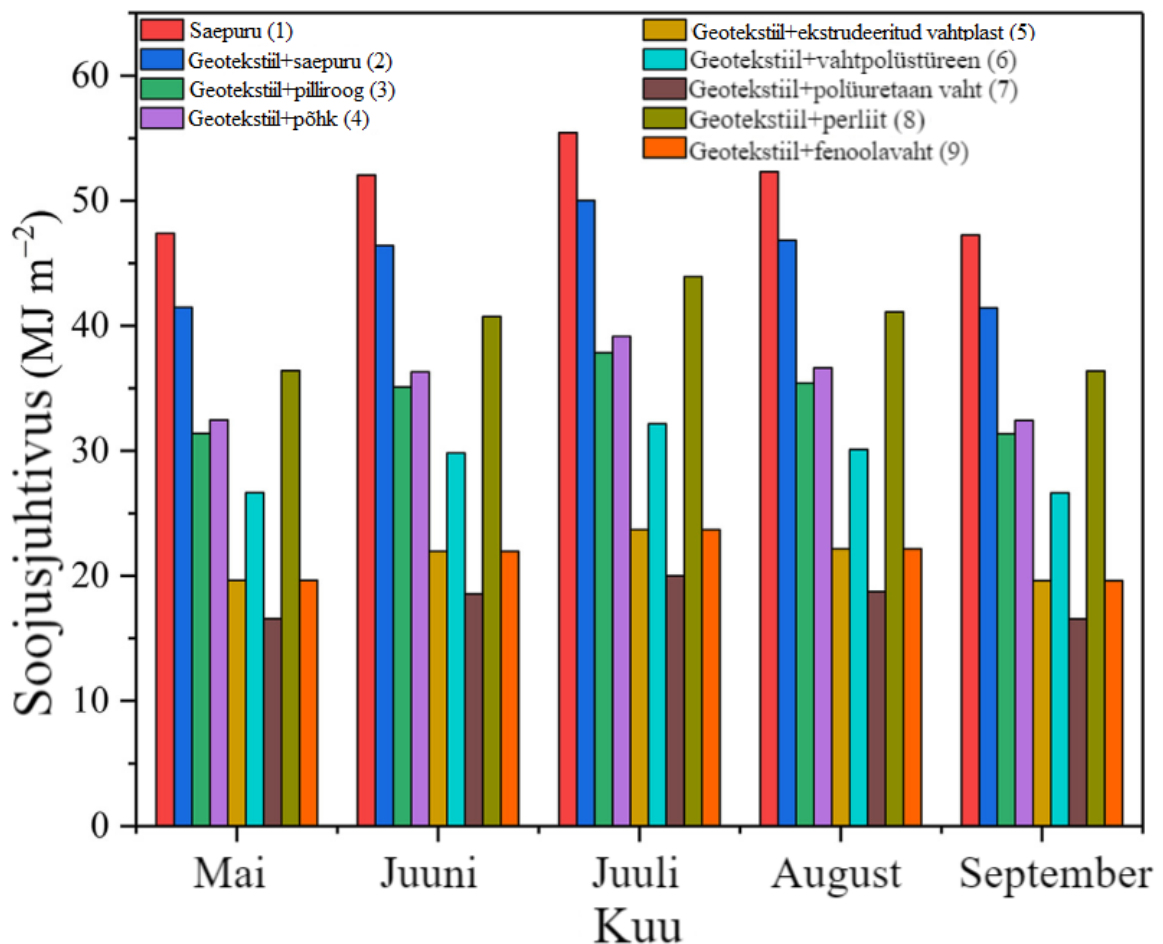
Saepuru soojuserijuhtivust käistletakse mõndades arvutustes ka 0,07 W/mK. Võimalik on rakendada ka mitte-looduslike isolatsioonimaterjale. Simulatsioone ja arvutusi on teostatud lume säilitamise eesmärgil ka petro-keemiliste materjalidega nagu styrofoam, polümeeriline vaht, geotekstiil või nende kombinatsioonid.

Selleks, et erinevaid isolatsioonimaterjale võrrelda on vaja teada nende võimet soojust juhtida (λ - lambda arvu). Mõndade lumijahutuse tarbeks simuleeritud arvutustes kasutatud materjalide soojuserijuhtimise väärtused on Tabel 2.

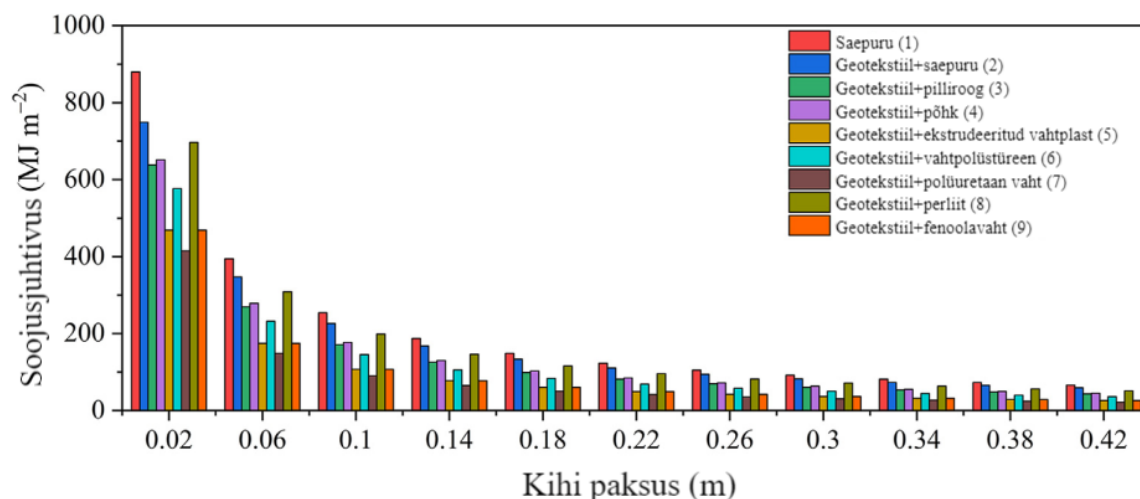
Tabel 2. Materjalide soojusläbivus [5]

Materjal	Tihedus, kg/m ³	Soojuserijuhtivus, W/mK
Saepuru	245	0.0700
Pilliroog	160	0.0505
Põhk	100	0.0525
Geotekstiilid	122	0.0480
Ekstrudeeritud polüstüreen	35	0.0300
Vahtpolüstüreen	30	0.0420
Polüuretaan vaht	40	0.0250
Perliit	175	0.0600
Fenoolvaht	60	0.0300

Joonis 13 on võrreldud erinevate lume isoleerimiseks sobilike materjalide soojusjuhtivust jahutusperioodi jooksul. On selgelt näha, et fabritseeritud materjalid, millel on ka väikesem soojuseri juhtivus nagu ekstrudeeritud polüstüreen (5), polüuretaan vaht (7) ja fenoolavaht (9) koos geotekstiiliga on tunduvalt väikesema soojusjuhtivusega, millega kaasnevad väiksemad energiakaod. Kui materjalide paksust kasvatada, siis soojusjuhtivus väheneb 0,02 meetrist alates kuni 0,18 meetrini lausa drastiliselt (Joonis 14). Sealt edasi soojusjuhtivus väheneb endiselt, kuid nüüd enam mitte nii hüppeliselt vaid on saavutatud üsna stabiilne soojusläbivus sõltumata isolatsioonikihi pakusest. Näiteks saepuru (1) soojusläbivus väheneb endiselt üsna palju, kui kihi paksust kasvatada, kuid näiteks polüuretaan vahu (7) soojusläbivus enam nii kiiresti ei vähene. 0,14 meetrit polüuretaan vahtu on sama soojusläbivusega, mis 0,42 meetrit saepuru. Joonis 13 ja Joonis 14 olevatest materjalidest peeti majanduslikult kõige mõistlikumaks geotekstiil+ekstrudeeritud polüstüreeni (5). Kombinatsioon geotekstiil+perliit (8) oli majanduslikult kõige ebaefektiivsem. [5]



Joonis 13. Isolatsioonimaterjalide soojusjuhtivus jahutusperioodil (Peking) [5]



Joonis 14. Soojuslähivuse muutus sõltuvalt isolatsioonimaterjali paksusest [5]

1.2.1 Ideaalseim isolatsioonimaterjal

Selle uurimustöö jaoks loetud uuringutes kasutatakse kõige rohkem isolatsioonimaterjaliks saepuru. Saepuru kiht suudab imiteerida sulava lumehunniku kuju üsna hästi ja püsib ka selle peal paremin kui näiteks plaatisolatsioonimaterjalid. Plaatisolatsioonimaterjalid (näiteks polüstüreenid ja uretaanvahud) toimivad saepurust efektiivsemalt, kuna kaaluvad vähem ning väiksema kihiga on võimalik saavutada suurem soojustakistus lume ja välisõhu vahel. Samuti on nende tekstuurstingituna ka kaitse sademete eest. Suureks miinuseks on plaatide paigaldamine lumehunnikule. Ühtlane jaotamine ja sulamisest tingitud kuju muutus on keerukas ja vajab eeldatavasti palju kohendamist kogu aasta vältel. Saepuru on võimalik pärast isolaatorina kasutamist taaskasutada energia tootmiseks. Petro-keemilised materjalid oleks ühekordne investeering kuid saepuru (ja muud naturaalsed materjalid) tuleb välja vahetada peale paari aasta pikkust välja.

Hakkepuidu hind 2023. aasta esimeses kvartalis jääb vahemiku 12 - 16 eur/m³ (info erinevate hakkepuiduga tegelevate ettevõtete kodulehtedelt [22], [23]). Kui arvestada Sundsvalli haigla näidet, et kaevatud süvend oli 130x64x2 meetrit ja selle kogumahutavus koos maapealse osaga peaks ulatuma 60 000 m³-ni, siis on maapealse kaetava osa kogupindalaks on 10 260 m² ja kui katta see 0,2 m paksuse hakkepuidu kihiga on haket vaja 2052 m³.

Kuna hakke kõdunemisest tekib isolatsioonimaterjali järjestikune ebaefektiivsus on vaja iga 2-4 aasta tagant hakkepuuit välja vahetada, sellest tekivad omakorda kulud. Sundsvalli tehnilise süsteemi elueaks on 40 aastat. Iga aasta kulub 270 töötundi isolatsioonimaterjali käitlemisele. [3]

Tabel 3 on näha puiduhakke uuendamisest ja käitlemisest tekkivad kulud. Peale esimest katmist on hakke väljavahetamise välbaks võetud 3x 10 aasta jooksul. Samuti iga aasta on 270 töötundi, mille hinnaks määrame 30 eur/h, mis sisaldab töötaja töötasu ning

vajadusel masinatega seotud kulused. Eesti keskmine brutopalk 2023. aasta III kvartalis oli 1812 eur/kuus, mis teeb töötunni hinnaks 11,326 eurot ning tööandja kuluks 15,15 eur/tunnis [24]. Hakke hinnaks on võetud eelpool kirjutatu keskmine 14 eur/m³. 40 aastase perioodi puhul ei ole arvestatud inflatsiooni ja teiste hinnatõusu puudutavate aspektidega, kuid eeldusel, et ka energiahind tõuseb, siis hakke ja energiahinna suhe võiks sarnaseks jääda. Tuginedes eelpool olevale infole on parem kasutada paksemat isolatsiooni kihti. Süsteemi elueapuhul tuleb seega arvestada ligi pooleteist miljoni suuruse kuluga, mis on ühes aastas 36 828 eurot.

Tabel 3. Puiduhakkega isoleerimisel kaasnevad kulutused 40. aastase perioodi vältel (autori koostatud)

	kulu	ühik	hind, eur	Esimese katmise kulu, eur	Kulutuse d peale 10 aastat, eur	Kulutuse d peale 20 aastat, eur	Kulutuse d peale 30 aastat, eur	Kulutuse d peale 40 aastat, eur
0.2 m haket	2052	m ³	14	28728	86184	172368	258552	1149120
0.1 m haket	1026	m ³	14	14364	43092	86184	129276	574560
Hooldus	270	h	30	8100	81000	162000	243000	324000
0.2 m haket + hooldus kokku				36828	167184	334368	501552	1473120
0.1 m haket + hooldus kokku				22464	124092	248184	372276	898560

Ideaalne isolatsiooni materjal on selline, mis ei lase vett läbi, on kerge paigaldada ja võtab sulava lumehunniku kuju. See võiks olla nagu "tekk".

Materjali soojustakistus sõltub isolatsioonimaterjali kihi paksuse suhtest soojuseri juhtivuse väärtuse λ (lambda) (1).

Materjali soojusjuhtivus on soojustakistuse pöördväärtus (2).

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{m^2 K}{W}, \quad (1)$$

kus R – materjali soojustakistus;

d - materjalikihi paksus;

λ – materjali soojuseri juhtivus.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{W}{m^2 K}, \quad (2)$$

kus U – materjali soojusjuhtivus.

Kasutades valemeid (1) ja (2) leiame 0,2 m hakkepuidu kihi soojusjuhtivuse, kuid soojuserijuhtivuse väärtus on 0,07 W/mK.

$$R = \frac{0,2}{0,07} = 2,857 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2,857} = 0,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3)$$

Klaasvilla soojuserijuhtivus on 0,039 W/mK. Tuginedes valemitele (1) ja (2) on vaja pehmet kivivilla 0,11 m, et saavutada 0,2 m puiduhakke kihi soojusjuhtivus.

Rakendades puiduhakkega võrdset kihipaksust on soojusjuhtivus 0,2 m villa puhul 0,195 W/mK.

Kui me prooviksime teha klaasvillast nn "tekki", siis peame liimima villa paanid omavahel kokku ning katma mõlemad küljed millegi veekindalga, näiteks kilega. Kile peab UV kindel olema. Teoreetiliselt võiks villa alumise (ehk lumepoolse) kihi katta ka millegi muu, kui kilega, näiteks geotekstiili, kuid lumel libiseb kile kindlasti kõige paremini. See tekitab küll uue probleemi, mis on vallilt ära libisemine, kuid selle lahenduse väljamõtlemine ei ole selle uurimustöö eesmärk.

Katta on vaja 60 000 m³ lund, mille kogupidnala oli 10 260 m². Tabel 4 on toodud villa "teki" valmistamise materjalide hind ja kogumaksumus. Olgu mainitud, et hinnad on leitud internetist veebipoodidest, sisaldavad käibemaksu ning ei pruugi olla kõige odavamad võimalikest saadaval olevatest variantidest. Liimimistöö maksumus on eeldatav. Hooldus eluea jooksul (40 aastat) sisaldab põhiliselt katki läinud kohtadele uue kile liimimist. Eritehnoloogia eeldab, et tuleb liimida ka "tekile" nõör, millest on võimalik seda vedada või liigutada. Kile tugevusest sõltub, mitu erinevat "tekki" on vaja valmistada, et vall ära katta.

Tabel 4 selgub, et ühekordne investeering isolatsiooni valmistamiseks on 170 822 eurot, mis on puiduhakke puhul sarnases suurusjärgus 10-15 aasta kulutusega.

Sellise "tekk" stiilis isolatsiooni eelisteks on:

- Ühekordne investeering;
- Jäljendab koguaeg lumevalli kuju;
- Katab ühtlaselt (ei ole paksemaid ega õhemaid kohti);
- Võrreldes puiduhakkega väiksem soojusjuhtivus, millest tulenevalt sulab vähem lund välistemperatuuri tagajärjel;
- Veekindel, milles tulenevalt vihmavesi ei sulata lund;
- Kerge hooldada.

Puudusteks:

- Vajab lume kogumise hooajal hoiustamiseks kohta;

- Lume katmine võib osutada keeruliseks;
- Vajab nõlvadel eraldi toetamist;
- Pole varem proovitud ehk puudub info toimivusest;
- Kui materjal on kahjustunud ning vajab väljavahetamist, siis tuleb see utiliseerida. Puiduhaket on võimalik suurel määral taaskasutada, kui see enam isolatsiooniks ei sobi.

Tabel 4. Villamaterjalist soojusisolatsioon „tekk“ maksumus (autori koostatud)

Materjal	Hind, EUR	Ühik	„teki“ hind
Klaasvill 0.2 m	7	m ²	71820
Kile (2 kihti)	1.35x2	m ²	27702
Liim (2 kihti)	2x2	m ²	41040
Töö	1	m ²	10260
Hooldus eluea jooksul	5000	eur	5000
Eritehnoloogia	15000	tk	15000
KOKKU	14.85	m ²	170822 EUR

Klaasvill: <https://www.ehomer.ee/et/urrl39.html>

Kile: <https://www.bauhof.ee/et/p/728133/aurutokkekile-fortex-vcl-uv-3x45m>

Liim: <https://www.ehomer.ee/et/mineraalvilla-liimisegu-av230.html>

Käitlemiskuludeks võiks arvata 100 h aastas (100h x 30EUR = 3000 EUR/aastas)

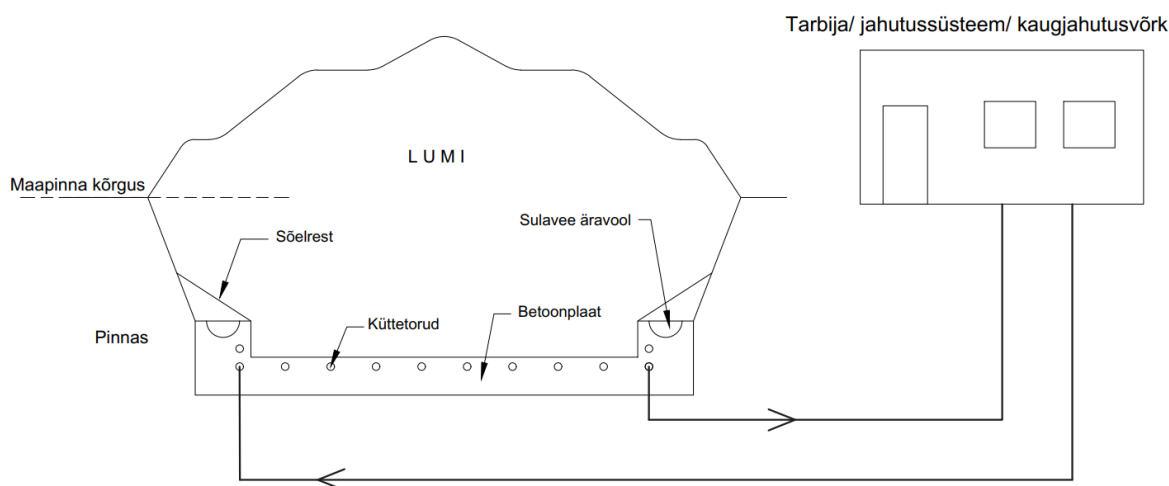
Sellise isolatsioonilahenduse väljatöötamine võimaldaks suurt kokkuhoidu rahaliselt, kuid eelkõige vähendaks lumekadu. Tuginedes Joonis 12 ja sellele järgnenud infole, võimaldaks parem isolatsioon vähendada lumekadu 30%-lt 5-10% juurde. Lumekao vähenemine tõstab lumijahutuse efektiivsust ja hooajalist kestvust ning lühendab tasuvusperioodi.

2. UUE LUMIJAHUTUSSÜSTEEMI KONTSEPTSIOONI VÄLJA PAKKUMINE

Sundsvalli haigla lumijahutus toimib soojusvahetist tagastatava vee toimel. Tagastatav soojenenud vesi juhitakse lumesse ja see sulatab lund ning tekib tagastatavast veest jahedam sulavesi [3]. Siiski sellise süsteemi puhul leiab käesoleva uurimustöö autor aspekte, mida uuendada.

Sundsvalli haigla näitel on soojusvahetisse siseneva vee temperatuur keskmiselt +4 ja +2 °C vahel. Vee temperatuur tõusis soojusvahetis 1-8 °C [3].

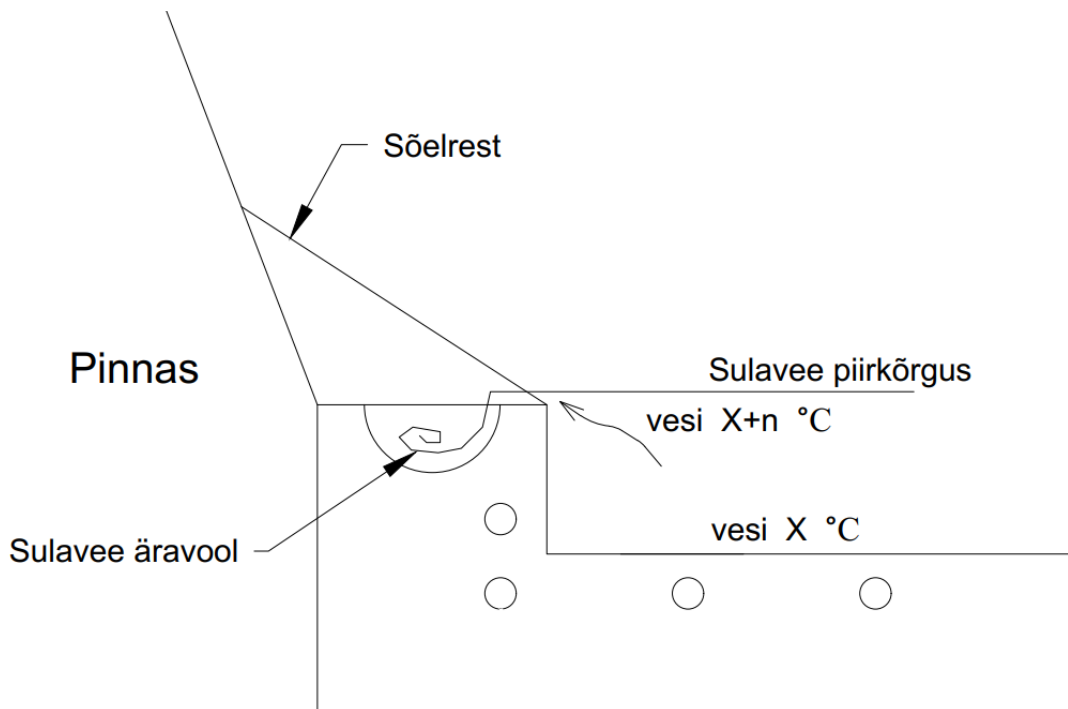
Kas oleks kasulik hoopis soojusvaheti pind viia kokku 0 °C lumepinnaga, selleks, et jahutus oleks efektiivsem ning lumekadu oleks sarnases suurusjärgus varem kasutatud süsteemidega? Üks selline kontseptsioon on autori poolt väljapakutud Joonis 15, kus lume hoiustamiseks rajatud süvise põhjas on betoonplaat, mille sees jooksevad küttestorud. Lumi jahutab betooni ja betoon jahutab selles olevaid küttestorusid, mis viivad tarbijale jahutusenergiat.



Joonis 15. Lume hoiustamiseks mõeldud süvise põhja rajatud on betoonplaat, mille sisse on paigaldatud küttestorud (autori koostatud)

Kui betoon soojeneb ja lumi hakkab sulama tekib süvendi põhja sulavesi, mida ei juhitata kohe minema, vaid oma madalatemperatuurilisuse tõttu toimib see koos lumega jahutajatena. Pidevalt veele pealesulav lumi hoiab süvendi põhjas oleva vee külmana ning kui veekiht tõuseb piisavalt kõrgeks on see juhitud süvendi servades olevasse äravoolutorusse, mis on ühendatud reoveekanalisatsiooniga. Talvel koristatav lumi sisaldab erinevaid kemikaale, mille sisaldus jääb ka sulanud lumesse alles ning seetõttu oleks vaja vesi töödelda ja puhastada reoveejaamas. Sõltuvalt lumesulamiskiirusest võib süvendi põhja sulav vesi olla ka erineva temperatuuriga ning eeldusel, et soojem

vesi tõuseb pealepoole ning külmem püsib madalamal juhatakse süvendist minema kõigepealt soojem vesi (Joonis 16).



Joonis 16. Süvendi äravoolu sõlm (autori koostatud)

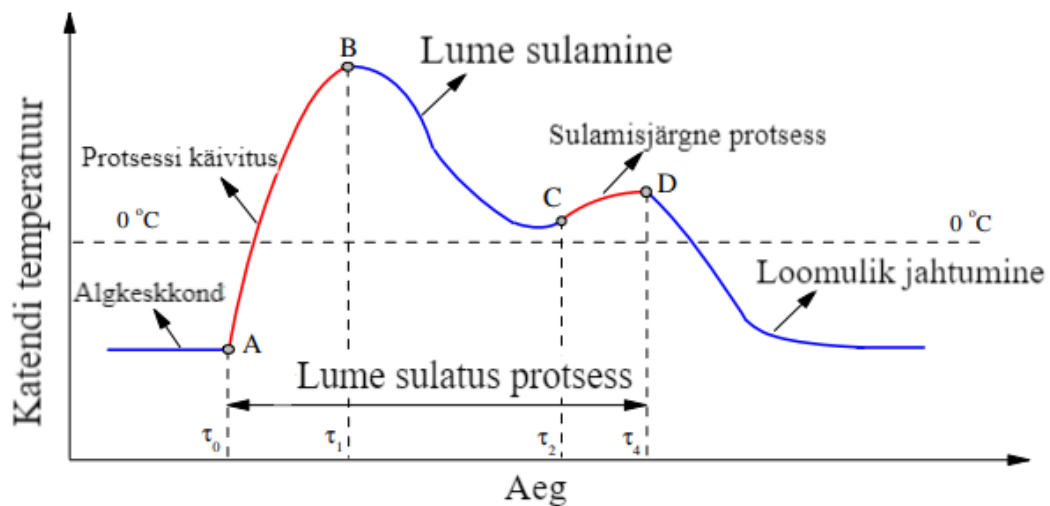
Võrreldavaks objektiks on endiselt Sundsvalli haigla lumemahuti, mille suurus on 130x64 meetrit (8320 m²). Paigalduse lihtsustamiseks on tarbekas paigaldada PVC torud betoonplaati. Paigaldus peaks olema sarnane põrandakütte armatuuri paigaldusega. Stsenariume PVC torustiku paigaldamiseks on erinevaid – mitu sooja vee sisendit, sooja ja külmemä veega torude jaotus ja erinevad võimalused nende paigutamiseks betoonplaadis.

2.1 Süsteemi toimimine

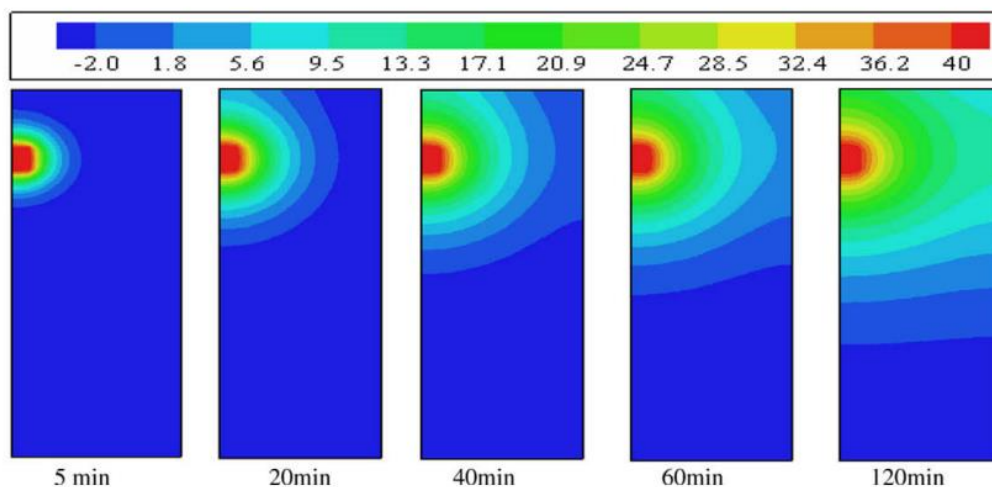
Eesti kaugjahutussüsteem on planeeritud pealevoolu/tagastava vee temperatuuriga 6/16 °C [8]. Lume temperatuur on 0 °C ja sulamissoojus 334 kJ/kg [25].

Betoonplaat on lume kogumise eelsesel perioodil ilma isolatsiooniga ja lumeta, mistõttu jaheneb see lume kogumise ajaks. Koos jahedate temperatuuridega ja lõpuks ka lumest tingitud temperatuurile muutub betoonplaat täies mahus kehaks, mis on salvestanud jahedat. Seega, esimene kord, kui jahutussüsteemi võrgus olev energiakandja (vesi) suunatakse betoonplaadi toruarmatuuri hakkab kõigepealt vedelikku jahutama betoonplaat. Peale betoonplaadi ühtlast soojenemist hakkab kogu energia kanduma

betonplaadist lumesse, ja see hakkab lund sulatama ning süvendipõhjas olevat ja juurdetekkivat sulavett soojendama. Katsetuste ja uurimustööde käigus on kuuma vett sisaldavaid torusid paigaldatud asfaldisse, kuid mitte eesmärgiga nendes voolavat vett jahutada, vaid sulatada teekatte peal olevat lund ja jääd. Joonis 17 kujutab näidet lume sulatamisest tee pealt, kui torudes voolab umbes 40 °C vesi [26]. Sama graafik ilmestab ka lumijahutuse toimimist, kui soojusvahetus pinnaks on süvendi põhjas olev betoonplaat. Torudesse suunatakse sooja vett alates $\tau_0 - \tau_4$. Seega protsess käivitatakse punktis A ning katendi temperatuur hakkab tõusma, kuni saavutab vajaliku temperatuuri, et lumi hakkaks sulama (punkt B). Lume sulamise käigus (vahemik B – C) on näha, et katendi temperatuur langeb, kuna energia kulub nüüd lume sulatamiseks. Punktis C on lumi sulanud ning torudes olev vesi soojendab veidi veel katendit. Seejärel ei pea enam torudes olevat vett soojendama ning punkt D (τ_4) tähistab ka lume sulatusprotsessi lõppu ning katend jahtub väliskeskonna temperatuurile.



Joonis 17. Graafik lume sulamise kohta, kui soojendus asub lume all olevad katendis [26]



Joonis 18. Soojuse kandumine betoonplaadis [26]

Küsimuse tekitab aga, et kas torud panna betoonplaadi ülemisse kihti või alumisse ja kas betoonplaat isoleerida altpoolt pinnasest või mitte. Joonis 18 on näha, et 40 °C plasttorudes ringlev vesi soojendab ühtlaselt enda ümber betoonkeha [26]. Pealmisele pinnale lähedal oleva toru tõttu jõuab soojus kiiresti lumeni. Toru sängitamine betoonkeha ülemisse osasse võiks olla õigustatud kiire energiavahetuse eesmärgil ning sellisel juhul on ka betooni soojustakistus väiksem torude ja lume vahel. Kui toru sängitada betoonkeha alusmisse osasse, kaugemale lumest, siis läheb kauem aega, enne kui lumi sulama hakkab. Betoonplaat soojeneb lõpuks täielikult, olenemata millisesse betoonkeha kihti torud panna. Kui jätta betoonkeha isoleerimata allpool olevast pinnasest, siis soojus kandub peale lume ka pinnasesse. Seda muidugi juhul, kui pinnase temperatuur on madalam, kui jahutusüsteemist tagastatav vesi. Lisaks hakkab pinnas soojust salvestama. Kaugjahutusüsteemi puhul võib oletada, et tagastatav vesi on (eeldatavasti) alati 16 °C. Väiksemate jahutusüsteemide puhul nagu Sundsvalli haigla Rootsisis võib tagastatava vee temperatuur olla tunduvalt madalam – väljastatavast veest ainult 1 °C kõrgem. Sellest tulenevalt võib pikalt ühtlaselt soojenenud pinnas pärssida jahutust, kui jahutusvajadus peaks järsult langema hoides betoonplaati altpoolt soojas. Siiski võiks sellest tulenevalt arendada hoopis ideed, et kuna betoonplaadi rajamiseks tuleb luua killustik- ja liivaalus, siis võiksid tagastatava vee torud minna kõigepealt läbi rajatud aluspinnas, mis hakkab sooja salvestama (liiva erisoojus 830 J/kg°C) ning seejärel järelejäänud soojus läheb betoonplaati jahutamisele ning kahe kihi vahel on isoatsioon, mistõttu ei sega soojendamise ja jahutuse teineteist. Salvestatakse nii tagastatav soojus, kui ka sulatatakse lumi, millest saab hoonetesse jahutuse. See võiks olla väljapakutud kontseptsiooni edasiarendus, kus on mõlemad - nii kütte, kui jahutuse võimalus ning rajatis on töös aastaringiselt. Hetkel uurime ainult lumega jahutamise potentsiaali. Isoleeritud aluspinnapuhul tekib olukord, kus soojenenud kehade maht on väiksem, kuna ei ole pinnast, mis sooja hoiab. Autor ise paigaldaks torud ikkagi betooni pealmisesse kihti, lumele lähemale, et soojusvahetus oleks efektiivsem ning ka kõikivate temperatuuride puhul toimiks süteem piisavalt kiiresti. Teisalt võiks oletada, et kuna soojusvahetus pind on nii suur (süvendi põhja pindala), et toru paiknemine nii suurel alal soojusvahetuse kiirusele ega efektiivsusele ei mängi märgatavat rolli. Kuna betooni pind annab koguaeg energiat ära, siis soojusvahetus toimub pidevalt ning torudes jooksev vesi jahtub. Samuti on betooni soojusvahetus pind lumega väga palju suurem võrreldes torude ja betooni soojusvahetus pinna pindalaga, seega betoonplaadi täielik soojenemine 16 °C -ni võib võtta lume olemasolul pika perioodi kogu jahutusperioodist. Väljapakutud kontseptsioon vajaks reaalselt katsetust.

Soojusvaheti efektiivsust on võimalik hinnata ühikuga NTU (*Number of Transfer Units*), mida arvutatakse valemiga (4) ning mille puhul ei ole teada väljuva vee temperatuuri. Sellisel juhul NTU arv on suurem ning ka efektiivsem, kui soojustakistus on võimalikult väike. Sellest saab oletada, et torud peaksid olema betooni pinnas kõrgemal, et torust lumeni oleks võimalikult väike soojustakistus, sest siis on soojuslähivus suurem. [27]

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}}, \quad (4)$$

kus A – soojusvaheti pindala, m²;

C_{min} – väiksema soojusmahtuvusega keha, J/kg°C.

Soojusvaheti efektiivsus ε määratakse NTU väärtusest valemiga (5) [27] :

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (5)$$

U väärtused on arvestatud betooni, PE toru ja vee soojuslähivusest. Väiksema soojumahtuvusega keha on vesi, mis peab saavutama betooni pinnal asetseva lume temperatuuri. Efektiivsus muutub seoses soojusvaheti pindalaga (betooni pind), või U väärtuse muutusega, mida on võimalik muuta seoses torude asetusega betoonis. Valemid (4) ja (5) eeldavad muidugi konstantseid temperatuure (ilma täpseid temperatuure teadmata) igas konstruktsiooni kihis ning sellest tulenevalt võib ainukese järelduse teha, et mida suurem on soojusvaheti pind, seda efektiivsem on soojusülekanne. Võimalik on määrata, et pindalast tulenev efektiivsus on 75%, kui soojusvaheti suurus on 500 m² ja kui ala kahekordistada, siis on võimalik 95%-line soojusvahetus. Sealt edasi pindala suurenedes on süsteemi efektiivsus kasv aeglasem kuna 1500 m² juures on 99.9% saavutatud.

Süsteemi võimsus ja selle reguleerimine toimub siiski läbi torustiku voolava vee kiirusega. Samuti betoonplaadi servades asuva sulavee äravoolu müüritise kõrgusest, sest mida kõrgem on müüritis, seda soojemaks muutub sulavesi enne selle äravooluni jõudmist.

Jahuti võimsus on võimalik arvutada valemiga (6) [6]:

$$W = q_v * C * \Delta T * h, \quad (6)$$

kus W – Võimsus (MW);

q_v – vee voolukiirus (kg/s);

C – soojusmahtuvus (kJ/kg°C);

ΔT – temperatuuri erinevus (°C);

h – aeg (h).

Valemist (6) selgub, et võimsuse määramisel on olulisemad muutujad vee voolukiirus ja temperatuuride erinevus. Kui vee voolukiirus valida samasugune Oslo lennujaama lumijahtussüsteemiga, milleks on 200 l/sek [6] ja pealevoolu ja tagastava vee temperatuuride erinevus on 10 °C, siis on uue süsteemi võimsus 8,4 MW.

Lumes sisalduv jahutusenergia on arvutatav valemiga (7) [6]:

$$W = V * \rho * L, \quad (7)$$

kus V – lume maht (m³);

ρ – lume tihedus (kg/m³);

L – lume sulamissoojus/soojusmahtuvus (0,0926 kWh/kg).

Lume tiheduseks võib arvestada 650 kg/m³, sest see kujuneb ligikaudu keskmiseks väärtuseks kogutud lume puhul. Sellest tulenevalt on 1 tonni lume (tihedusega 650 kg/m³) keskmine jahutusväärtus 60 kWh. [6]

See on ainult lumest saadav jahutusenergia. Uue süsteemi puhul toimib ka vesi jahutina kuni see süsteemist ära juhitakse. Sulavees sisalduvat jahutusenergiat on võimalik arvutada valemiga (8):

$$W_{vesi} = V * \rho * \Delta T * L_{vesi} * 2,778 \times 10^{-10}, \quad (8)$$

kus W_{vesi} – Veest saadav jahutusenergia (MWh);

V – lume maht (m³);

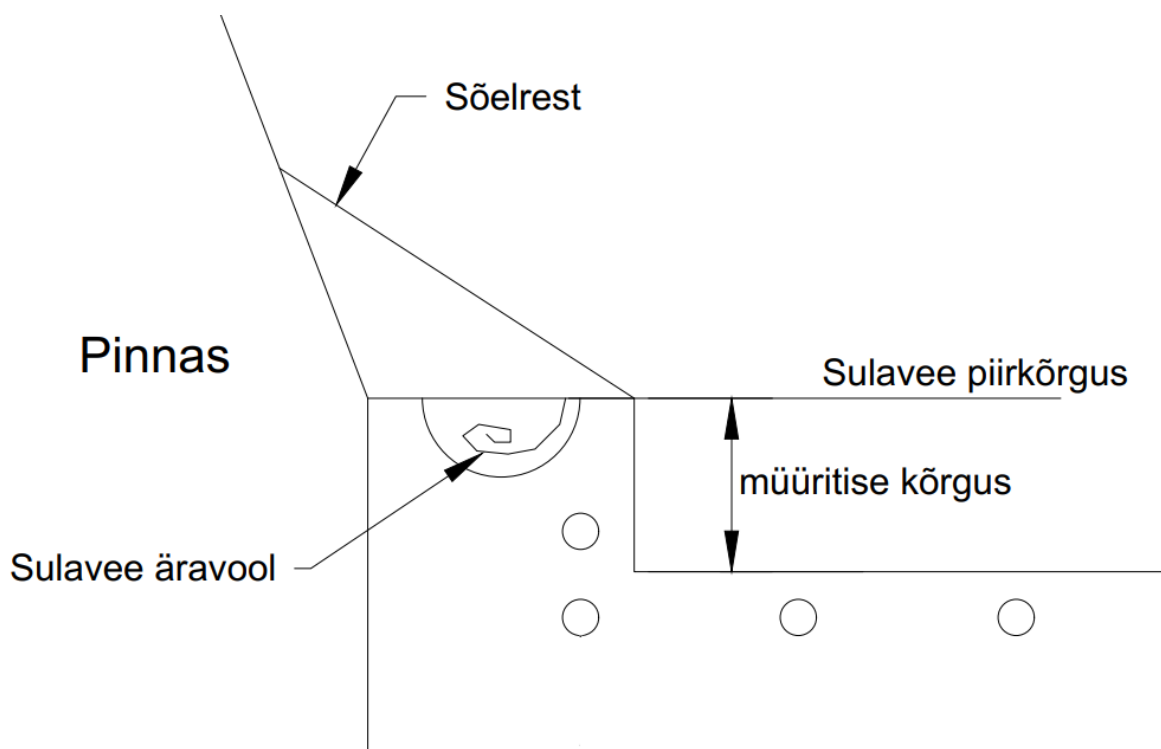
ρ – lume tihedus (kg/m³);

ΔT – Vee temperatuuri tõus;

L_{vesi} – Vee soojusmahtuvus (4181 J/kg).

Kaugjahutuse puhul on tagastava veetemperatuuri erinevus väljastatavast 10 °C, millest tulenevalt on 1 m³ vee jahutusenergia sellise temperatuuri erinevuse puhul 11,6 kWh (1 J = 2,778 x 10⁻⁷kWh).

60 000 m³ lumehoidla puhul on jahutusenergiat 3611,4 MWh lumest (valem (7)) ja 452,4 MWh jahutusenergiat sulaveest (kui sulavee temperatuuritõus on 10 °C, (8)). Sulavee jahutusenergia sõltub temperatuurist, milleni sulavesi soojendatakse soojusvaheti põhjas enne, kui see ära juhitakse. See sõltub omakorda plaadi servades oleva müüritise kõrgusest (Joonis 19). Sulavee jahutuspotentsiaal 60 000 m³ suuruse lumehoidla puhul on varem mainitud 452,4 MWh ning see kogus kataks ära soojuskadude tõttu eemalduva energia (puitlaastudega isolatsioon peab olema edasi arendatud tõhusamaks, selleks et soojuskaod oleksid vahemikus 5 – 10%). Seetõttu on süsteemi jahutuspotentsiaal ehk lumest saadav energia umbes 3,65 GWh.



Joonis 19. Müüritise kõrgus (autori koostatud)

2.2 Väljapakutud süsteemi eelised

Uue väljapakutud süsteemi suureks eeliseks on korrosiooniohu puudumine, kuna lume sulavesi ei voola torustikus ega läbi teisi mehhanisme ja seadmeid. Sulavesi koguneb süvendi põhja, kus teatud koguse ja kõrguseni jõudes on see võimalik ära juhtida sobivasse reoveesüsteemi. Kaob lumest tingitud pinnase ja merevee reostus. Uue süsteemi puhul toimub jahutus oma maksimaalse võimsusega kuni kogu lumi on sulanud. Ei ole vaja erinevaid filtreid ning lumes sisalduvad muldkehad või prügi on võimalik peale jahutushooaega süvendi põhjast kokku koguda. Samuti ei pärsi muldkehad süsteemi toimimist, vaid võivad sellele isegi kaasa aidata seoses sellega, et nad muutuvad energia salvestus kehadeks ning süvendi põhja langedes toimivad nagu teised kehad soojusvahetus protsessis. Kuna sulavett ei ole vaja pumbata jahutist minema, vaid see suundub ise kanalisatsiooni, puudub ka sulavee haldamisega seotud lisakulu nagu pumpade töös hoidmine, nende hooldus või puhastamine. See tähendab, et süsteem on lihtsam ja peaaegu hooldusvaba ning tarvis on ainult viia lund kogumiskohta.

3. LUMIJAHUTUS TALLINNA KAUGJAHUTUS SÜSTEEMIS

Kaugjahutussüsteemi osad on kaugjahutusjaam, jahutusvõrk ja tarbijad. Süsteemis on võimalik jahutada soojuskandjat kolmel enamlevinud viisil:

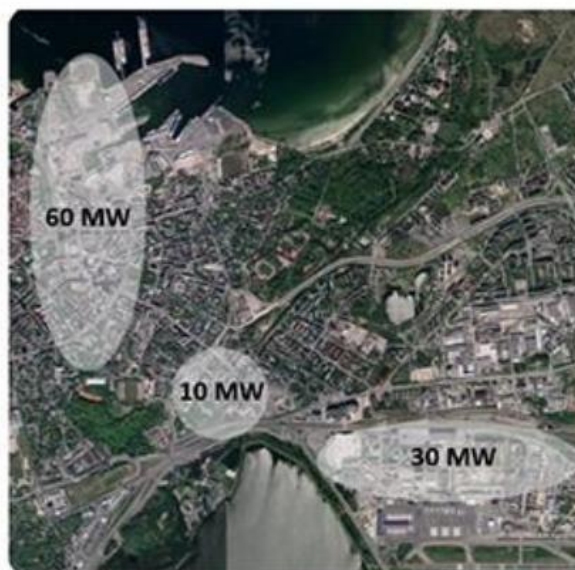
- absorptsioonjahutid, mis toimiksid hetisoojuse arvelt;
- elektrilised kompressorjahutid;
- looduslikud allikad ehk vabajahutus. [14]

Lumijahutuse võib liigitada vabajahutuse osaks, sest vabajahutus on energia allikas, millega ei ole vaja energiat toota vaid ainult edastada (näiteks meri, järv, jõgi) [14].

Lumi on meie jaoks looduslik allikas, kuid et lund kasutada jahutuse osana on vaja see ühte kohta kokku koguda, erinevalt veekogudest, mis on statsionaarsed objektid.

Lume kokku kogumine ei olegi ilmselt see kõige keerukam, sest lumekoristus on Tallinna linnas organiseeritud iga aastane tegevus, kuid lume hoiustamiseks on vaja ruumi. Peatükis 3 välja pakutud kontseptsioon hõivab ligi 9000 m² maa ala, selleks et rajada lumemahuti koos soojusvahetiga. Loomulikult lume hoiustamiseks mõeldud mahuti dimensioone saab muuta, näiteks sügavamaks, selleks et mahuti pindala oleks väiksem, kuid maht sama. Siiski pinnaressursi vajalikest ei sobi lumijahutuse mahuti igalepoole ning suurimaks väljakutseks võib olla just vajamineva maa ala leidmine.

Potentsiaalsed kaugjahutus piirkonnad on näidatud Joonis 20. Oluline on mainida, et 30 MW võimsusega ala on Ülemiste City piirkond ning selle jahutusvõimsuse vajadus tuleb hinnata umbes 70 MW peale, kui sinna arvata ka T1 kaubanduskeskus, lennujaam ja Ülemiste City pidevalt täienduv areng. [14]



Joonis 20. Potentsiaalsed kaugjahutus piirkonnad Tallinnas ja nende võimsused [14]

3.1 Lumekoristus Tallinnas

Käesoleva aasta (2023) detsembrikuu lõpuks on Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalameti hoolduspartnerite andmetel selle talve jooksul (20. november – 27. detsember) välja veetud juba 184 221 m³ lund. Eelmine talv 2022/2023 veeti kogu talve jooksul umbes 334 000 m³ lund, tuginedes Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalameti hoolduspartnerite ja linnosavalituste edastatud andmetele. [28]

2021/2022 oli üks viimase kümnendi mahukamaid lumekoristusaaastaid Tallinnas ning kõik ladustamiskohad olid viimse piirini täis, kokku koguti 595 000 m³ lund. Selline talv pani Tallinna linna otsima lume ladustamiseks 3000 m² suurust kinnistust, kuhu lund viia. [10]

Eesti pealinn on jagatud viieks lumekoristus piirkonnaks (Joonis 21) [13].

Tänavalt tulev lumi ei ole aga puhas. See on reostunud libeduse tõrje vahenditega ja muu prahi ja prügiga (puulehed, oksad, koerte väljaheidet, plastpudelid, paber jne) ning selle sulamisel jõuab reostus kergesti veekogudesse. Tallinna linn oma sademevee strateegias kirjutab, et puudub talvise lume käitlemise kontseptsioon. Reostunud lumi tuleb tänavatelt ja peamagistraalidelt ära koristada, ühest küljest selleks, et linna liiklus toimiks, kuid teisalt, et sulav lumi ei kannaks reostust ja soolasid laiali, mis omakorda võivad jõuda nii merre, kui põhjavette. Üks võimalik lumekoristus kontseptsioon näeb ette, et kui lumi suudetakse piisavalt kiiresti peale sadamist tänavatelt ära korjata, siis see on piisavalt puhas, et seda võiks ladustada merejääle, kus see sulades voolab merre. Selline tegutsemisviis eeldaks mingisugust kontrollmeedet lume puhtuse tuvastamiseks. Selline meede hetkel puudub. Üldiselt aga kogu lund ei ole võimalik piisavalt kiirest ikkagi linnapildist eemadada ning tekib ka vajadus libedusetõrjeks ja seetõttu tekib kohe probleem keskkonnasäästliku lume käsitlemisega. [12]



Joonis 21. Tallinna lumekoristus piirkonnad [13]

Eelpool mainitud statistika ning info näitab seda, et viimastel aastatel on olnud lund piisavalt, et täita 5 või enam 60 000 m³ suurust lumijahutus mahutit. Iga mahuti ei pea ilmingimata olema nii suur ning võib olla ka mitu väiksemat. Käesoleva töö autori poolt väljapakud lumijahutuse kontseptsiooniga lahendatakse mitte ainult jahutusega seotud energiasäästlikust vaid ka keskkonna alaseid ja muid ühiskonna probleeme:

- Tekivad kindlad ladustamispaigad;
- Lume koristuse selgem hinnastamine (iga koristushooaja alguses on teada, kuhu lumi viiakse);
- Lume äraveol, transpordist tekkiv ökoloogiline jalajälg neutraliseeritakse;
- Saastunud lumi ei reosta peale kokku kogumist muldasid, põhjavett ega merd;
- Lumest saab taastuva energiallika jahutamiseks;
- Lumes sisalduv prügi ei levi peale sulamist maismaal laiali vaid on lumijahutuseks rajatud betoonalusel ning võimalik sealt kokku koguda;
- Eraisikud saaksid oma lund viia lumejahutus jaamadesse.

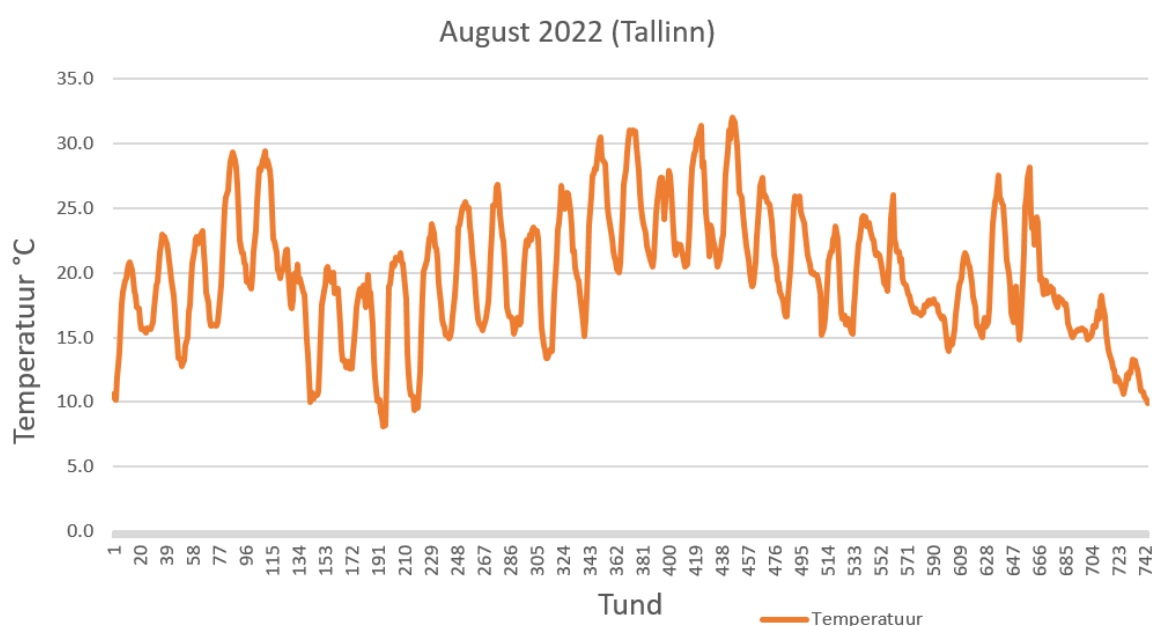
Väga lumerikastel talvedel, kui lumijahutus mahutid täituvad oma piirini tuleks lund siiski edasi koguda ja säilitada vajadusel järgmiseks hooajaks. Veel varasemalt kogutud andmete põhjal on Tallinnast koristatud lumekogused väga palju varieerunud. Lumi ei säili küll igavesti, kuid lumi, mis ei mahu lumijahutussüsteemidesse, tuleks ikkagi hoiustada tagavaraks, juhuks kui järgneval aastal ei saja piisavalt lund. Teine variant on muidugi tõhustada lume koristamist linnapildist, sest keskmiselt koristatakse tänavaltelt vaid kolmandik kuni pool mahasadavast lumest. [7]

Käesoleva töö autoril puudub ülevaade, kui palju lund tahaksid näiteks eraisikud ära viia.

3.2 Lumest saadav jahutusenergia

Peatükis 2.1 Süsteemi toimimine, on välja arvatud, et 60 000 m³ lume olemasolul on uuendatud kontseptsiooni lumijahutussüsteemiga võimalik sellest saada 3650 MWh jahutusenergiat ning süsteemi võimsuseks on 8,4 MW. See tähendab, et $3650/8,4 = 434,5 \text{ h} / 24 \text{ h} = 18,1$ ööpäeva süsteemi täisvõimsusel jahutust.

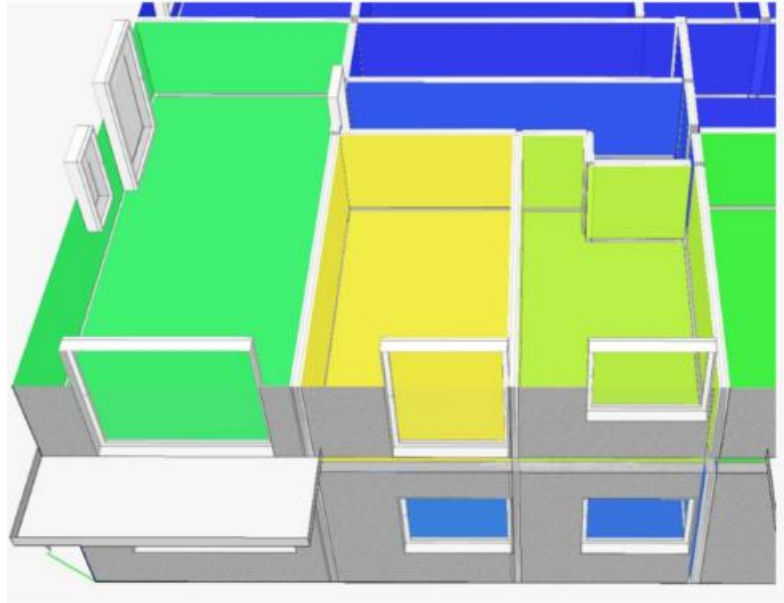
Samuti vaid paaril päeval kuus tõuseb suvine temperatuur öösiti Tallinnas üle 20 °C (Joonis 22). 2022. aasta kõige soojem kuu oli august. [29]



Joonis 22. Aasta 2022 august, Tallinna kõige soojem kuu [29]

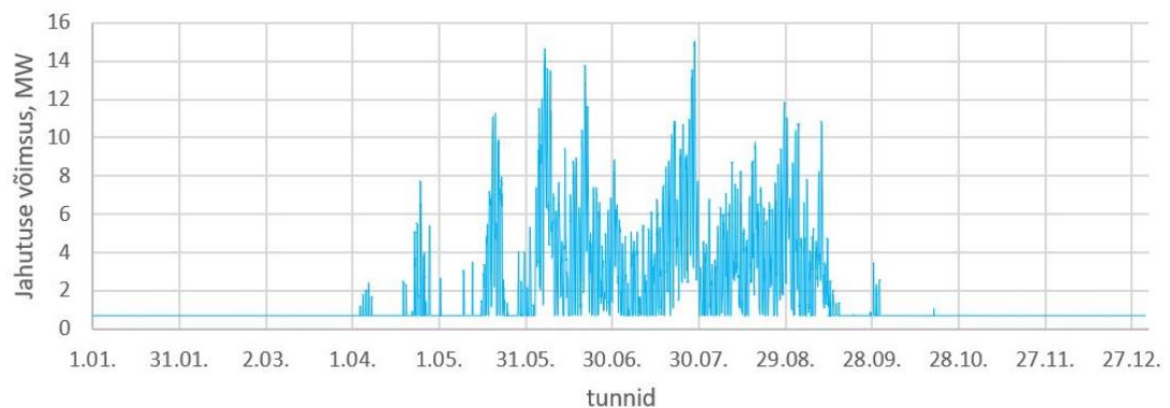
Hoone jahutusvajadust ei saa hinnata ainult välisõhu temperatuuri järgi. Jahutusvajadus tekib ka hoone enda konstruktsioonist ja selle soojusjuhtivusest ning vabasoojuse ligipääsust. Samuti on hoone akende ja klaasist välisfassaadi asetused ilmakaarte suhtes määrava tähtsusega jahutuse seisukohast. [30]

Ruumid soojenevad erinevalt ning ka ruumide enda jahutusvajadus on erinev (Joonis 23) [31].



Joonis 23. Võimalik stsenaarium ruumide soojenemisest sõltuvalt hoone ja akende asetusest (erinev värv tähistab erinevat temperatuuri ruumis) [31]

Näiteks Tallinnas, Ülemiste City äripargi jaoks arendatud kaugjahutusvõrk on võimsusega 14,2 MW [14]. Arvestades, et tegu on äripargiga võib oletada, et jahutusperiood ei ületa 12 h ööpäevast. Täpsemalt selgub et suve keskmine jahutusvõimsus on 4,35 MW ja aasta keskmine 1,85 MW Joonis 24 [14]. Lume 3650 MWh jahutusenergiast jaguks suve keskmise võimsuse juures 839-ks tunniks ehk ligi 35-ks päevaks.



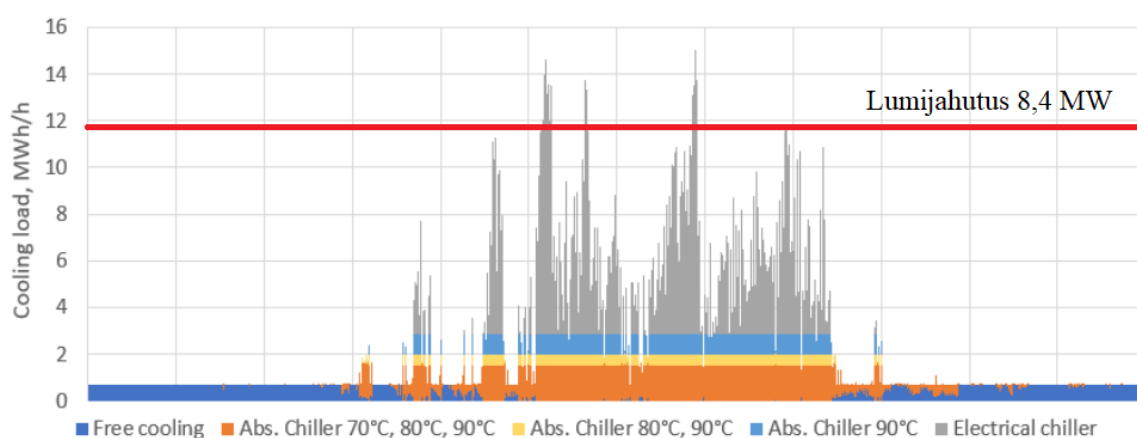
Joonis 24. Ülemiste City kaugjahutusvõrgu koormus aasta jooksul [14]

Kui Ülemiste City kaugjahutusjaama koosseisu kuuluvad ka absorptsioonjahutusseadmed (mis toodavad jahutust soojusest), elektrilised jahutid ja välisõhu vabajahutusseadmed muutub lumijahutuse osakaal. Välisõhu vabajahutuse võimsus on 0,71 MW, kui välisõhu temperatuur on alla 5 °C. Vabajahutust ei saa rakendada kui välisõhu temperatuur on üle 15 °C. [14]

Temperatuurid detsembris, jaanuaris ja veebruaris püsivad alla 5 °C, tõustes vaid väga harva kõrgemale [29]. See vähendab omakorda lumijahutuse koormust.

Aleksander Ledanov on oma 2021 aasta magistritöös „Ülemiste City kaugjahutuse arengukava“ [14] valinud Ülemiste City 14,2 MW kaugjahutusjaama juurde absorptsioonjahutusseadme(d), mille koguvõimsus on 3,2 MW. Need külmaseadmed võtaksid enda kanda suurema osa suvisest keskmisest jahutusvõimsusest, milleks oli 4,35 MW. [14]

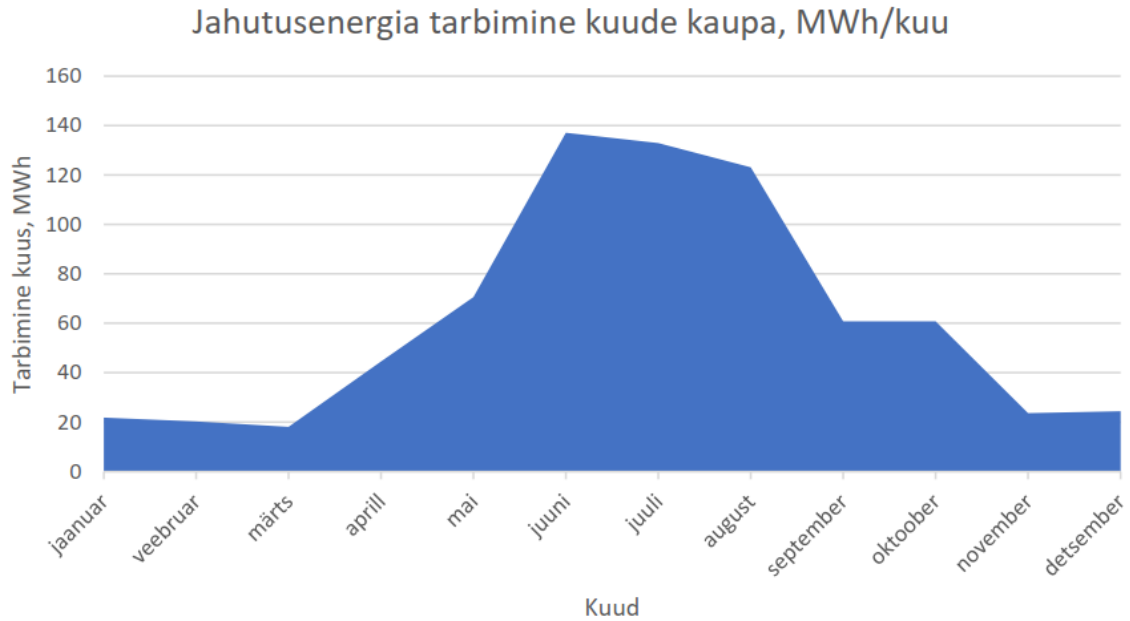
Suve keskmisest jahutusvõimsusest jääks lume kanda 1,15 MW ning sellisel juhul suudaks lumijahutus oma 3650 MWh jahutusega katta 132 päeva keskmise jahutusvajaduse. Kõige kuumematel suve perioodidel tuleb rakendada elektrilisi jahutusseadmeid, et katta jahutuse tipukoormused (Joonis 25).



Joonis 25. Ülemiste City kaugjahutuse tootmine koos lumijahutusega (algandmed [14], käesoleva töö autor on graafikule lisanud lumijahutuse osakaalu)

Absorptsioonjahutusseadmed kasutavad oma toimiseks samuti jahutusvett ja sõltuvalt süsteemist ja tootjast jahutusvee temperatuur jääb 30 °C juurde [32]. Uuendatud lumijahutussüsteemi kontseptsiooni juures on välja juhitava lume sulavesi vahemikus 10-16 °C, seda sõltuvalt lumijahutus süsteemi konfiguratsioonidest. Jahutist lahkuvat sulavett saaks kombineerida erinevate heitsoojustega või muu sarnasega ja kasutada sobiva temperatuuri saavutamisel absorptsiooniseadme jahutusveena.

Vaatame lisaks ka mõnede hoonete tarbimisi. Allpool on ühe reaalse Ülemiste City büroohoone mõne aasta tagune jahutustarbimine (Joonis 26), milleks on aasta peale kokku 720 MWh.



Joonis 26. Ülemiste Citys asuva büroohoone aastane jahutstarbimine [14]

Kui Ülemiste City kaugjahutusvõrgus oleks 60 000 m³ suuruse mahutiga lumijahutus, siis sealt saadav 3650 MWh energiat kataks terve sellise büroohoone aastase jahutusvajaduse. Hoone ise aga tarbiks 20% kogu lumijahutusenergiast. Seega on võimalik eelpool mainitud lumekogusega ära jahutada 5 sarnase jahutustarbimisega hoonet.

Uurime ühte teist uurimustööd. Evelin Tõniste oma 2016. aasta magistritöös „Lumega jahutamise potentsiaal Tallinnas“ on kogunud kokku 11 erineva hoone jahutusvajadused aasta lõikes, koguvõimsusega 13 MW [7]. Nende andmete põhjal saame arvutada, kui kauaks jagub lumest jahutus energiat ja kui palju oleks sellisel juhul üldse lund vaja, et vajaminev energia kätte saada.

Tabel 5. Hoonete jahutusandmed [7]

Hoone	Hoone kasutusvaldkond	MWh/a	m ²	kW	KWh/a m ²
Mustamäe keskus (Tammsaare tee 104a)	Kaubandushoone, kino	362,8	18 929	2 165	19,2
Tehnopol 2 (Mäealuse 2/2)	Büroohoone	147,7	8 855	837	16,7
Kohtuhoone (Lubja tn 4)	Kohtuhoone	203,3	25 340	1 177	8,0
Roseni tn 9/11	Ärihoone, korterelamu, büroohoone	118,9	14 857	490	8,0

Mustamäe haigla C korpuse I etapp	Haigla	1 113,0	13 808	1 285	80,6
Tatari 51	Büroohoone	53,4	5 185	383	10,3
Rotermanni 18	Korterelamu	46,5	99 703	320	0,5
Punane 76	Kaubanduspind	1 825,7	155 866	6 000	11,7
Liimi 3	Ärihoone	7,3	414	25	17,7
Seebi 1	korter, kaubandus, büroo	54,6	1 709	320	31,9
Seebi 3	korter, kaubandus, büroo	290,5	9 599	30,3	
	KOKKU	1285 MWh/a	354265 m ²	13032.3 kW	204.6 kWh/a m ²

Tabel 5 selgub, et lumijahutis olev 3650 MWh jahutusenergiat katab ära hoonete energia vajaduse. Puudu jääb aga võimsusest. Vajatav võimsus on 13 MW.

Aleksander Ledanov on oma 2021 aasta magistritöös „Ülemiste City kaugjahutuse arengukava“ [14] kokku kogunud andmeid potentsiaalselt rajatava kaugjahutus piirkonda jäävate hoonete jahutusvõimsustest Ülemiste Citys (Tabel 6).

Tabel 6. Ülemiste City kaugjahutuspiirkonna hooned ja nende jahutusvõimsus [14]

Tarbija asukoht	Maksimaalne jahutuse võimsus ,MW
Büroohoone 1 (III etapp)	0.550
Büroohoone 1 (I etapp C korpus)	1.370
Büroohoone 1 (I etapp B korpus)	1.370
Büroohoone 1 (II etapp D korpus)	1.370
Büroohoone 1 (II etapp E korpus)	1.370
Büroohoone 1 olemasolev hoone	0.878
Büroohoone 5b	0.563
Büroohoone 5a	0.563
Büroohoone 12	0.638
Büroohoone 13	1.800
Kaubanduskeskus, olemasolev hoone	2.703
Kaubanduskeskus, perspektiivne arendus	1.040
Büroohoone 15	0.407
Büroohoone 14	0.216
Büroohoone 6/1	0.450
Büroohoone 7a	0.800

Büroohoone 7	0.803
Büroohoone 6/2	0.450
Büroohoone 7 B ja C hooned	1.440
Büroohoone 8	0.161
Büroohoone 9 olemasolev hoone	0.935
Büroohoone 9 perspektiivne arendus	0.420
Büroohoone 21	0.161
Büroohoone 19	2.668
Büroohoone 18	0.693
Büroohoone 20	0.693
Büroohoone 16	0.587
Büroohoone 17 E ja G	0.267
Büroohoone 17 perspektiivne arendus	0.480
Büroohoone 22	0.693
Büroohoone 23	3.500
Büroohoone 27	0.747
Büroohoone 24	0.641
Büroohoone 25-1	1.200
Büroohoone 10 M ja F	0.951
Büroohoone 4	0.161
Büroohoone 25/2	1.200
Büroohoone 24/1	0.624
Büroohoone 26/1	0.374
Büroohoone 26/2	0.480
Büroohoone 26	0.374
Büroohoone 10	0.854
Büroohoone 28/1	1.228
Lõotsa tänava perspektiivne arendus	1.040
Büroohoone 11	0.630
Büroohoone 28/2	1.228
Büroohoone 3	1.350
Lennujaam	11.647
Büroohoone 29	0.267
Büroohoone 2	0.294
Büroohoone 10	2.700
Büroohoone 30/1	0.660
Büroohoone 12/1	1.160
Büroohoone 12/2	1.160
Büroohoone 12/3	1.160
Büroohoone 12/4	1.160
Büroohoone 30/2	1.601
Büroohoone 31	1.601
Büroohoone 12/5	1.160
Büroohoone 32	0.800
Büroohoone 33	0.800
KOKKU	69.29
Keskmine	1.14

Keskmine ilma lennujaamata	0.97
----------------------------	------

Koos lennujaamaga on kaugjahutuspiirkonna keskmine jahutusvõimsus 1,14 MW ja kui jätta lennujaam välja siis on see 0,97 MW. Meie lumijahutus süsteem võimadas 8,4 MW võimsust ning kataks keskmiselt 8 hoone/tarbija jahutusvõimsuse. Kui valida kõige väiksema jahutusvõimsuse vajadusega hooneid/tarbijaid siis neid oleks kokku 21, mille koguvõimsuse vajadus on 8,47 MW.

Järgnevalt vaatame, milline peab üldse olema efektiivne ja direktiividele vastav kaugjahutusvõrk. Kaugjahutusvõrk on efektiivne, kui see vastab Euroopa Liidu direktiivile 2012/27/EU. Sellest tulenevalt peab kaugjahutusvõrk kasutama vähemalt 50% taastuvat energiat või vähemalt 50% jääksoojust või vähemalt 75% koostootmisega tekkinud soojust või 50% tekkivast energiast on nende kombinatsioon. Tallinna näitel on loodud 3 potentsiaalset stsenaariumi, kuidas saavutada eelpool mainitud situatsioon kaugjahutuses (Tabel 7). [9]

Tabel 7 algandmed on pärit artiklist „District Cooling Network Planning. A Case Study of Tallinn“, 2022 (Anna Volkova, Aleksandr Hlebnikov, Aleksandr Ledvanov, Tanel Kirs, Urmas Raudsepp, Igor Krupenski, Eduard Latõšov) [9] ja andmeid on täiendanud käesoleva uurimustöö autor, lisades sinna lumijahutuse potentsiaalse energia. Lumijahutuse osakaal asendab algandmetes oleva fossiilse kütuse osakaalu. Lumijahutuse energia on arvestatud 60 000 m³ lume olemasolul, mille puhul oleks võimalik jahutusvõimsus 8,4 MW (6).

Tabel 7. Kaugjahutus jaamade stsenaariumid, koos lumijahutusega (algandmed [9], kuid fossiilsete kütuste osakaalu vähendatud lumijahutuse osakaalu võrra)

Jahutusjaam	STSENAARIUM					
	1		2		3	
Absorptsiooniseadmed (kaugkütte soojus)	0 MW	0 %	39 MW	59,1 %	8,2 MW	12,4 %
Kompressorid (fossiil kütused)	21,6 MW	32,7 %	18,6 MW	28,2 %	13,4 MW	20,3 %
Merevee jahutus	36 MW	54,6 %	0 MW	0 %	36 MW	54,6 %
Lumijahutus	8,4 MW	12,7 %	8,4 MW	12,7 %	8,4 MW	12,7 %
KOKKU	66 MW	100 %	66 MW	100%	66 MW	100%

Millest taastuva ja vabajahtuse osakaal kokku	44,4 MW	67,3 %	47,4 MW	71,8 %	52,6 MW	79,7 %
---	---------	--------	---------	--------	---------	--------

Antud jahutuse skeemid on väga tundlikud just merest saadavale vabajahtusele. Kui merejahutuse võimsus väheneb, siis suureneb automaatselt fossiilsetest kütustest sõltuvus ning kaugjahutuse võrk võib osutada ebaefektiivseks Euroopa direktiividest lähtudes. [9]

Teisest küljest on skeemid tundlikud ka lume otsa saamisele jahutist, sest siis kaob 12,7% osatähtsusega jahutusallikas.

Süsteemi tasakaalustamisele ja töökindlamale opereerimisele aitaks kaasa merevee ja lumijahutuse kombineerimine.

Mereäärse linnana on Tallinnal olemas potentsiaal küll mereveega jahutamiseks, kuid siiski mitte aastaringelt. Põhjus seisneb merevee temperatuuris. Merevee temperatuur on sobiv alates teatud kaugusest rannikult ning sügavusest. Arvutuste kohaselt saaks merevesi vabajahtusena ära katta pool aastasest vajadusest. [33]

Vabajahtusena merevee kasutamise üldine loogika on järgmine:

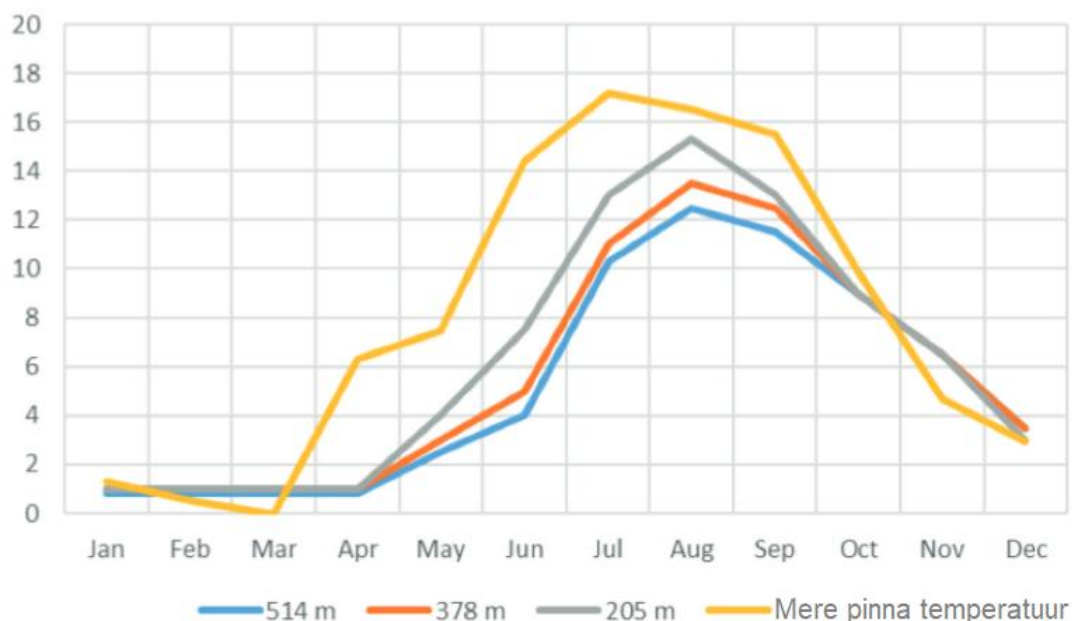
- Kui merevee temperatuur on alla 5 °C siis on jahutusvajadus rahuldatud (Tallinna lahes on sellised tingimused 5-6 km kaugusel, 40-50 m sügavusel);
- Kui merevee temperatuur on vahemikus 5 – 12 °C siis jahutatakse merevesi soojusvahetite abil;
- Kui merevee temperatuur on üle 12 °C siis peavad kogu jahutusvõimsuse tagama külmamasinad. [7]

Kuna lumi peab hakkama jahutama kaugjahutusvõrgust tagastatavat 16 °C vett uue pealevoolu temperatuurini 6 °C, siis selleks, et lumi säiliks pikemalt võiks mereveega teostada eeljahutust. Sellega väheneks lume jahutuskoormus ning ei oleks vaja kasutusele võtta elektri- või teiste fossiilkütustega toimivaid süsteeme, et merevett jahutada. Ka ei oleks ilmingimata vaja ehitada välja 4-5 km kaugusele merele jahutusüsteemi, vaid selle trassi väljaehitus muutub tunduvalt lühemaks, kui mereveest saab põhiliselt eeljahuti lumijahutusele.

Allolev graafik (Joonis 27) ilmestab merevee temperatuuri 20 meetri sügavusel. Mõõdistused on tehtud erinevatel kaugustel rannikust. [9]

Selgub, et 378 meetri kaugusel rannikust ei erinegi väga palju merevee temperatuurid 514 meetri kaugusel olevast mereveest. Võrdluseks ja lumijahutusega koostamiseks kasutame siiski 514 m kauguselt rannikust ja 20m sügavuselt mõõdetud merevee temperatuure. Selgub, et juuni keskpaigani sobib merevesi ise jahutama, kuna temperatuur jääb kuni 5 °C-ni. Juuni lõpuks on temperatuur 7 °C ja selline vesi sobiks

nii mereveega kaugjahutuseks kui lumijahutuse eeljahutuseks. Sellisel juhul tuleks lumijahutussüsteemis kaugjahutusest tagastatavat vee temperatuuri aladanda 2 °C jne.



Joonis 27. Merevee temperatuur rannikust eri kaugustel 20 m sügavusel ning merevee pinnatemperatuur [9]

Allolev Tabel 8 integreerib omavahel merevee jahutuse ja lumisüsteemi. Kaugjahutussüsteemi puhul on arvestatud pealevoolu 6 °C, tagastatava vee temperatuuri 16 °C, uue kontseptsiooniga lumijahutuse võimsus, kui ΔT on 10 °C, on 8,4 MW (6) ning 60 000 m³ lund võimaldab kasutada jahutuseks 3650 MWh (sisaldab energiakadusid seoses loomuliku sulamisega). Tabel 8 arvutustes on perioodiks võetud 15 päeva, igas päevas toimib jahutus 12 tundi. Lumijahutuse võimsus, kui merevesi teostab eeljahutust, on arvatud merevee jahutuse võrra saadud uue ΔT -ga ning kasutatud valemit (6). Perioodil tarbitav lumeenergia leitakse perioodil jahutatavate tundide korrutamisel lumijahutuse võimsusega, kui mereveega on teostatud eeljahutust (15 päeva x 12 tundi x lumijahutuse võimsus mereveega eeljahutamisel). Lumeenergia jääk arvutatakse eelmise perioodi jäägist uuel perioodi tarbitava lumeenergia lahutamisel. Lumijahutuse koormus on perioodi võimsuse ja maksimaalse võimsuse suhe.

Tabel 8 selgub, et koos merevee eeljahutusega saaks lumijahutus ära jahutada terve suve (1. juunist kuni 31. augustini) ja 8 päeva septembrist. Loomulikult võib süsteemi vaadata ka teistpidi, et lumi jahutab vajadusel merevett ning asendab elektrilisi merevee jahuteid, nii kaua kuni lumest jahutusenergiat jagub.

Tabel 8. Lumijahutuse ja merevee omavaheline koostoitimine

Periood	Merevee keskmine temp. °C	Lumijahutuse ΔT , °C	Lumijahutuse võimsus mereveega eeljahutusel (6), MW	Perioodil tarbitav lumeenergia (ööpäevas 12h), MWh	Lumeenergia jääk, MWh	Lumijahutuse koormus, %
Juuni esimene pool (15 päeva)	4	0	0	0	3650	0
Juuni teine pool (15 p.)	7	1	0.84	151	3499	10
Juuli esimene pool (15 p.)	9	3	2,5	450	3049	30
Juuli teine pool (15 p.)	11	5	4,2	756	2293	50
Augusti esimene pool (15 p.)	12	6	5	900	1393	59,5
Augusti teine pool (15 p.)	12	6	5	900	493	59,5
Septembri esimesed 8 päeva	12	6	5	480	13	59,5

3.2.1 Tallinna Lennujaam

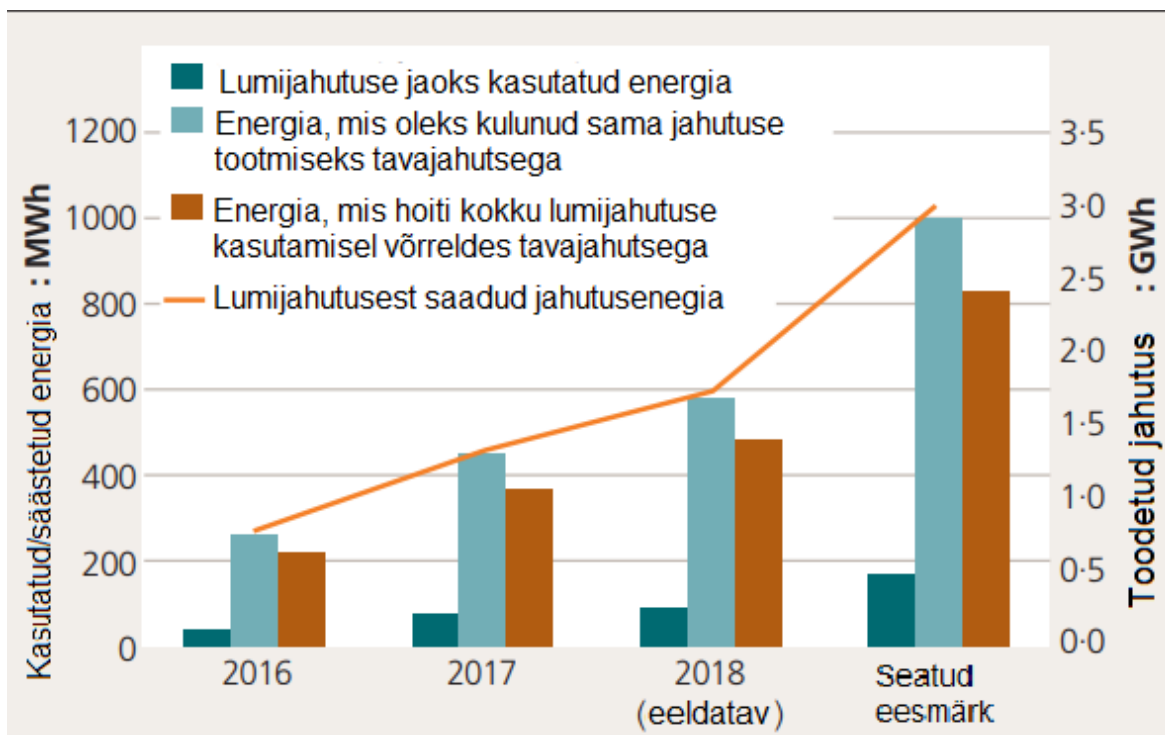
Viimase osana on lühike analüüs Tallinna Lennujaama kohta. Põhjuseid on selleks mitmeid. Alustuseks, lumijahutust on rajatud mitmesse lennujaama (Oslo lennujaam Norras [6], Sapporo lennujaam Jaapanis [1]) ja sellele annab põhjuse möödapääsematu vajadus talvel õhukütõusu ja maandumisradade hooldus. Lennujaamade alad on suuremad kui ainult õhukütõusu rajad ning puhastada tuleb ka lennukite parkimis alad, lähenemis teed, autode parklad, mis kõik on vajalik efektiivse lennujaamalogistika toimimiseks.

Oslo lennujaama jahutusvajadus on 35 MW. Nende rajatud süsteem toimib sarnaselt Sundsvalli haigla omaga, kasutades soojuskandjana vett, mis soojusvahetist tagastatuna suunatakse lume maardlasse ning seal taasjahutatakse. Lume isolatsiooniks kasutatakse puiduhaket. Lumi kogutakse 10 000 m² suurusesse kaevikusse, mis on 4-5 meetrit sügav (Joonis 28). Jaam on ehitatud tipuvõimsuste korvamiseks võimsusega 5 MW ning see katab kuni 25% lennujaama jahutusvõimsusest. Kokku peaks maardla mahutama vajadusel 90 000 m³ lund (maa alune osa 30 000 m³) kui maapealse osa kõrguseks tuleb 9 meetrit. Potentsiaalseks energiaks on arvatud 3 GWh, mis on 12% kogujahutus tarbimisest. 2016. aastal suudeti jaama võimsuseks mõõta 5,5 MW, mida on rohkem, kui esialgne disain eeldas. [6]



Joonis 28. Oslo lennujaama lume kogumis maardla suvel [6]

Probleemiks on endiselt lume loomulik sulamine, kuna iga aasta hävib sel moel umbes 40 – 60% kogutud lumest [6]. See annab põhjuse täiustada lume hoiustamist eriti just isolatsioonimaterjali kujul. Samuti, kui kasutada uut väljapakutud lumijahutuse kontseptsiooni, ei ole vaja rajada mitmeid filtrisüsteeme ja eraldi soojusvahetit. Põhirõhk läheks sellisel juhul isolatsioonimaterjali täiustamisele. Jahutus, mis lumest saadi, aitas energiat kokku hoida (Joonis 29) [6].



Joonis 29. Lumijahutusega saavutatud energiasääst Oslo lennujaamas [6]

Tallinna Lennujaam AS-i ainuaktsionär on Eesti Vabariik ning iga aasta seab riik lennujaama tegevusele ka ootused, mille seas on eraldi punktid keskkonnasõbralikkusele ja nendeks ootusteks 2023. aastal olid:

- „Ettevõtte loob turvalise ja jätkusuutliku tegevuskeskkonna. Lisaks tagab äriühing lennuväljade käitamise ning õhusõidukite, reisijate ja kauba teenindamise taseme vastavuse rahvusvaheliste ja riigi regulatsioonidega ning vastastikku kokkulepitud tingimustega“;
- „Ettevõtte juhib oma tegevuse mõjusid loodus- ning majanduskeskkonnale ja sidusrühmadele ning rakendab meetmeid negatiivsete mõjude vähendamiseks“;
- „Ettevõtte arendab riskide juhtimise süsteemi, mis tagab järjepidevalt kõigi osapoolte aktiivse osaluse riskide ohjamisel ja minimeerimisel kõigil tegevusaladel“. [16]

Sellest tulenevalt on Tallinna Lennujaam ka ise oma aastaaruannetes ja eesmärkides toonud välja arendustegevused ja keskkonnaga seotud murepunktid. 2020. aasta aruandes oli välja toodud eraldi, et „Ettevõtte juhib oma tegevuse mõjusid loodus- ja majanduskeskkonnale ja sidusrühmadele ning rakendab meetmeid negatiivsete mõjude vähendamiseks.“ Sellest tulenevalt oli lennujaama sihiks jätkuvalt vähendada ökoloogilist jalajälge ning teised keskkonda parandavad tegevused nagu päikeseparkide rajamine, mis vähendaks sisseostetava elektri tarbimist. Igat tegevust ökoloogilise jalajälje vähendamise jaoks loetakse väga tähtsaks. 2020. aasta keskkonna

riskianalüüsi tulemusel selgus, et üheks suurimaks negatiivseks mõju teguriks keskkonnale on õhusõidukite ja katendite jäätõrje ning mainiti ka fossiilkütustel toimiva tehnika kasutamist. Suurimat keskkonnamõju avaldavadki ressursikasutus, millest on välja toodud energiatarbimine. Üldsõnaliselt eesmärki edasi andes on vaja 2030. aastaks Tallinna Lennujaamal saavutada CO₂ neutraalsus ning selle jaoks on vaja tagada energiatõhusus ning minna üle taastuvatele energiallikatele. [17]

2022. aasta aruandes on endiselt sarnased eesmärgid püstitatud ning on ka näha, et Tallinna Lennujaam teeb muudatusi ja arendustööd, et saavutada keskkonna alaseid eesmärke. Selgub, et suurimaks CO₂ heite tekitajaks lennujaamas on elekter (5598,4 tonni). Palju tähelepanu pööratakse ka sademevee ja sulavee puhtusele. [18]

Mõõtes Tallinna Lennujaamas olevat asfalteeritud ala, mille pealt on võimalik koguda kokku lumi, on Google Mapsiga tulemuseks umbes 595 371 m² (Joonis 30) [34]. Mõõtmise ajal oli teada referentsväärtsus, et lennujaama maandumisraja pikkus on 3480 meetrit ja laius 45 meetrit [15].



Joonis 30. Tallinna Lennujaam satelliidipildilt [34]

Tänu Evelin Tõniste magistritöös „Lumega jahutamise potentsiaal Tallinnas“ kogutud sademete statistikale ja selle põhjal koostatud keskmiste Tallinnas sadavate lumehulkade tabelile (Tabel 9) on võimalik määrata, kui palju võiks lennujaamas lund kokku koguda [7]. Leitud lennujaama asfalteeritud pindala alusel saame teada, kui palju erinevatel aastatel võiks lund maha sadada ning kui see kokku koguda, kui palju jahutusenergiat selles sisaldub. Lennujaama pindala korrutatakse lumekihi paksusega ja saadakse lume kogus kuupmeetrites. Lumekoguse pealt arvutatakse selles peituv jahutus (7). Kadudeks arvestame 10%, eeldusel, et isolatsioonisüsteem on parandatud ning ei kasutata (ainult) puitlaaste ning kasutusel on uue kontseptsiooniga süsteem. Lõpliku potentsiaalse jahutusenergia saame lumes olevast energiast lahutades kadudest tekkiva energia. Eeldame taaskord, et lume tiheduseks on 650 kg/m³. Arvestame, et rajatakse uue kontseptsiooniga lumijahutussüsteem, mille võimsus on eelpool mainitud 8,4 MW. Infoks, et eelpool olev Tabel 6 sisaldub ka Tallinna Lennujaama jahutusvõimsus, milleks on 11,647 MW. Sellest järeldub, et lumijahutus süsteem ei kata maksimaalset lennujaama tarbimisvõimsust üksi ära. Võimalik on

muuta voolukiirust soojusvahetis, kuid ka varem käsitletud 200 liitrit/sekundis süsteem, mille puhul saavutatakse 8,4 MW võimsus ei taga terveks jahutushooajaks vajalikku jahutusenergiat. Sellest tulenevalt teeme arvutused eeldusel, et lumijahutuse võimsus on 8,4 MW ning vajalik on jahutust rakendada 12 tundi ööpäevas, olenemata, et lennujaam on avatud terve ööpäeva vältel.

Tabel 9. Tallinna keskmistest sademetest tuletatud maha sadanud lume koguste määratlus (keskmiste sademete andmed [7])

TALLINN	Lume kogus, m³ (kogutud 595371 m²-lt)	Lumes sisalduv jahutusen ergia (7), MWh	Kaod 10%	Potentsiaalne tarnitav jahutusener gia, MWh	Jahutuspäevade arv maksimaalse 8,4 MW võimsusega, päeva
Vähese lumega talv, 71 mm	42271	2544	254,4	2289,6	22
Keskmise lumega talv, 112 mm	66681	4013	401,3	3611,7	36
Rohke lumega talv, 154 mm	91687	5518	551,8	4966,2	49

Oslo lennujaamas oli lumijahutuse koguseks määratud 3 GWh, mis oli kogujahutusest 12% tuleb nentida, et Oslo lennujaama põrandapindala on 265 000 m² [6]. Tallinna lennujaama reisiterminali pindala on 34 456 m² [17]. Pindalade erinevus on 7,7 korda. Teadmata küll Tallinna Lennujaama tarbimisi või hoone eripärasid võib siiski üsna kindlalt järeldada, et kui 3 GWh jahutusenergiat Oslo lennujaamas on 12% kogujahutusenergiast, siis Tallinna Lennujaamas oleks lumijahutuse osakaalu number kordades suurem. Keskmise lumega talve puhul oleks Tallinna lennujaama asfalteeritud pindade puhastamisega 3,6 GWh väärtuses lund võimalik kokku koguda. Taaskord lahendaks uue kontseptsiooniga lumijahutussüsteem mitte ainult jahutusega seotud probleemi vaid ka säästaks keskkonda. Lume kogumiseks on üks kindel koht, kus ka jäätõrjevahenditega saastunud lumi ei reostaks sulamisel keskkonda, vaid sula on võimalik juhtida reoveekanaliseerimisele. Süsteemi toimimist ei pärsi lumme sattuvad

muldkehad ning ei ole vaja ehitada eraldi filtersüsteemi, sest jahutus toimub läbi lume mahuti põranda/põhja. Sulavesi ei liigu läbi jahutustorustiku seega ka jahutusüsteemil ei ole korrosiooniohtu.

KOKKUVÕTE

Eesti geograafiline asukoht võimaldab kasutada jahutuseks aastaegadest tulenevat jaheda perioodi eripära - lund. Talvel maha sadav lumi on suure jahutuspotentsiaaliga, kuna selle erisoojus on küllaltki kõrge, võrreldes teiste enamlevinud materjalidega. Riikides, kus leidub lund on rajatud lumijahutusüsteeme. Lähimad Eestile, mida selles uurimustöös mainitud, on Rootsi ja Norra ja nagu nendes riikides on ka meil väga head tingimused, et ka endale rajada taoline süsteem. Käesoleva uurimustöö autor on proovinud lumijahutusüsteemi edasi arendada ning väljapakutud kontseptsioon on töös kirjeldatud süsteemidest tõhusam, töökindlam ning ka lihtsama ülesehitusega. Efektivsemaks toimiseks ei piisa ainult suurest soojusvahetuspinnast, vaid vaja on ka lumi paremini isoleerida väliskeskkonna eest, kus soojast temperatuurist ja vihmadest tekib sulamine. Sellest tulenevalt on võrreldud erinevaid isoleerimis lahendusi ning välja pakutud ka autori poolne isolatsioonilahendus. Võrreldes seda palju kasutatud puitlaastudega tuleks pakutud lahendus odavam ning tõhusam, kuid siiski tekib ladustamisega seotud probleem, mille peaks iga taolise kattematerjali omanik ise lahendama. Lumijahtuse rajamise kasuks räägib iga aastane vältimatu lume tänavatelt ja teedelt kokku kogumine, et meie infrastruktuur toimiks sujuvalt. Tallinna linnaruumist kokku kogutav lumi on saastunud ning sulamisel imuvad pinnasesse ja ümbritsevasse veekogudesse saasteained. Seega ei ole head kohta, kuhu lund viia ilma, et ei tekiks reostust. Töös väljapakutud uudne kontseptsioon lumijahutusest lahendaks reostusprobleemi, kuna lumi kogutakse ühte kindlasse kohta ja sulavesi on võimalik juhtida sobivaimasse kanalisse. Samuti on sulamisel välja ilmuv prügi ühes kohas ja kergesti kokku kogutav. Lume kokku kogumiseks rajatava maardla põhja tuleb lisada väga lihtsa ehitusega soojusvaheti ning jahutamist on võimalik rakendada ükskõik millisel viisil. Tegu on põrandakütet meenutava süsteemiga, kuid betoonplaati juhivat vett jahutatakse pinnal oleva lume ja sulavee abil. Töö autorile teadaolevalt ei ole sellist süsteemi katsetatud. Küll aga on proovitud vastupidist efekti saavutada, plaati suunatud vett pole proovitud otseselt jahutada vaid hoopis kiirendada lume sulamist plaadi pealispinnalt. Selliseid lahendusi on proovitud talviste teeolude puhul lume ja jää sulatamiseks.

Lumijahutus sobiks näiteks kaugjahutuse osana, toetades eesmärki, saavutada efektiivne „roheline“ ja Euroopa Liidu direktiividele vastav jahutusüsteem. Ainult lumega ei ole võimalik ära katta kogu jahutusvajadust, kuid see sobib väga hästi üheks süsteemi osaks kombineerides seda olemasolevate kaugjahutus lahendustega nagu merejahutus. Edasi oleks vaja uurida kuidas kokku kogutud lund paremini kaitsta loomuliku sulamise eest. Samuti tuleks uurida võimalust kombineerida omavahel mereveega ja lumega jahutus. Seda selleks, et merevee jahutuse rajamine ei osutuks liiga kalliks ning

rajatavad vabajahutused hoopis toetaksid teineteist. Näiteks sobiks merevesi teatud temperatuurini eeljahutama lumijahutusse tagastatavat vett, millest tulenevalt kuluks lumega jahutamiseks vähem lund ning lumi säiliks pikemalt jahutushooaja vältel.

Lumijahutuse märkimisväärseim puudujääk on arvatavasti suure pindala vajadus. Kuid lund soovitataksegi säilitada pigem sügaval ning seestõttu võib lume maardlate kuju muuta.

Samuti tasuks uurida, kui palju lund tegelikult on võimalik talve jooksul kokku koguda ning kui palju sellest moodustaks eraisikute kogutud lumi.

Lõpetuseks, oleks väga huvitav ka katsetada, kas väljapakutud lumijahutuse kontseptsioon on efektiivsem, kui selle eelkäijad.

SUMMARY

Geographical location of Estonia provides a specific cooling substance due to cool periods – snow. The snow that falls in winter has a great cooling potential, as its specific heat is quite high compared to other common materials. Countries with snow, have set up snow cooling systems. The closest to Estonia, mentioned in this research, are Sweden and Norway and like these countries, we also have very good conditions to build such a system. The author of this research has tried to develop further the snow cooling system and the proposed concept is more efficient, reliable and also has a simpler structure compared to the systems described in the paper. For more effective operation, not only a large heat exchange surface is enough, but it is also necessary to insulate better the snow from the external environment, where melting occurs due to warm temperatures and rain. As a result, different insulation solutions have been compared and the author's insulation solution has also been proposed. Comparing it with the wood shavings that are used a lot, the proposed solution should be cheaper and more efficient, but there is still a problem related to storing of insulation, which should be solved by owner of such covering material. In favor of the establishment of snow cooling, every year the unavoidable collection of snow from the streets and roads to keep our infrastructure running smoothly speaks for itself. The snow collected from the urban area of Tallinn is contaminated, and when it melts, pollutants seep into the soil and surrounding water bodies. Due to that, there is no good place to bring snow without polluting environment. The new concept of snow cooling proposed in the work would solve the pollution problem, as the snow is collected in one specific place and the melt water can be directed to the most suitable channel. Also, the garbage that appears during melting is in one place and can be collected easily. In order to collect snow, a heat exchanger with a very simple construction must be built to the bottom of the deposit and cooling can be applied in a necessary way. System is similar to underfloor heating but the water directed to the concrete slab is cooled by the snow and melt water on the surface. As far as the author of the work is aware, such a system has not been tested. However, attempts have been made to achieve the opposite effect, not to directly cool the water directed to the plate, but instead to accelerate the melting of snow from the top surface of the plate. Such solutions have been tried for melting snow and ice on winter roads. Snow cooling would be suitable as part of district cooling, supporting the goal of achieving an efficient "green" cooling system that complies with European Union directives. It is not possible to cover all the cooling needs with snow alone, but it is very suitable as a part of the system, combining it with existing district cooling solutions such as sea cooling. Further, it would be necessary to study better protecting the collected snow from natural melting. The possibility of combining cooling with seawater and snow should also be

explored. It would benefit the construction of seawater cooling as it would not turn out to be too expensive, and the free cooling systems instead support each other. For example, seawater would be suitable for pre-cooling the returning water in the snow cooling system to a certain temperature, as a result of which less snow would be needed for cooling and the snow would be preserved longer during the cooling season.

The most significant shortcoming of snow cooling is probably the need for a large area. However, it is recommended to store the snow rather deep and therefore the shape of the snow deposits can be adjusted.

It would be also worth investigating how much snow can actually be collected during the winter and how much of it would be collected from private individuals.

Finally, it would be very interesting to test whether the proposed snow cooling concept is more effective than its predecessors.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Victor Llonch, "Preliminary Design of a Snow Storage Cooling System for a Poultry House Placed in Quebeck," 2019.
- [2] Venkatesh K. Chinraj, "Sustainability Evaluation of Seasonal Snow Storage for Building Cooling Systems: a Life Cycle Approach," THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, 2015.
- [3] Kjell Skogsberg, "Seasonal snow storage for space and process cooling," Luleå University of Technology, Sweden, 2005.
- [4] Tsutomu Nagata, Hideki Kubota, Takayuki Ono, Yoshiaki Hashimoto, Yasuhiro Hamada, "Study on a snow storage system in a renovated space," *Elsevier Ltd, Renewable Energy*, vol. 41, pp. 401-406, 2012.
- [5] Qin Da-He, Ren Jia-Wen, Wang Fei-Teng, Wang Xing, "Numerical estimation of thermal insulation performance of different overage schemes at three places for snow storage," *Advances in Climate Change Research*, vol. 12, no. 6, pp. 903-912, 2021.
- [6] Jesper Moe, "Using stored snow as cooling at Oslo airport, Norway," *Civil Engineering*, vol. 171, no. CE5, 2018.
- [7] Eveli Tõniste, "Lumega Jahutamise Potensiaal Tallinnas, Magistritöö," 2016.
- [8] Tanel Kirs, Igor Krupenski, Aleksander Ledanov, Kertu Lepiksaar, Anna Volkova, Henrik Pieper, "Efficient use of heat from CHP distributed by district heating system," *ScienceDirect*, no. 17th International Symposium on District Heating and Cooling, 2021.
- [9] Anna Volkova, Aleksandr Hlebnikov, Aleksandr Ledvanov, Tanel Kirs, Urmas Raudsepp, Eduard Latõšov, "District Cooling Network Planning. A Case Study of Tallinn," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 43, pp. 63-78, 2022.
- [10] Tallinna linn, "Tallinn," 2022. [Online]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/uudis/tallinn-otsib-kohti-lume-ladustamiseks>. [Accessed December 2023].
- [11] Tallinna Linnavolikogu, "Riigiteataja," 2021. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/416062021001>. [Accessed dec 2023].
- [12] Tallinna Linnavolikogu, "Tallinna sademevee strateegia aastani 2030," 2012.

- [13] Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalamet, "Tallinn.ee," 2023. [Online]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/lumi>. [Accessed December 2023].
- [14] Aleksandr Ledvanov, "Ülemiste City Kaugjahutuse Arengukava (Lõputöö)," Tallinna Tehnikaülikool, 2021.
- [15] Tallinna Lennujaam AS, "Tallinna Lennujaam," [Online]. Available: <https://www.tallinn-airport.ee/arikliendile/lennujaama-rajatised-ja-tehnilised-andmed/>. [Accessed 01 2024].
- [16] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi avalik dokumendiregister," 18 01 2023. [Online]. Available: <https://adr.rik.ee/mkm/dokument/13723156>.
- [17] Tallinna Lennujaam AS, "Tallinna Lennujaama Aastaaruanne 2020," 2020.
- [18] Tallinna Lennujaam AS, "Tallinna Lennujaama Aastaaruanne 2022," 2022.
- [19] Järva Teataja, "Järva Teataja nr 9, 21 Jaanuar 1938".
- [20] Mohamed Grein, Mohamed Kharseh, Bo Nordell, "Large-scale Utilisation of Renewable Energy Requires Energy Storage," 2007.
- [21] C. Gerow, "The Potential District Cooling Applications of Snow Storage," Researchgate, 2016.
- [22] Metsatukk, "Metsatukk," [Online]. Available: <https://metsatukk.ee/blogi/hakkepuidu-hind/>. [Accessed Detsember 2023].
- [23] Metsaost, "Metsaost," [Online]. Available: <https://metsaost.eu/hakkepuidu-muuk/hakkepuidu-hind>. [Accessed Jaanuar 2024].
- [24] Statistikaamet, "Statistikaamet," [Online]. Available: <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/tooelu/palk-ja-toojoukulu/keskmine-brutokuupalk>. [Accessed Jaanuar 2024].
- [25] J. W. Pomeroy and E. Brun, "Physical properties of snow," *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, vol. 45, p. 118, 2001.
- [26] Zhihao Chen, Huajun Wang, "Study of critical free-area ratio during the snow-melting process on pavement using low-temperature heating fluids," *Energy Conversion and Management*, pp. 157-165, 2009.

- [27] Joscha Reber, Rouven Zeus, Miriam Schuster, Nadja Bishara, Kirschstein Xenia, "Modelling of Floor Heating and Cooling in Residential Districts," *Energies* 16, 2023.
- [28] Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalamet, "Tallinn.ee," 2023. [Online]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/lumi/talihoolduse-nadalakokkuvotted>. [Accessed December 2023].
- [29] Keskkonnaagentuur, "ilmateenistus.ee," [Online]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/>. [Accessed 01 2024].
- [30] Teet Tark, Targo Kalamees, "Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine," Tallinn, 2012.
- [31] O3 TECHNOLOGY OÜ, "o3.ee," [Online]. Available: <https://o3.ee/uлекуumenemine/>. [Accessed 01 2024].
- [32] Yu-jie Xu, Shi-jie Zhang, Yun-han Xiao, "Modeling the dynamic simulation and control of a single effect LiBr–H₂O absorption chiller," *Applied Thermal Engineering*, vol. 107, pp. 1183-1191, 2016.
- [33] Utilitas, "Keskkonnasõbralik ja energiasäästlik kaugjahutus tõstab pead," 2020.
- [34] Google, "Google Maps," [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>. [Accessed 01 2024].