



Lumen ja jään hyödyntäminen veden varastointiin Suomen olosuhteissa

Katsaus lumen ja jään varastointitekniikoihin

Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Biotalouden ratkaisut

Kevät 2026

Pekka Parkkila

Koulutus Biotalouden ratkaisut YAMK

Tekijä Pekka Parkkila

Vuosi 2026

Työn nimi Lumen ja jään hyödyntäminen veden varastointiin Suomessa

Ohjaaja Tuija Pirttijärvi

Ilmastonmuutoksen seurauksena Suomessa esiintyvien kuivuusjaksojen ennakoidaan voimistuvan erityisesti kasvukauden alussa, mikä lisää maatalouden kasteluveden tarvetta etenkin Etelä- ja Lounais-Suomessa. Samanaikaisesti suuri osa vuotuisesta sadannasta kertyy kasvukauden ulkopuolella. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kryösfääriin, erityisesti lumen ja jään, hyödyntämistä kasteluveden varastoinnissa osana kuivuusriskien hallintaa Suomen olosuhteissa.

Työn tavoitteena on koota kirjallisuuteen perustuva teoriapohja lumen ja jään varastointiin käytetyistä menetelmistä, arvioida menetelmien soveltamisen reunaehdoja Suomessa sekä tuottaa laskentaesimerkkejä, joiden avulla voidaan arvioida menetelmien teknistä ja taloudellista toimivuutta. Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jonka pohjalta laskettiin kunkin lumen ja jään varastointimenetelmästä lasketaan mitoitus- ja kustannuslaskelmat. Työssä keskitytään lumen varastointiin, keinotekoisin jäätiköihin sekä lumiaitoihin, joita tarkastellaan kasteluveden varastoinnin näkökulmasta.

Lumen varastoinnin osalta analysoidaan lumen kertymistä, keruumenetelmiä ja varastointirakenteita sekä lumen sulamisen hallintaa eristysratkaisuilla. Laskentaesimerkkien perusteella osoitetaan, että jo ohuilla eristeroksilla voidaan merkittävästi hidastaa lumen sulamista ja ajoittaa sulamisvesien vapautuminen keväästä keskikesään. Näin ollen lumen varastointi mahdollistaa kasteluveden tuottamisen ilman mittavia maanrakennustoimenpiteitä. Pelloilta kerättävän luonnonlumen todetaan olevan kustannuksiltaan erittäin edullinen kasteluveden lähde, mikäli paikalliset olosuhteet mahdollistavat toimenpiteen käyttämisen.

Keinotekkoisten jäätiköiden osalta tarkastellaan erityisesti jäätupa-rakenteita ja perustamisen mahdollisuuksia eteläisen Suomen talviolosuhteissa. Laskennallisten tarkastelujen perusteella todetaan, että talvien pakkastuntien määrä mahdollistaa jään muodostamisen, mutta merkittäviksi reunaehdoiksi nousevat pumppauksen energiankulutus, sekä putkistojen jäätymisriskit.

Lumiaitojen osalta osoitetaan, että tuuliolosuhteiden ja lumen kulkeuman perusteella on mahdollista kerätä merkittäviä lumimääriä passiivisesti erityisesti avoimilla peltovaltaisilla alueilla. Menetelmällä on suuri lumenkeruupotentiaali, mutta edellyttää huolellista suunnittelua ja runsaslumisia talvia.

Johtopäätöksenä todetaan, että lumen varastointi on Suomen olosuhteissa teknisesti ja taloudellisesti varteenotettava keino kasteluveden varastointiin erityisesti kuivuudelle alttiilla alueilla. Menetelmillä on selkeästi määrittävät käyttöedellytykset ja soveltuvat käyttökohteet. Menetelmien avulla voidaan hyödyntää kasvukauden ulkopuolella kertynyttä vettä ilman suuria infrastruktuuri-investointeja. Opinnäytetyö toimii keskustelun avaajana lumen ja jään laajemmalle hyödyntämiselle vesienhallinnassa sekä pohjana jatkotutkimuksille ja käytännön pilottikokeille.

Avainsanat Lumen varastointi, keinotekoiset jäävarastot, veden varastointi, kuivuus,

Sivut 73 sivua

DP Bioeconomy solutions
Author Pekka Parkkila
Subject Using Snow and Ice as a Water Storage Method in Finland
Supervisors Tuija Pirttijärvi

Year 2026

As a result of climate change, drought periods occurring in Finland are expected to intensify, particularly at the beginning of the growing season. This increases the need for irrigation water in agriculture, especially in southern and south-western Finland. At the same time, a large share of the annual precipitation accumulates outside the growing season. This thesis examines the utilisation of the cryosphere—specifically snow and ice—as a means of storing irrigation water to support drought risk management under Finnish environmental conditions.

The aim of the study is to compile a literature-based theoretical framework on methods used for snow and ice storage, to assess the boundary conditions for their implementation in Finland, and to produce calculation examples for evaluating the technical and economic feasibility of these methods. The research is conducted as a literature review, supplemented with dimensioning, and cost calculations. The work focuses on snow storage, artificial glaciers, and snow fences, which are examined from the perspective of irrigation water storage.

With respect to snow storage, snow accumulation, collection methods, storage structures, and the control of snowmelt using insulation solutions are analysed. Based on the calculation examples, it is demonstrated that even relatively thin insulation layers can significantly slow down snowmelt and allow meltwater release to be regulated from spring to mid-summer. Consequently, snow storage enables the provision of irrigation water without extensive earthworks. Natural snow collected from fields is found to be a highly cost-effective source of irrigation water, provided that local conditions allow its utilisation.

Regarding artificial glaciers, particular attention is given to ice stupa structures and their feasibility under winter conditions in southern Finland. Based on the calculations, it is concluded that the number of freezing hours during winter is sufficient to enable ice formation; however, significant constraints arise from the energy consumption of pumping and the risk of freezing in pipelines.

In the case of snow fences, it is shown that, based on wind conditions and snow transport, substantial amounts of snow can be collected passively, especially in open, field-dominated areas. The method has a high potential for snow accumulation but requires careful planning and winters with abundant snowfall.

In conclusion, snow storage is found to be a technically and economically feasible method for irrigation water storage under Finnish conditions, particularly in areas susceptible to drought. The methods have clearly defined prerequisites and suitable application contexts. By utilising these methods, water accumulated outside the growing season can be harnessed without major infrastructure investments. This thesis is an opening for broader utilisation of the cryosphere in water management and as a basis for further research and practical pilot projects.

Keywords Artificial glaciers, Snow harvesting, irrigation water, Climate adaptation
Pages 73 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tutkimusmenetelmät	2
2.1	Kirjallisuuskatsaus	2
2.2	Kustannushyötyanalyysi	4
3	Ilmastonmuutoksen vaikutus kuivuuteen Suomessa	5
4	Kryösfääriin hyödynnys kuivuusriskien hallinnassa	10
5	Lumen varastointi	11
5.1	Lumen kertyminen	12
5.2	Varastointirakenteet	14
5.3	Lumen keruu varastoihin	15
5.3.1	Lumen keruu pellolta	16
5.3.2	Tykkilumen muodostaminen	18
5.4	Varastoituneen lumen sulaminen	20
5.4.1	Esimerkkilaskelma lumen sulamisesta	25
6	Keinotekoiset jäätiköt	28
6.1	Keinotekoisien jäätikön perustaminen	30
6.2	Keinotekoisien jäätikön esimerkkilaskelma	39
6.3	Keinotekoisien jäätiköiden yhteenveto	44
7	Lumiaidat	46
7.1	Lumiaitojen suunnittelu	46
7.2	Kerättävän lumen määrän arvioiminen	56
7.3	Esimerkki lumiaitojen hyödyntäminen Suomessa	58
7.4	Lumiaitojen kustannushyötyanalyysi	60
7.5	Lumiaitojen hyödyntämisen yhteenveto	63
8	Tulokset	64
9	Pohdintaa	68
	Lähteet	70

Kuvat

Kuva 1. Kartta Suomen kunnista, jossa jokaiselle on annettu kuivuushaavoittuvuusindeksin mukainen arvo. (Snellman & Todorovic, 2023b).....	6
Kuva 2. Kaavio Varsinais-Suomalaisten jokien virtaamien kuukausikeskiarvoista m ³ /s vaihtelevin ajanjaksoin. Tiedot noudettu Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä hydrologisen tiedon portaalista HYD-valikosta (SYKE, 2025).....	9
Kuva 3. Varastoitua lunta Tampereen Kaupin urheilupuistossa. (Parkkila, 2025).....	12
Kuva 4. Lumen vesiarvon ennusteet Kolsin voimalaitoksella syyskuussa 2025. (Vesistömallijärjestelmä, 2025)	13
Kuva 5. Roudan ja lumen syvyys Kokemäki 31.1.2026 (Syke, 2026)	14
Kuva 6. Lumen eri varastoinnin muodot Skogsberg (2005) mukaan.	14
Kuva 7. Havainnollistus lumen keruun järjestelyistä, ajolinjoista ja varaston sijoittumisesta. Taustakartta haettu Maanmittauslaitos (n.d.)	17
Kuva 8. Lumivaraston sulamisnopeuteen vaikuttavat tekijät. Kuvan tekstit käännetty suomeksi. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.46).....	20
Kuva 9. Jäävarastojen tyypit suomennettu (Nüsser ym, 2019, s.1332) mallin mukaan.....	29
Kuva 10. Oerlemansin (2021) mukaan lasketut jään muodostumisen kehitys kevättalville 2020–2025.	37
Kuva 11. Keinotekoisien jäätikön laskentaesimerkin periaatekuva	40
Kuva 12. Lumen kerääntymisen muuttujia. Kuva Suomennettu Tablerin 2003 kuvaajan pohjalta. (Tabler, 2003, s.35).....	47
Kuva 13. Esimerkkikuva tuuliruususta (Ilmatieteen laitos, n.d.-b)	48
Kuva 14. Wyoming tyyppinen aita, jonka huokoisuus on 50 %. Suluissa olevat arvot ovat millimetreinä (Tabler,1991, s. 34).....	53
Kuva 15. Elävän lumiaidan keräämä kinos (Tabler, 2003, s. 135).....	54

Taulukot

Taulukko 1. Keskimääräinen sulamisnopeus laskenta-ajalta.....	27
Taulukko 2. Pakkastuntien lukumäärä Kokemäen Tulkkilan mittausasemalla (Ilmatieteen laitos, n.d.-a)	32
Taulukko 3. Jäästupan massalaskennassa käytetyt arvot ja niiden lähteet	36
Taulukko 4. Esimerkkilaskennalla saadut jäämassat 2020-luvun säätiedoista	38
Taulukko 5. Eri alueiden arvojen keskiarvoja ja keskihajontojen vertailu talvella 2021	39
Taulukko 6. Esimerkissä tarvittavat paineen laskennat	42
Taulukko 7. Esimerkki jäästupan materiaalikustannukset.....	43

Taulukko 8. Esimerkki jäästupan työkustannukset	43
Taulukko 9. Lumen siirtymisen kulkeutuminen vertikaalinen jakautuminen prosentteina eri tuulen nopeuksilla. Taulukko suomennettu Tablerin esimerkistä. (Tabler,1991, s.19).....	51
Taulukko 10. Taulukko lumiaidan alalaidan aukkojen koosta (Tabler, 1991, s. 31).....	52
Taulukko 11. Teoreettisen lumiaidan lumenkeruupotentiaalin laskentaa 2020-luvun keskimääräisillä vesiarvoilla (Syke 2025).....	60
Taulukko 12. Elävän lumiaidan perustamiskustannukset	62
Taulukko 13 Lumen ja jään varastoinnin suuntaa antavat hinnat per 1000 m ³ varastoitua vettä.....	65
Taulukko 14 Eri menetelmien hyvät- ja huonot puolet sekä reunaehtoja	67

Kaavat

Kaava 1. Vesitaseyhtälö.....	7
Kaava 2. Lumivaraston sulamisnopeus (Lintzén & Knutsson, 2018, s.48).....	20
Kaava 3. Lämpövirta maaperästä, Q_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48–49).....	21
Kaava 4. Sulaneen lumen määrä pohjasulamisen vuoksi, v_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss. 48–49).....	21
Kaava 5. Pohjasulamisen vuoksi sulaneen lumen kokonaismäärä määrä v_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48–49).....	22
Kaava 6. Pintasulamisen lämpövirta, Q_{surface} (Lintzén & Knutsson 2018, ss.49–50)	23
Kaava 7. Sulaneen lumen määrä pintasulamisen vuoksi, v_{surface} (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50)	23
Kaava 8. Sateen aiheuttaman sulamisen vaikutus (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50).....	24
Kaava 9. Jäästupan pohjan pinta-ala	32
Kaava 10. Jäästupan sivupinta-ala	32
Kaava 11. Jää massan muutos (kg/h) (Oerlemans ym, 2021, s.3009)	33
Kaava 12. Aurinkoenergian nettovirta F_{sol} (J/s) (Oerlemans ym, 2021, s.3009).....	33
Kaava 13. Pitkäaaltoisen säteilyn nettovirta F_{lw} (J/s) (Oerlemans ym., 2021, s.3009)	34
Kaava 14. Turbulenttinen lämpövirta F_{H} (Oerlemans ym., 2021, s.3009)	34
Kaava 15. Turbulentti latenttilämpö (sublimaatio) F_{L} (Oerlemans ym., 2021, s.3009).....	35
Kaava 16. Pumppaukseen tarvittava paine	40
Kaava 17. Painehäviön kaava (Pumppulohja Oy)	41
Kaava 18. Kitkatekijä f (Pumppulohja Oy)	41
Kaava 19. Reynoldsin luvun laskenta Re (Pumppulohja Oy).....	41
Kaava 20. Veden virtausnopeus putkessa V (Pumppulohja Oy).....	42
Kaava 21. Lumen kulkeuma tuulidatan perusteella alle viiden metrin korkeudessa Q_{0-5} (Tabler, 2003, s.30).....	49

Kaava 22. Kulkeutuvan lumen vesiarvo (Tabler, 2003, s. 35).....	49
Kaava 23. Kulkeutuvan lumen haihduntahäviö Q_{evap} (Tabler, 2003, s. 35)	50
Kaava 24. Kausiluonteinen lumen kulkeuma Q_t (Tabler, 2003, s. 36).....	50
Kaava 25. Lumiaidan maksimitilavuus Q_c (Tabler, 2003, s. 59)	56
Kaava 26. Maksimikapasiteetti 50 % huokoisuuden aidoille (Tabler, 2003, s.111)	56
Kaava 27. Lumiaidan pidätystehokkuus E (Tabler, 2003, s. 70).....	57
Kaava 28. Koko talven lumikertymä E_{ave} (Tabler, 2003, s. 71)	57
Kaava 29. Keskimääräinen varastointitehokkuus (E_{ave}) kun $Q_t > Q_c$	57

1 Johdanto

Suomessa etenkin alkukesän kuivuusjaksot aiheuttavat ongelmia maataloudelle. Esimerkiksi vuoden 2018 kuivuudesta johtuneiden satotappioiden määräksi arvioitiin noin 400 milj. €. (Ahopelto, 2024, s.11). Etenkin lounaisessa Suomessa vähäjärvisien vesistöjen kesäaikaiset virtaamat voivat jäädä todella pieniksi, jolloin kasteluun tarvittavasta vedestä voi tulla puute (Vesistömallijärjestelmä, n.d.). Siksi on tärkeää etsiä uusia veden lähteitä ja keinoja, joilla vettä voidaan varastoida kastelukäyttöön ilman merkittäviä lisäkustannuksia. Suuri osa Suomen sadannasta sataa kasvukauden ulkopuolella ja osa tästä vedestä sataa lumena tai on muutettavissa jääksi. Ennako-oletus on, että Suomen olosuhteet mahdollistavat lumen ja jään varastoinnin ja että sillä pystytään varastoimaan kohdealueelle vettä ilman, että joudutaan kaivamaan uusia kastelualtaita.

Tässä työssä laaditaan kirjallisuuskatsaus maailmalla käytettyihin lumen ja jään varastoinnin menetelmiin, ja kirjallisuudesta saatujen mallien avulla lasketaan kustakin varastoinnin menetelmästä esimerkkilaskelmat, joilla pyritään hahmottamaan sitä, miten vastaavia menetelmiä voisi hyödyntää Suomen ilmasto-olosuhteissa. Yksi tärkeimmistä tavoitteista on löytää niitä reunaehtoja, milloin lumen ja jään varastointi on järkevää. Tutkimusmenetelmiä käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.

Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Miten lunta ja jäätä hyödynnetään veden varastoinnissa maailmalla?
- Mitkä ovat eri menetelmien soveltamisen reunaehdot?
- Pystyykö menetelmiä hyödyntämään Suomessa?

Opinnäytetyön ulkopuolelle joudutaan rajaamaan paljon oleellisia asioita. Opinnäytetyössä käsitellään lumen muodostumista sekä kinostumista vain tarvittavin osin. Opinnäytetyössä ei käsitellä kastelu- tai pumpputekniikkaa, eikä myöskään veden haihtumista sulamisen yhteydessä.

Ennen kaikkea tämän opinnäytetyön tarkoitus on kerätä teoriapohjaa siitä, miten lunta ja jäätä voidaan hyödyntää tehostamaan kasteluvien varastointia Suomen olosuhteissa.

2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyössä käytetyt tutkimusmenetelmät olivat narratiivinen kirjallisuuskatsaus ja kustannushyötyanalyysi. Perusajatuksena oli kerätä kirjallisuuslähteiden avulla tietoa siitä, onko lumen ja jään hyödyntämisen menetelmillä käyttöpotentiaalia Suomessa. Kustannushyötyanalyysin tarkoituksena on tuoda teorialäheimmäs käytännön soveltuvuutta ja arvioida lumen ja jään varastoinnin potentiaalia ilmastollisten eroavaisuuksien valossa.

2.1 Kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyössä käytetty tiedonhaun prosessi valikoitui narratiivinen kirjallisuuskatsaus, sillä aihepiirinä lumen ja jään varastointi on verrattain vähän tutkittu ja narratiivinen kirjallisuuskatsaus, jossa oleellista on ilmiön ymmärtäminen ja joustavuus tutkimuksen edetessä. Koska tutkimusta on lumen ja jään varastoinnista rajatusti, hakutermien määrittämiselle täytyi antaa oma aikansa. (Vilkka, 2023)

Kirjallisuuskatsauksen ensimmäisessä vaiheessa hyödynnettiin Consensus AI:n deep search -toimintoa kartoittamaan mitä kaikkea tutkimustietoa löytyy lumen ja jään hyödyntämisestä maailmalla. Consensus AI on tutkimustarkoitukseen kehitetty tekoälysovellus, joka hakee ja tiivistää vertaisarvioituja tieteellisiä lähteitä. Consensus AI:n deep search ominaisuus seuraa perinteistä kirjallisuuskatsauksen kaavaa käsittelee annetun syötteen perusteella yli 1000 tutkimusta, joista se valitsee 50 oleellisinta lähdeä. Näistä 50 lähteestä Consensus AI muodostaa raportin, jossa otetaan kantaa lähteiden ja tulosten luotettavuuteen (Consensus, 2025). Ensimmäisessä vaiheessa haulla haettiin katsausta kaikesta lumen ja jään varastoinnin menetelmistä. Consensusin annettava kehoe muotoiltiin yhdessä tekoälyn kanssa vastaamaan opinnäytetyön tavoitteita.

Consensukselle annettu kehote:

I am researching methods of using snow and ice as seasonal water storage for a thesis focused on potential applications in Finland.

Please find peer-reviewed research and case studies on techniques used around the world to store water in the form of snow or ice during winter and release it later through melting.

"I am particularly interested in:

Technologies or practices that intentionally store winter snow or ice to provide water in spring or summer.

Examples from cold or mountainous regions (e.g., Scandinavia, Alps, Himalayas, Arctic regions, North America)

Different engineering or natural approaches, such as: Snow storage piles with insulation, Artificial glaciers or ice structures (e.g., ice stupas), Ice ponds or seasonal ice reservoirs, Snow harvesting or snow catchment systems, Snowpack or glacier-based water storage systems.

For each method, please summarize:

- *The principle of the method*
- *Where it is used*
- *Evidence of water storage capacity or effectiveness*
- *Key scientific papers or studies describing it.”*

Consensuksen antamasta analyysistä nousseiden lähteiden avulla selkeytyi mitä eri varastoinnin menetelmiä lähdetään tarkastelemaan. Näiden varastointimenetelmien ympärille kerättiin aineistoa helmenkasvatus menetelmällä, jossa hyvien lähteiden ympärille lähdetään rakentamaan teoriapohjaa. (Vilkkä, 2023).

Listaus Consensusukseen käytetyistä hakusanoista: *Artificial glacier, ice stupa, Ice storage, snow fence, snow storage, snow harvesting drought, cryosphere.*

Jokaisesta menetelmästä laadittiin oma kevyempi Consensus kysely, jonka kehoitteessa käytettiin edellä mainittuja hakusanoja. Kunkin näiden lähteiden lähdeluettelosta poimittiin tuoreimmat, parhaimmat ja kuvaavimmat lähteet kartoituksen lähtökohdaksi. Tästä eteenpäin tiedonhaku laajennettiin manuaalisesti internetin verkkokirjastoja ja tutkimusten lähdeviitteitä hyödyntäen. Olennaista oli löytää sellaiset lähteet, joista saadaan johdettua kunkin menetelmän toimintaperiaatteet ja laskentamallit. Kaikista käsitellyistä menetelmistä löytyi pätevät yleisteokset, jotka antoivat valmiudet esimerkkilaskentaan.

Kirjallisuuskatsaus ja esimerkkilaskennat perustuvat näiden yleislähteiden ympärille, joita täydennettiin muilla lähteillä.

Menetelmien laskentaesimerkeissä hyödynnettiin Copilot tekoälyä auttamaan kaavojen ymmärtämisessä. Jokainen kaava syötettiin ja laskettiin itse taulukko-ohjelmalla, jonka jälkeen tuloksia verrattiin Copilotin laskemiin tuloksiin, tällä pyrittiin saamaan varmuutta, että lasku on ymmärretty oikein. Tekoälyn ongelmat laskentakaavojen hallinnassa tuli työn aikana hyvin selväksi ja oikeellisuuden varmistamiseksi jokainen opinnäytetyössä esitetty laskukaava pyrittiin jäljentämään käyttämällä lähteissä esitettyjä arvoja ja laskelmia. Ongelmana oli, että lähteissä ei läheskään aina avattu kaikkea laskukaavojen muodostuksessa käytettyä dataa. Kun kaavojen oikeellisuudesta saatiin riittävä varmuus, pystyttiin määrittämään mitä tietoja Suomen olosuhteista tarvitaan. Laskentaa varten Suomen olosuhteista kerättiin talviaikaisia tilastoja 2020-luvulta valtiollisista tietolähteistä eli Ilmatieteen laitokselta ja Suomen ympäristökeskukselta.

2.2 Kustannushyötyanalyysi

Kustannushyötyanalyysissä muodostettiin kustakin opinnäytetyössä käsitellystä lumen ja jään varastoinnin menetelmästä esimerkkilaskelma, jossa haluttiin määrittää kuinka kalliiksi, tulisi kutakin menetelmää hyödyntäen 1000 m³ vesimäärän varastoiminen. Kullekin menetelmälle muodostettiin siis esimerkkitalanne, jossa hyödynnettiin kirjallisuuskatsauksen yhteydessä muodostettuja laskelmia kunkin menetelmän veden varastoinnin potentiaaleista. Näistä pystyttiin laskemaan esimerkiksi, kuinka monta pumppua vaaditaan jäätupien perustamiseen, kun tavoitteena on muodostaa 1000m³ veden varastokapasiteetti.

Eri varastoinnin menetelmien laskennassa muuttujia oli todella paljon, joka vaikeutti kustannusten vertailua. Yksi suurimmista muuttujista on lumen tiiveysaste, joka vaihteli lumitilanteesta ja varastointimenetelmästä riippuen merkittävästi. Tämän takia tuloksissa pyrittiin antamaan hintahaarukka, mikäli tuloksissa ei ole annettavana yhtä arvoa. Eri menetelmien skaalattavuus ja toimivuus riippuu merkittävästi kunkin tarkasteltavan vuoden säätiloista. Sään mukana tuoma vaihteluväli kustannuksissa edellyttäisi pidemmän tarkastelujakson huomioimista johon tässä opinnäytetyössä ei ollut mahdollisuutta.

Kustannushyötyanalyysiä varten laadittiin laskelmat investointikustannuksista ja käyttökustannuksista, joista pääpaino oli investointikustannuksissa.

Investointikustannuksia varten tiedot hankittiin vertaamalla varastointimenetelmiin ja rakenteisiin tarvittavien eri osien hintoja 2–3 eri verkkokaupan esittämistä hinnoista ja muodostettiin niistä keskiarvo.

Käyttökustannuksiksi arvioitiin sähkön ja polttoaineen kulutusta sekä huoltokustannukset, jotka poimittiin Tablerin lumiaitoja koskevasta laskelmasta ja yleistettiin myös muihin menetelmiin, jotta käyttökustannuksista saadaan yhdenmukaisempia. Todellisuudessa varaosiin ja huoltoon käytetty aika voi vaihdella suuresti, mutta tästä ei ole olemassa sopivaa lähdettä.

3 Ilmastonmuutoksen vaikutus kuivuuteen Suomessa

Tässä luvussa käsitellään, millaisia vaikutuksia ilmastonmuutoksella on Suomessa esiintyviin kuivuustilanteisiin ja kuivuuden vaikutuksista maataloussektoriin sekä kastelun nykytilaan.

Valtioneuvoston selonteko kansallisesta ilmastonmuutokseen sopeutumissuunnitelmasta vuoteen 2030 (KISS2030) - julkaisussa kuivuusriskit saivat teemana oman kappaleen. Ilmastonmuutoksen on jo pitkään todettu muuttavan ilmasto-olosuhteita myös Suomessa. Suomen vuosikeskilämpötilan ennustetaan nousevan 2–6 astetta vuosisadan loppuun mennessä ja lämmönnousun ennustetaan olevan voimakkaampaa talvella kuin kesällä. Lämmönnousun lisäksi ilmastonmuutos vaikuttaa sadantaan ja hellejaksojen pituuteen. (KISS2030, 2023, ss. 22–25)

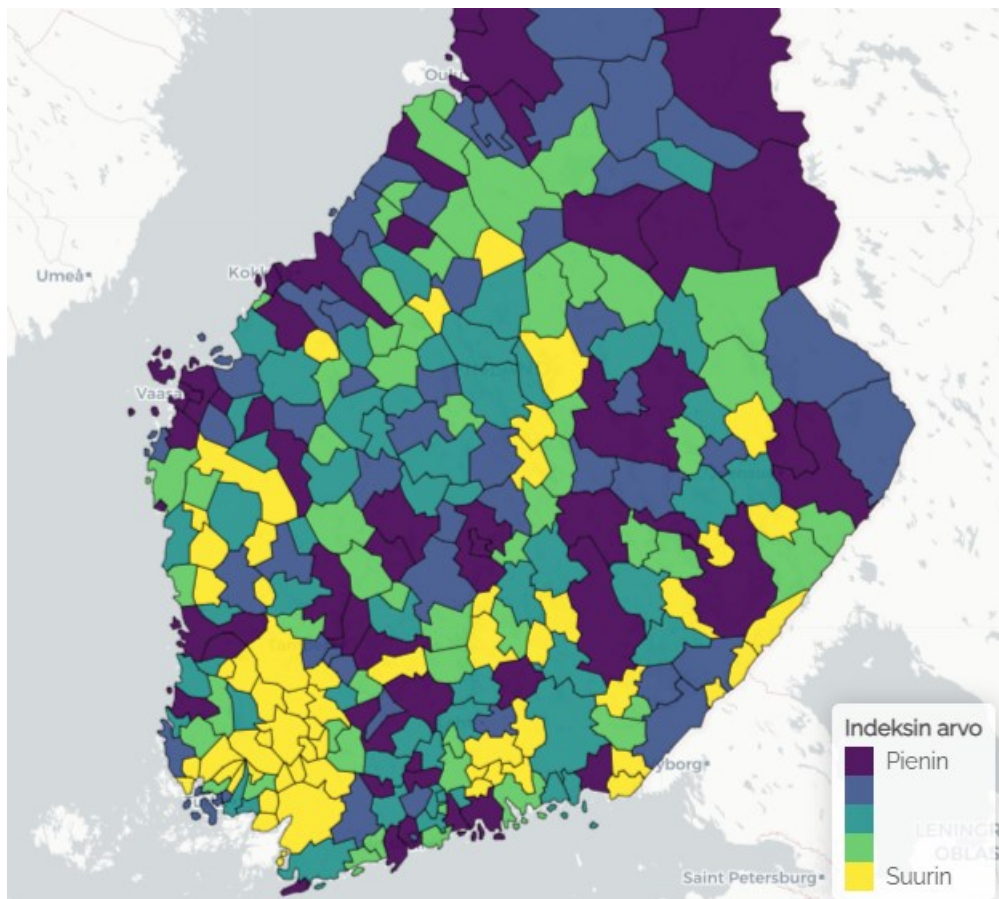
Luomaranta ym. vuonna 2025 julkaisemassa raportissa *Sateisuuden havaittuja ja ennakoituja muutoksia Suomen maakunnissa*, todetaan että Suomen vuosittainen keskimääräinen sademäärä vaihtelee nykyisin noin 400–700 mm välillä ja, että vuotuisten sademäärien ennakoidaan kasvavan 5–10 % vuosisadan loppuun mennessä. Suomen ilmastolle tyypillistä on myös suuret vuosittaiset vaihtelut. (Luomaranta ym., 2025, ss. 151–152). Tyypillistä on myös sadantaan liittyvien ääri-ilmiöiden lisääntyminen ja voimistuminen. Käytännössä kesällä tulevat rankkasateet voimistuvat, sadanta tulee talvisin useimmin lumena mutta etenkin Etelä-Suomessa lumisateiden ennakoidaan vähenevät, jolla on vaikutusta tässä opinnäytetyössä käsiteltäviin lumen ja jään varastoinnin menetelmiin. Keväisin taas sataa tyypillisesti vähiten, joka voi aiheuttaa kuivuudesta johtuvia ongelmia yhdessä kesän pitkien hellejaksojen kanssa. (Luomaranta, ym., 2025, s.9). Ahopelto ym. laatimassa *Kuivuusriskien hallinnan kansalliset suuntaviivat* julkaisussa luetellaan pitkien

kuivuusjaksojen aiheuttamia riskejä yhteiskunnan eri sektoreille: maataloudelle, vesihuollolle, metsätaloudelle, energiateollisuudelle, ympäristölle ja kansanterveydelle. (Ahopelto ym., 2024, ss.17–22)

Suomen ympäristökeskuksen *Kuivuusriskien hallinta Suomessa*-hankkeessa kehitettiin kuivuuteen liittyviä indikaattoreita. Kuvassa 1. nähdään miten, kuivuusriskeille haavoittuvinta aluetta sijaitsee Lounais- ja Etelä-Suomessa.

Kuivuushaavoittuvuusindeksissä (DVI) huomioitiin alueella eri vettä käyttävät sektorit, joille annettiin asiantuntija-arvioiden perusteella painoarvot. Lounais-Suomessa maatalouteen liittyvät kuivuushaavoittuvuusindeksin muuttujat muodostavat 70–80 % kokonaisindeksin arvoista (Snellman & Todorovic, 2023, s.12)

Kuva 1. Kartta Suomen kunnista, jossa jokaiselle on annettu kuivuushaavoittuvuusindeksin mukainen arvo. (Snellman & Todorovic, 2023b).



Ilmastonmuutos tuo peltoviljelylle hydrologisia haasteita. Lisääntyvät ja voimistuvat rankkasateet ja niistä sekä roudan puutteesta johtuvat liian märät pellot vaikeuttavat kylvöjen ajoittamista. Kasvukauden aikainen haihdunnan lisääntyminen lämpötilojen nousun myötä voi aiheuttaa satotasojen heikkenemistä. (KISS2030, 2023, s. 29)

Veden niukkuus aiheuttaa vuosittain jonkinasteisia satotappioita. Maailmalla kastelu on pääasiallinen keino kuivuusriskien hallinnassa, mutta Suomessa vain 3,1 % maatalousmaasta on kastelun piirissä. Kastelun kannalta oleellista on kasteluveden laatu ja määrä, joihin ilmastonmuutoksen voimistamalla kuivuustilanteilla on negatiivinen vaikutus. (Ahopelto ym., 2024, ss.18–19)

Luonnonhoidon koulutusyhdistys LUOKO ry laati vuonna 2023 Salaojayhdistys ry:n kanssa kattavan oppaan kastelusta: Kasteluopas 2023. Oppaassa esitetään menetelmät onnistuneen kastelujärjestelmän perustamiseksi. Tämän opinnäytetyön kannalta olennaisin aihepiiri on kasteluveden varastointi ja kasteluun tarvittavan vesimäärään arvioiminen. Kullakin viljelyskasvilla on oma kasteluveden tarpeensa. Olennainen maaperän kerros, josta kasvit ammentavat vettä on juuristovyöhyke. Juuristovyöhykkeen syvyys vaihtelee kasvikohtaisesti 150 cm–25 cm välillä. Tähän kerrokseen tulee lisää vettä sateen, kastelun ja kapillaarisen nousun seurauksena ja häviää evapotranspiraation eli kasvien soluhengityksen ja auringon säteilyn aiheuttaman haihdunnan seurauksena (Paasonen-Kivekäs ym, 2016, ss. 355–356; 359). Evapotranspiraation aiheuttama sadannan vaje on ollut kesäkuukausina vuosittain keskimäärin 50 mm ja 200 mm välillä (LUOKO, 2023, s.9) 2023).

Maaperään pystyy sitoutumaan vain määrätty määrä vettä. Ylimääräinen vesi muodostaa valuntoja maan pinnalle, salaojiin sekä syvempiin maakerroksiin. Tätä maaperän veden saturaatiopistettä kutsutaan kenttäkapasiteetiksi. Tilannetta, jossa haihdunnan seurauksena vettä on liian vähän kasvien hyödynnettäväksi, kutsutaan lakastumisrajaksi. Kastelulla pyritään paikkaamaan sadannan puutteita niin, että maankosteus säilyy lakastumisrajan ja kenttäkapasiteetin välillä. Maavesivaraston muutoksia kuvataan vesitaseyhtälöllä kaava 1. (Paasonen-Kivekäs ym., 2016, ss.353–355)

Kaava 1. Vesitaseyhtälö

$$\Delta S = P + K - Q - E$$

Missä:

- ΔS = maavesivaraston muutos
- P = sadanta
- K = kastelu
- Q =valunta

- E = todellinen evapotranspiraatio

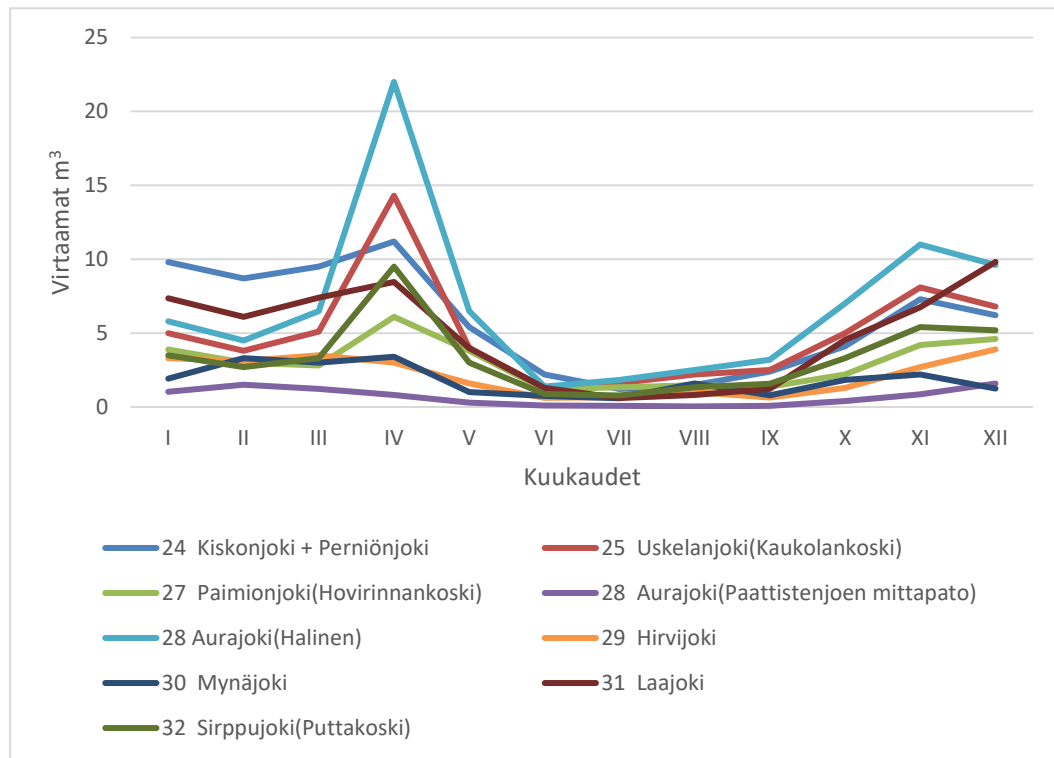
Tarvittavan kasteluveden määrän arviointiin voidaan käyttää hyväksi sääennusteita, maankosteusmittauksia, pohjaveden pinnan mittauksia ja vesitaseyhtälöä. Kastelun alkaessa tulee olla saatavilla riittävä määrä hyvälaatuista kasteluvettä. (LUOKO, 2023, ss. 18, 28)

Veden hyödynnettävyyteen ja kastelun kustannuksiin vaikuttaa peltojen etäisyys vesilähteistä. Peltonen-Sainio ym (2015) tutkivat peltojen läheisyyttä vesilähteisiin, ja totesivat että valtakunnan tasolla kolmasosa Suomen pelloista sijaitsee aivan makeavesilähteen vieressä, ja vastaavasti yksi neljäsosa yli 300 m päässä vesilähteestä. Alueelliset vaihtelut ovat kuitenkin merkittäviä. Muun muassa Varsinais-Suomessa ja Ahvenanmaalla yli 300 m etäisyydellä olevat pellot ovat suurin ryhmä. (Peltonen-Sainio ym., 2015, s. 26).

Kasteluveden varastointi voi tulla kyseeseen tilanteissa, jossa vettä ei ole luotettavasti saatavilla joko vesistön etäisyydestä tai vesitilanteesta johtuen (LUOKO, 2023, s.28). Veijalainen ym (2019) tutkimuksessa simuloitiin vuosien 1939–1942 kuivuuden vaikutuksia nykyajan Suomessa hydrologisen mallin avulla ja arvioitiin, miten ilmastonmuutos muuttaisi kuivuustilanteita tulevaisuudessa. Tulokset osoittavat, että pitkäkestoinen kuivuus voi vähentää virtaamia jopa 80 % verrattuna keskimääräisiin vuosittaisiin minimivirtaamiin. Ilmastonmuutoksen skenaariot ennustavat keskimäärin pientä laskua alimmissa vesitasoissa kuivuuden aikana. Vakava kuivuus vaikuttaisi merkittävästi vesihuoltoon ja vesivoiman tuotantoon, mikä tekee kuivuudesta riskin vesienenergian ja ruokaturvallisuuden näkökulmasta. (Veijalainen ym., 2019, s.1)

Kuvassa 2 havainnollistetaan sitä, miten Varsinais-Suomalaisten jokien luontaisesti vähäjärvillä valuma-alueilla vuodenaikaiset vaihtelut virtaamissa ovat merkittäviä. Etenkin pienempien joenhaarojen varsilla toimiville viljelijöille ei välttämättä kesäkuukausina riitä uomasta hyvälaatuista kasteluvettä, mutta virtaamat kasvavat heti kasvukauden ulkopuolella. Tiedot kuvaan 2 on noudettu Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä hydrologisen tiedon portaalista HYD-valikosta. Noudettujen arvojen mittaushistorian aikaväli vaihtelee vesistöjen ja saatavilla olevan aineiston perusteella. Aineistoja on aikaväliiltä 1938–2025.

Kuva 2. Kaavio Varsinais-Suomalaisten jokien virtaamien kuukausikeskiarvoista m³/s vaihtelevin ajanjaksoin. Tiedot noudettu Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä hydrologisen tiedon portaalista HYD-valikosta (SYKE, 2025)



Veden varastointia voidaan tehdä joko vesireittejä patoamalla tai kaivamalla varastoallas. LUOKO ry:n kasteluoppaassa on listattu vesistön padotukseen, säännöstelyyn ja vedenhankintaan liittyviä lupamaksuja, jotka vaihtelevat 3 200 €–98 000 € välillä riippuen asian käsittelyyn vaadittavista henkilötyöpäivistä. Kuivalle maalle tehtävästä varastoaltaaseen ei tarvita lupaviranomaisen lupaa. Altaan rakentamiskustannukset vaihtelevat merkittävästi riippuen altaan koosta ja toteutustavasta. Oppaan esittämässä laskelmassa hehtaarin kokoisen peltoa altaan rakentamiskustannukset oli noin 2 800 €/ha tai 8 €/m³. (LUOKO, 2023, ss.28–32)

Kastelulaitteisiin, eikä kastelualtaisiin ei ole saatavilla julkista avustusta vuonna 2026. Ilmastonmuutoksen voimistamat kuivuustilanteet ja niiden mukana tulevat satotappiot voivat antaa aiheuttaa tarvetta lisääntyville kasteluinfrastruktuurin investoinneille. (Ahopelto, 2024, ss.18–19)

4 Kryösfäärin hyödynnys kuivuusriskien hallinnassa

Kryösfääri on termi, joka kuvaa sitä osaa maan pinnasta, jossa vesi on kiinteässä muodossa eli lumena tai jäänä. 70 % maailman makeasta vedestä on sidottuna jäähän tai lumeen (WMO, n.d.).

Kryösfääri voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: maa-, vesi- ja ilmakehän kryösfääriin. Lunta ja jäätä esiintyy laajasti eri puolilla maailmaa, erityisesti pohjoisilla ja eteläisillä napa-alueilla, vuoristoalueilla sekä kylmillä ilmastovyöhykkeillä. Vuoristoalueilla lumi on tärkeä vesivaranto, joka sulaaessaan ruokkii alapuolisia vesistöjä ja on siten elinehto monilla kuivuudesta kärsivillä alueilla. (Liu ym., 2020, ss.344;347–348.)

Skogsberg & Nordell (2001) kertovat tutkimuksensa johdannossa jään hyödyntämisen historiasta, että jo muinaisesta Kreikasta tiedetään esimerkkejä jään hyödyntämisestä elintarvikkeiden säilönnässä. Perinteinen menetelmä tähän on jään kerääminen järvestä ja sen kuljettaminen varastoon, jossa sen päälle lasketaan eristeitä. (Skogsberg & Nordell, 2001, s.63) Kyseinen jään keruun menetelmä on ikuistettu myös vuonna 2013 julkaistuun piirroselokuvaan Frozen (Buck & Lee, 2013). Jään keruuta ja varastointia on hyödynnetty säilöntätarkoituksessa aina 1900- luvulle asti, jolloin pakastimet ja jääkaapit yleistyivät. Viime vuosikymmeninä jään ja lumen hyödyntämiseen on kehitetty uusia menetelmiä, joita käytetään sekä jäähdytykseen, että säilöntään (Skogsberg & Nordell, 2001, s.63).

Kuivuusriskien hallinnassa lumen ja jään kerääminen ja varastointi on ollut pitkään vakiintunut käytäntö etenkin Himalajan alueella. Johansson (2012) jakaa opinnäytetyössään ”*The Melting Himalayas: Examples of Water Harvesting Techniques*”, lumen ja jään varastoinnin kolmeen kategoriaan: Jäätiköiden perustamiseen, lumen säilöntä ja keinotekoisiiin jäätiköihin. Jäätiköiden perustamisen Johansson kuvaa menetelmäksi, jossa jäätä siirretään olemassa olevista jäätiköistä varjoisaan paikkaan yleensä pohjoisrinteille. Täällä jään tarkoitus on viilentää maata, jotta sen päälle satava lumi alkaa kertymään ja muodostamaan lisää jäätä. (Johansson, 2012, s.14). Menetelmän käyttö edellyttää jatkuvia kylmiä lämpötiloja, jotka mahdollistavat jäätiköiden syntymisen. Siksi tätä menetelmää ei käsitellä tässä opinnäytetyössä, sillä Suomessa kesäisin lämpötilat nousevat niin korkeaksi, että jäätiköiden säilyttäminen on haastavaa. Kahta muuta menetelmää käsitellään tässä opinnäytetyössä: Lumen varastointia kappaleessa 5 ja keinotekoisia jäätiköitä kappaleessa 6.

Ilmastonmuutoksella on vaikutusta lumipeitteen ja talven kehitykseen. Eteläisessä Suomessa on jo havaittavissa trendi, jossa talvisin satavan lumen määrä vähenee ja lumijakson pituus lyhenee. Trendistä huolimatta vuosittainen lumisuuden vaihtelu tulee säilymään. (Räisänen ym., 2024, s. 16.) Lumisia talvia ja pakkasta on siis odotettavissa tulevaisuudessakin ja tässä opinnäytetyössä käsitellään sitä, millä menetelmillä lunta ja jäätä voidaan hyödyntää varastoimaan vettä pidemmälle kesään. Veden varastoinnissa kiinteässä muodossa on ainakin seuraavanlaisia hyötyjä:

- Varastointi ei edellytä maansiirtotöitä
- Veden laatu säilyy parempana verrattuna altaassa olevaan veteen. (Johansson, 2012, s.12)
- Sulamista voidaan säädellä säätämällä eristeitä (Lintzen & Knutsson, 2018, s. 45)

5 Lumen varastointi

Lumen varastointi tarkoittaa lumen keräämistä ja säilyttämistä myöhempää käyttöä varten. Tämä voi olla hyödyllistä esimerkiksi talviurheilutapahtumien järjestämisessä, ruuan säilömisessä tai jäähdyyksen tarpeisiin. Lumen varastointi voi tapahtua eristetyissä kuopissa tai varastoissa, joissa lumi peitetään eristemateriaaleilla, kuten sahanpurulla tai puulastuilla, jotta sulaminen hidastuisi. (Lintzen & Knutsson, 2018, s. 45)

Johansson (2012) kertoo opinnäytetyössään muinaisesta lumen varastoinnin menetelmästä, jota hyödynnetään Iranin ja Afganistanin alueella. Menetelmässä lunta kerätään maahan kaivettuun kuoppaan, jossa lumi tiivistetään ja peitetään maalla. Kaivannon alareunaan on asennettu venttiili, josta lumesta sulanut vesi saadaan hyötykäyttöön. Johansson mainitsee, että 300 m³ lumivarasto voi palvella kymmenhenkistä perhettä jopa kahden vuoden ajan. (Johansson, 2012, ss. 12–13)

Lumen varastointi on tärkeä osa hiihtokeskusten toimintaa, sillä se mahdollistaa laskettelukauden aikaisen aloituksen ja varmistaa lumipeitteen riittävyden koko kauden ajan. Kuvassa 3 on esimerkiksi Tampereen Kaupin urheilupuistoon varastoitua lunta. Varastointimenetelmät kehittyvät jatkuvasti, ja uusia eristemateriaaleja ja -tekniikoita testataan ja otetaan käyttöön eri hiihtokeskuksissa. (Lintzen & Knutsson, 2018, s.45)

Varastoitua lunta voidaan myös käyttää rakennusten jäädytykseen kesäkuukausina. Lunta varastoidaan eristetyissä tiloissa, kuten lumiluolissa tai -kasoissa, ja sitä käytetään jäädytysjärjestelmissä, jotka kierrättävät kylmää ilmaa rakennusten sisätiloihin. (Lintzen & Knutsson, 2018, s.45)

Kuva 3. Varastoitua lunta Tampereen Kaupin urheilupuistossa. (Parkkila, 2025)



Esimerkiksi Sundsvallin sairaala Ruotsissa tarvitsee kesäisin 1000 MWh jäädytystä, ja vuodesta 2000 lähtien tätä tarvetta on täytetty kausittain varastoidulla lumella. Varastoalue on 140×60 metriä ja sen kapasiteetti on 60 000 m³ lunta. Lunta varastoidaan matalaan kuoppaan, joka on tehty vesitiiviistä asfaltista, ja lumen sulamista vähennetään peittämällä se puulastuilla. Sulamisvesi pumpataan sairaalaan jäädytykseen, ja lämmitetty sulamisvesi kierrätetään takaisin lumivarastoon. Kun kaikki lumi on sulanut, puulastut poltetaan paikallisessa lämpölaitoksessa. (Skogsberg & Nordell, 2001, s.63)

5.1 Lumen kertyminen

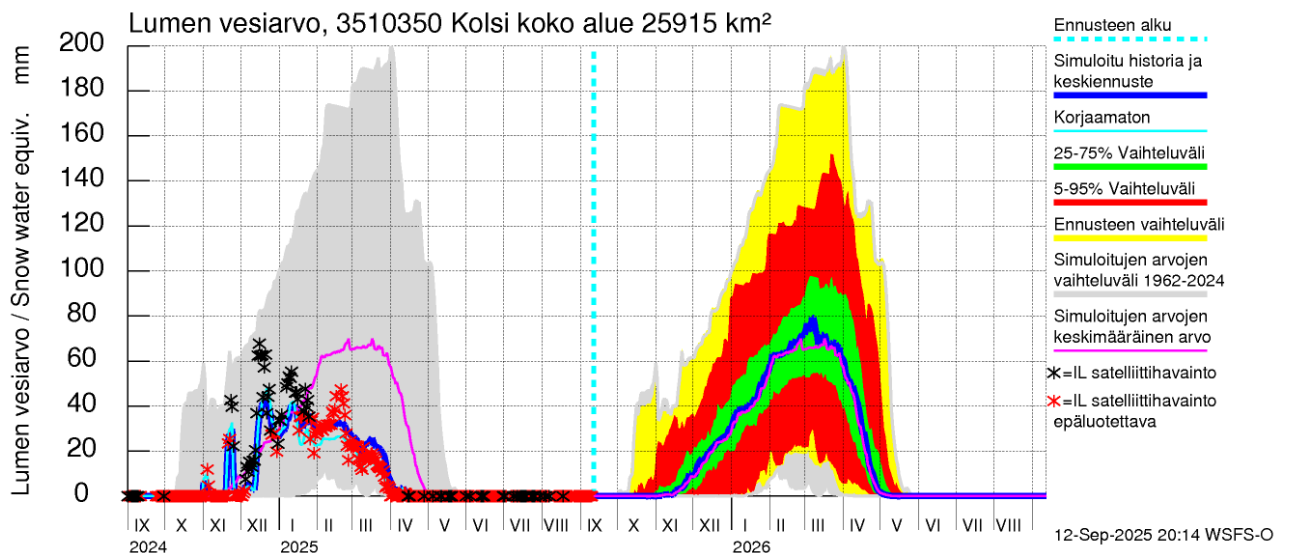
Vesi alkaa sataa maahan lumena, kun ilman lämpötila on 0°C alapuolella. Kun lumihituleet laskeutuvat maahan ne muodostavat lumihangon, joka kasvaa tai sulaa riippuen ympäröivistä olosuhteista. Lumen määrää arvioidaan määrittämällä lumen vesiarvo.

Lumen vesiarvon määrittäminen on tärkeä prosessi, joka auttaa arvioimaan lumen sisältämän veden määrää. Tämä tieto on erityisen hyödyllistä vesivarojen hallinnassa, maataloudessa ja hydrologisissa tutkimuksissa. Lumen vesiarvo, eli lumen vesiekvivalentti (SWE), määritetään mittaamalla lumen tiheys ja syvyys. (LVV, n.d.)

Suomessa lumen vesiarvon määrittämiä kerää Suomen ympäristökeskus (Syke), joka julkaisee ennusteita mm. vesi.fi-verkkosivuilla. Lumen vesiarvo kerrotaan yksikkönä $\text{mm}(\text{kg}/\text{m}^2)$. Luku kertoo siis vesipatjan korkeuden mm/m^2 , joka on syntynyt lumen sulaessa. Esimerkiksi Suomessa Harjavallan tasalla vuoden talven 2024 korkein lumenvesiarvo oli $88 \text{ mm}/\text{m}^2$. Eli $0,088 \text{ m}^3 \text{ vettä}/\text{m}^2$ eli $880 \text{ m}^3/\text{ha}$. (Syke, 2024).

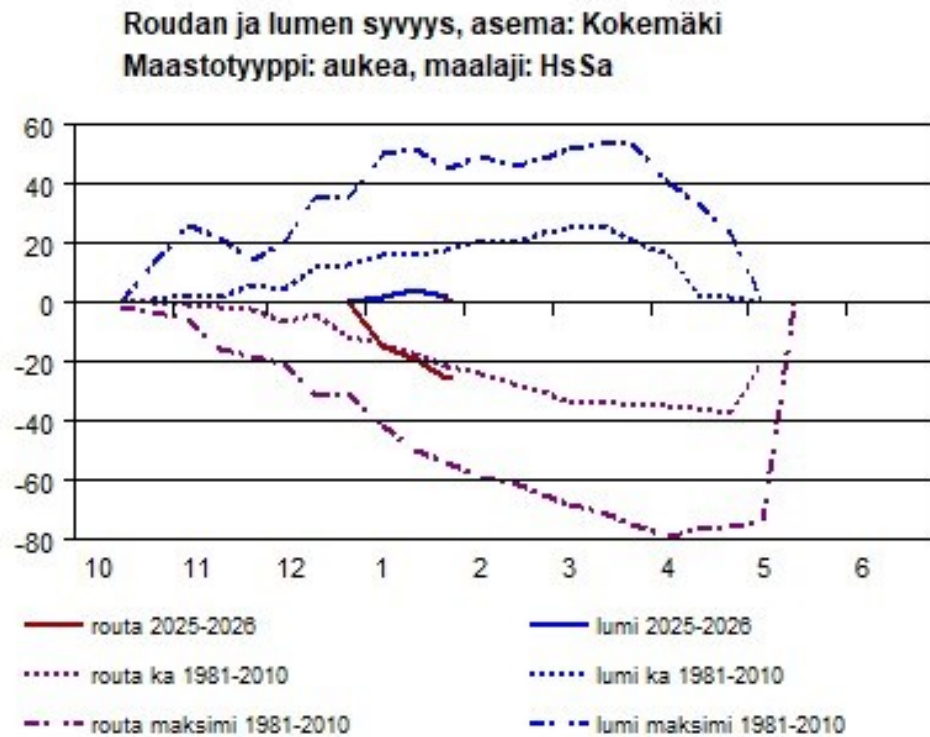
Arvion tästä hetkestä saa seuraamalla Suomen ympäristökeskuksen lumen vesiarvon ennusteita Vesi.fi sivustolta. Kuvassa 4. on esitetty Kokemäenjoella Kolsin voimalaitoksella lumen vesiarvon ennusteet ja Ilmatieteen laitoksen satelliittihavainnot. Vesi.fi tarjoaa myös tarkempia ennusteita, joista voi katsoa päivälleen koska lumen vesiarvo ennustetaan olevan talven huipussaan.

Kuva 4. Lumen vesiarvon ennusteet Kolsin voimalaitoksella syyskuussa 2025. (Vesistömallijärjestelmä, 2025)



Kuten kuvasta 4 voidaan havaita, lumen vesiarvossa simuloitu arvojen vaihteluväli on vuosina 1962–2024 ollut noin $10\text{--}200 \text{ mm}/\text{m}^2$. Roudan ja lumen muodostumista voi seurata SYKE:n tietolähteistä. Kuvassa 5 on kuvattuna Kokemäellä 31.1.2026 oleva tilanne.

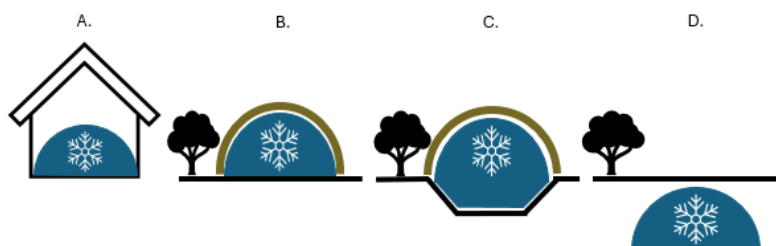
Kuva 5. Roudan ja lumen syvyys Kokemäki 31.1.2026 (Syke, 2026)



5.2 Varastointirakenteet

Lumen varastoinnin rakenteita on lukuisia erilaisia. Kjell Skogsberg 2005 käsittelee jäähdytyskäyttöön. Hän määrittelee lumen varastojen tyypit (kuva 6) neljään pääkategoriaan: A. rakennuksen sisällä oleviin, B. maanpäällisiin, C. avoimessa altaassa oleviin ja D. maan alla oleviin varastoihin. (Skogsberg, 2005, s.5)

Kuva 6. Lumen eri varastoinnin muodot Skogsberg (2005) mukaan.



Näiden lisäksi lumen varastointiin olennaisesti liittyvä kategorisointi on eristeiden käyttö. Lintzén & Knutsson 2018 käsittelevät *Snow storage – Modelling, theory and some new research* lumen varastointia ja sen hyödyntämistä erityisesti talviurheilun tarpeisiin. Lintzén & Knutsson 2018 avaa hyvin lumivaraston sulamiseen vaikuttavia eri tekijöitä ja sitä millainen vaikutus eristekerroksilla on lumivaraston sulamisnopeuteen.

Lintzén & Knutsson 2018 tulokset osoittavat, että eristettyjen lumivarastojen sulamisnopeuden arviointiin käytetty malli on hyödyllinen. Mallia voidaan käyttää erilaisten eristemateriaalien vertailuun ja eristekerroksen paksuuden määrittämiseen. Lintzén & Knutsson havaitsivat, että puupohjaiset eristemateriaalit, kuten sahanpuru ja kuori, ovat tehokkaita lämpöeristeitä, jos kerros on riittävän paksu. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että eristettyjen lumivarastojen pinta-alan minimointi voi vähentää sulamisnopeutta merkittävästi. (Lintzén & Knutsson, 2018 s.53).

5.3 Lumen keruu varastoihin

Lumen kerääminen tapahtuu joko auraamalla satanutta luonnonlunta tai keräämällä lumitykillä tehtyä keinolunta, tai luontaisesti kinostamalla esimerkiksi lumiaitojen avulla, jota käsitellään erikseen kappaleessa 7. Kaupunkien taajama-alueilta kerätty lumi sisältää runsaasti epäpuhtauksia, kuten ravinteita, raskasmetalleja, bakteereja, kiintoainesta, suolaa, öljyä ja muita orgaanisia yhdisteitä, kuten VOC- ja PAH-yhdisteitä (Pikkarainen, 2017, s. 4).

Lumesta sulavan veden uusiokäytön kannalta oleellisia ovat ne epäpuhtaudet, jotka siirtyvät suoraan valumavesiin. Näistä voidaan mainita esimerkiksi mikromuovit, joita Pikkarainen (2017) käsitteli pro gradu -tutkielmassaan. Pelloilta kerätyn lumen laadusta ei löytynyt erillistä tutkimusta.

Varastoinnin kannattavuuden laskennan kannalta on oleellista laskea keruun tai lumen tekemisen kustannukset per m³ varastoitua lunta. Tässä laskentaesimerkissä käytetään tilannetta, jossa kerätään lunta 1000 m³ vettä vastaava määrä.

5.3.1 Lumen keruu pellolta

Pellolta kerättävän lumen kustannusten laskemisessa on runsaasti muuttujia, jotka vaikuttavat kannattavuuteen. Tärkeimpänä on talvella sataneen lumen määrä, pellon muoto, sekä etäisyys lumen varastopaikkaan ja käytettävissä oleva kalusto.

Oletuksena on, että lumi kannattaa kerätä sillä hetkellä, kun sitä on talvella eniten. Lumen määrää arvioidaan lumen vesiaron (Swe) *Snow water equivalent* kautta. Arvion kulloisenkin hetken lumen vesiaron tilanteesta saa seuraamalla Suomen ympäristökeskuksen lumen vesiaron ennusteita Vesi.fi sivustolta.

Käytännössä mitä enemmän lunta on sitä vähemmän ajokilometrejä, syntyy tarvittavan lumimäärän keräämiseksi. On kuitenkin huomioitava, että lumen tiiviysasteella on suuri merkitys sille, kuinka suuria määriä lunta voidaan kerralla siirtää, etenkin jos käytettävissä oleva kalusto on pienempitehoista. Kustannusten laskennassa oletuksena on, että lumen varastointipiste on aivan keruualueen vieressä, eikä lunta tarvitse kuljettaa pidempiä matkoja, sekä että käytettävä auraus/linkouskalusto pystyy käyttämään koko ajoleveytensä kerralla hyödyksi. Pellon muodolla on suuri merkitys siihen, miten hyvin lumilingolla saa keskitettyä lumikasaa mahdollista kauhalla kuormausta varten. Kuvassa 7 on esitetty, millainen on tässä esimerkissä oletettu teoreettinen keruualue sekä ajolinjat, suhteessa varastoalueeseen.

Kuva 7. Havainnollistus lumen keruun järjestelyistä, ajolinjoista ja varaston sijoittumisesta. Taustakartta haettu Maanmittauslaitos (n.d.).



Lumen keruuseen kuluva ajassa on runsaasti muuttujia, mutta jos lasketaan työ konservatiivisella tehokkuudella, jossa työlevyettä on 2,5 m ja nopeus 5 km/h saadaan 1 ha ajoajaksi 48 min. Lisäämällä käänöksiin ja siirtymiin liittyvää ekstrapaa 25 % saadaan ajoajaksi 60 min/ha. Kasaamiseen ja kuormaukseen menee myös aikaa sillä, jos esimerkiksi 1000 m³ vesimäärä tarkoittaa 2 500–10 000 m³ lunta riippuen sen tiiviyssasteesta. Tyypillinen traktorin lumikauha on 2 m³ luokkaa, joten puhutaan jopa 1 250–5 000 kauhallisen siirtämisestä. Jos yhden kauhallisen siirtämiseen menee 40 sekuntia tämä tarkoittaa 14–56 h traktortyötä. Traktortyön hinnat poimitaan Työtehoseuran keräämästä Maatalouskoneiden urakointihinnoista 2024, joissa traktortyö kuljettajineen kustantaa 75 €/h. Omana työnä 180 kW traktori kuluttaa noin 20 l/h ja syyskuun 2025 talvilvaatuisen polttoöljyn hinta on 1,25 €/l (Työtehoseura, 2025; Hankkija Oy, 2025)

1000 m³ vesimäärää vastaavan lumimäärän keräämiseksi pellolta tarvitaan lumen vesiarvoilla 10–200 mm/m², 10–0,5 hehtaaria peltoa.

Yleistetyillä keskiarvoilla laskettuna:

- Lumen keruu
 - urakkana maksaa 38 € – 750 € keskiarvon ollessa 394 €
 - omana työnä (polttoaine) maksaa 12 €–250 € keskiarvon ollessa 131 €
- Lumen kuormaus
 - urakkana 1050 €–4200 € keskiarvon ollessa 2625 €
 - omana työnä(polttoaine) 350 € – 1400 € keskiarvon ollessa 875 €

Urakkana suoritettuna 1000 m³ vesimäärän kerääminen 1088–4950 €, jolloin 1 m³ hinnaksi per vuosi tulee 1,09–4,95 €/m³. Pelkkinä polttoainekustannuksina vastaavat luvut ovat 362–1650 € jolloin 1 m³ vesimäärän keruun hinnaksi tulee 0,36 €–1,65 €.

Lumen keruussa on runsaasti muuttujia ja tarkempien kustannuslaskelmien laatiminen edellyttäisi kenttäkokeita ja tarkempaa lumenajon mallintamista.

Huomioitavaa lumen keruusta:

- Maan tulee olla kyllin vahvassa roudassa, jotta lumen keruu pellolta ei aiheuta tiivistymishaittoja.
- Pellolla oleva talviaikainen kasvipeite voi aiheuttaa käytettävissä olevan lumitilavuuden pienemistä, mutta samalla ehkäisee auraamisesta aiheutuvia haittoja kuten tiivistymistä.
- Lumi tulee kerätä kevättalvella, kun lumen vesiarvo on suurimmillaan. Tähän poikkeuksena todella runsaslumiset talvet, jolloin käytettävissä olevan kaluston kapasiteetti tulee vastaan.
- Jotta lumen varastosta saadaan keväällä mahdollisimman paljon hyötyä, se tulee sijoittaa lähelle kasteluallasta ja se on peitettävä sulamisen hidastamiseksi.

5.3.2 Tykkilumen muodostaminen

Olennaista keinolumen muodostamisessa on, että lumitykit tarvitsevat luotettavan vesilähteen, sähköä sekä pakkasta. Sähköstä muodostuukin tykkilumen merkittävin kuluerä, jota kuluu sekä itse tykin toimintaan mutta myös vesipumpun pyörittämiseen.

Motivan ”*Energiatehokas hiihtokeskus*” -raportissa käsitellään tekolumen tekemistä energiatehokkuuden näkökulmasta. Raportista poimittavia asioita on muun muassa

keinolumen valmistamisessa käytettävä veden hyötysuhde eli 1 m³ vettä tulee 2,5 m³ lunta. (Motiva 2010)

Käänteisesti lunta tarvitaan siis 2500 m³. Rogstam & Dahlberg (2011) tutkivat lumen tekemisen energiatehokkuutta ruotsalaisissa hiihtokeskuksissa. Tutkimuksen tuloksissa todetaan, että moderni lumitykki kuluttaa 1,1 kWh sähköä per m³ lunta. Lunta muodostuu lumitykin tyyppin mukaan 13–34 m³/h. Lumen tuottamisen tehokkuuteen vaikuttaa ulkoilman lämpötila sekä veden paine ja lämpötila. (Rogstam & Dahlberg, 2011, s.100)

1000 m³ vesimäärää vastaavan lumimäärän tuottamiseen kuluisi siis sähköä noin 2750 kWh ja aikaa 74–192 h. Tämän lisäksi tulee kustannuksia veden pumppaamisesta, sillä kastelutarkoituksessa tuskin on järkevää käyttää vesilaitokselta ostettavaa käyttövettä.

Kuluttajasähkön hinta muodostuu:(Sähkönhinta)

- Sähkön hinta 2024 keskiarvo 5,8 snt/kWh
- Sähkön siirto
 - Energiamaksun 2024 keskiarvo 4,14 snt/kWh
 - Perusmaksu 2024 keskiarvo 14,85 €/kk. Oletetaan varastoinnin tapahtuvan 3kk ajanjakson aikana tammi-maaliskuussa
- Sähkövero 2,83 snt/kWh

Tarvittavan lumimäärän muodostamisen sähkön hinnaksi tulee per talvi:

$$2750 \times (5,8 \text{ snt/kWh} + 4,14 \text{ snt/kWh} + 2,83 \text{ snt/kWh}) + (1485 \text{ snt/kk} \times 3\text{kk}) = 39\,572 \text{ snt}$$

$$= 395,72 \text{ €}$$

Tämä tarkoittaa kasteluveden hinnaksi noin 0,4 €/m³

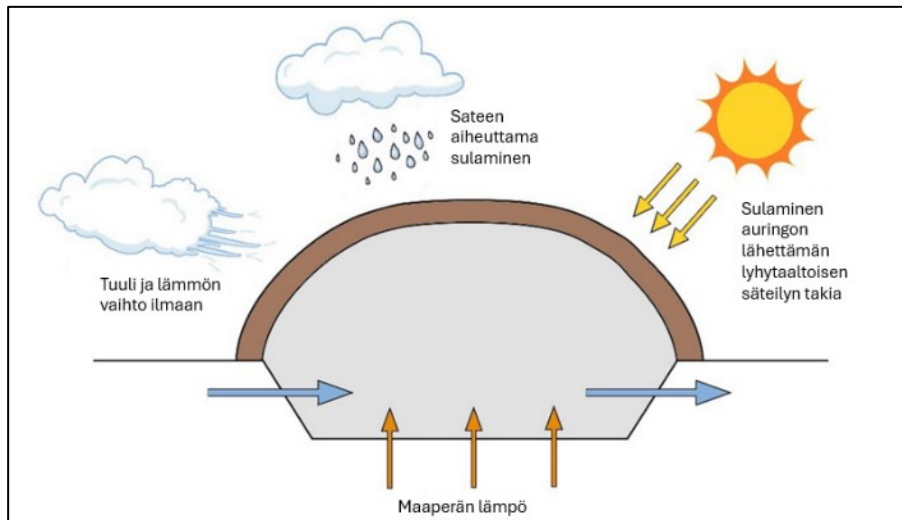
Lumitykillä varastoitavan lumen hintaan tulee huomioida myös laitteistohankinnat sillä lumitykkiä ei voida pitää normaalina maatalouskoneena. Laskelmissa käytettyä vastaavat laitteet maksavat uutena yli 20 000 € (Kauhajoki -lehti) mutta markkinoilla on myös pienempiä laitteita kuten Snowmakerin Lances tyyppiset tykit, jotka lähtevät halvimmillaan alle 1000 €, Näiden kanssa kuitenkin laskelmat ja toimivuus muuttuvat merkittävästi, sillä ne ovat vähätuottoisempia ja tarvitsevat erillisiä paineilma sekä painepesulaitteistoja toimiakseen (Snowgun, 2025).

Lumen tekeminen lumitykillä on toimiva menetelmä lumikuivina talvina. Toiminnan edellytyksenä on luotettava veden lähde, sekä varastoalueelle saatava sähkö.

5.4 Varastoituneen lumen sulaminen

Lumen ja jään varastoinnissa oleellista on kyky hallita lumen sulamista kevään yli. Tässä kappaleessa käsitellään lumen sulamisnopeuden lumivarsatoissa vaikuttavia tekijöitä. Lintzén & Knutsson (2018) listaa lumen sulamiseen vaikuttavia tekijöitä kuvan 8 mukaisella tavalla. Lumivaraston sulamiseen vaikuttaa auringon säteily, sateen aiheuttama sulaminen, tuuli ja lämmön vaihto ilmaan sekä maaperän välittämä lämpösäteily.

Kuva 8. Lumivaraston sulamisnopeuden vaikuttavat tekijät. Kuvan tekstit käännetty suomeksi. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.46)



Lintzén & Knutsson 2018 käsittelevät tutkimuksessaan lumivaraston sulamiseen vaikuttavia tekijöitä. Lumivaraston sulamisnopeutta voidaan teoreettisesti laskea kaavalla:

Kaava 2. Lumivaraston sulamisnopeus (Lintzén & Knutsson, 2018, s.48)

$$V_{tot} = V_{ground} \times V_{surface} \times V_{rain}$$

Missä:

- V_{ground} = pohjasulaminen
- $V_{surface}$ = pintasulaminen

- $V_{\text{rain}} = \text{sateen mukanaan tuoma lämpö}$

Alla käsitellään kutakin näitä muuttujaa erikseen. Kaavat ovat lähteestä (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48).

Pohjasulamminen

pohjasulamminen johtuu lämmön siirtymisestä maaperän kautta lumivaraston pohjaan. Tämä lämmönsiirto aiheuttaa lumen sulamista alhaalta ylöspäin.

Pohjasulamisen vaikutus voidaan laskea lämpövirran avulla, joka riippuu maaperän lämmönjohtavuudesta, lumivaraston pohjan pinta-alasta ja lämpötilaerosta maaperän ja lumen välillä. Pohjasulamminen voi olla merkittävä tekijä erityisesti silloin, kun lumivarasto on suoraan maaperän päällä ilman eristystä. Lämpövirta maaperästä, Q_{ground} voidaan laskea kaavan 3 mukaan. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.48)

Kaava 3. Lämpövirta maaperästä, Q_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48–49)

$$Q_{\text{ground}} = \frac{\lambda_{\text{ground}} \times A_{\text{ground}} \times \Delta T_g}{L}$$

Missä:

- λ_{ground} on maaperän lämmönjohtavuuskerroin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
- Lämmönjohtavuus karkeajakoisella maalla on $2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Pakarinen, 2012, s.7)
- A_{ground} on lumivaraston pohjan pinta-ala (m^2)
- ΔT_g on lämpötilaero maaperän pinnan ja tietyn syvyyden välillä (K)
- L on etäisyys maaperässä (m)

Sulaneen lumen määrä pohjasulamisen vuoksi, v_{ground} voidaan laskea kaavan 4 mukaan.

Kaava 4. Sulaneen lumen määrä pohjasulamisen vuoksi, v_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss. 48–49)

$$v_{\text{ground}} = \frac{Q_{\text{ground}}}{L_{\text{snow}} \times P_{\text{snow}}}$$

Missä:

- L_{snow} on lumen sulamislämpö (J/kg)
- P_{snow} on lumen tiheys(kg/m³)

Pohjasulamisen vuoksi sulaneen lumen kokonaismäärä, V_{ground} voidaan laskea kaavan 4 mukaisesti.

Kaava 5. Pohjasulamisen vuoksi sulaneen lumen kokonaismäärä määrä v_{ground} (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48–49)

$$V_{\text{ground}} = v_{\text{ground}} \times t$$

Missä:

- t on varastointiaika (s)

Pintasulaminen

Pintasulaminen on merkittävin tekijä, joka vaikuttaa lumivaraston kokonaisvaltaiseen sulamisnopeuteen. Pintasulaminen johtuu lämmön siirtymisestä ilman, auringon ja taivaan kautta lumivaraston pintaan. Tämä lämmönsiirto aiheuttaa lumen sulamista ylhäältä alaspäin. Pintasulaminen muodostaa suurimman osan kokonaisvaltaisesta sulamisesta (80 %), ja sen vaikutus on huomattavasti suurempi kuin pohjasulamisen tai sateen aiheuttaman sulamisen. (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.46–47, 53)

Pintasulamiseen vaikuttavat useat tekijät, kuten (Lintzén & Knutsson, 2018, s.46):

- Ilman lämpötila
- Tuulen nopeus
- Lyhyt- ja pitkäaaltoinen säteily
- Ilman kosteus

Pintasulamisen vaikutus voidaan laskea lämmönsiirron avulla, joka riippuu eristemateriaalin lämmönjohtavuudesta, lumivaraston pinta-alasta ja lämpötilaerosta ilman ja lumen välillä. Lintzén & Knutsson korostaa, että haihdutusjäähdytyksen vaikutus on tärkeä, ja ilman haihdutusta sulamisnopeus kasvaa huomattavasti. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.47)

Pintasulamien on siis keskeinen tekijä lumivaraston sulamisnopeuden hallinnassa, ja sen vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä tehokkaita eristemateriaaleja ja optimoimalla lumivaraston geometriaa. (Lintzén & Knutsson, 2018, s. 53)

Pintasulamisen laskentakaava perustuu lämmönsiirtoon ympäristöstä lumivaraston pintaan. Pintasulamisen lämpövirta, $Q_{surface}$ voidaan laskea kaavalla 6 (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.48–49):

Kaava 6. Pintasulamisen lämpövirta, $Q_{surface}$ (Lintzén & Knutsson 2018, ss.49–50)

$$Q_{surface} = A_{surface} \cdot \lambda_i \frac{\Delta T_s}{d}$$

Missä:

- $A_{surface}$ on lumivaraston pinta-ala (m^2)
- λ_i on eristemateriaalin lämmönjohtavuuskerroin ($W/m \cdot K$)
- ΔT_s on lämpötilaero ilman ja lumen välillä (K)
- d on eristemateriaalin paksuus (m)

Sulaneen lumen määrä pintasulamisen vuoksi, $v_{surface}$ voidaan laskea seuraavasti:

Kaava 7. Sulaneen lumen määrä pintasulamisen vuoksi, $v_{surface}$ (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50)

$$v_{surface} = \frac{Q_{surface}}{L_{snow} \cdot \rho_{snow}}$$

Missä:

- L_{snow} on lumen sulamislämpö (J/kg)
- ρ_{snow} on lumen tiheys (kg/m^3)

Sateen aiheuttama sulaminen

Sateen aiheuttama sulaminen tapahtuu, kun sadevesi tunkeutuu eristemateriaalin läpi lumeen ja aiheuttaa sulamista. Tämä prosessi voi olla merkittävä erityisesti silloin, kun eristemateriaali ei ole täysin vedenpitävä tai kun sademäärä on suuri.

Sateen aiheuttaman sulamisen vaikutus voidaan laskea kaavalla 8 (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50):

Kaava 8. Sateen aiheuttaman sulamisen vaikutus (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50)

$$V_{rain} = \frac{P \times A \times P_{water} \times c_{water} \times T_{surroundings}}{L_{snow} \times P_{snow}}$$

Missä:

- V_{rain} on sateen aiheuttama sulanut lumen määrä (m^3)
- P on sademäärä (m)
- A on lumivaraston kokonaispinta-ala (m^2)
- P_{water} on veden tiheys (kg/m^3)
- c_{water} on veden ominaislämpökapasiteetti ($J/kg \cdot K$)
- $T_{surroundings}$ on ilman lämpötila (K)
- L_{snow} on lumen sulamislämpö (J/kg)
- P_{snow} on lumen tiheys (kg/m^3)

Muita lumen sulamiseen vaikuttavia tekijöitä on lumen tiiviyys, ja lumivaraston geometria. Optimaalinen lumivaraston muoto on sellainen, joka minimoi pinta-alan, koska pintasulamisen muodostaa suurimman osan kokonaisvaltaisesta sulamisesta. Tämä tarkoittaa, että lumivaraston tulisi olla mahdollisimman tiivis ja sen sivujen tulisi olla jyrkät, jotta pinta-ala pysyy pienenä. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.46)

Lintzén & Knutson esittää, että suuremmat lumivarastot menettävät suhteellisesti vähemmän lunta kuin pienemmät varastot. Tämä johtuu siitä, että suuremmilla varastoilla on suhteellisesti pienempi pinta-ala tilavuuteen nähden. Esimerkiksi puolipallon muotoisella lumivarastolla, on pienempi pinta-ala tilavuuteen nähden kuin useilla pienemmällä puolipalloilla, joiden yhteistilavuus on sama. Lisäksi tutkimuksessa todetaan, että lumivaraston geometria vaikuttaa myös eristemateriaalin pysyvyyteen. Jyrkät sivut voivat aiheuttaa eristemateriaalin valumisen, joten eristemateriaalin valinta ja sijoittelu on tärkeää ottaa huomioon suunnittelussa. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.51)

Yhteenvetona voidaan todeta, että lumivaraston geometria on keskeinen tekijä sulamisnopeuden hallinnassa, ja optimaalinen muoto on sellainen, joka minimoi pinta-alan

ja maksimoi eristemateriaalin pysyvyyden. Lisäksi varasto tulisi sijoittaa tuulelta ja auringolta suojaisaan paikkaan (Lintzén & Knutsson, 2018, ss.46, 53).

5.4.1 Esimerkkilaskelma lumen sulamisesta

Laskentaesimerkki lumen sulamisesta lumivarastossa, johon on varastoitu 1000 m^3 vesimäärää vastaava lumimäärä. Lintzén & Knutsson mainitsee lumen tiheydeksi 600 m^3 , joten lumimäärä on $1666,7 \text{ m}^3$. (Lintzén & Knutsson, 2018, s.50)

Tästä saadaan puolikkaan lieriön muotoinen kasa, jonka korkeus $h = 5 \text{ m}$ ja pituus $42,5 \text{ m}$. Pohjan pinta-alaksi tulee $424,6 \text{ m}^2$ ja kaarevan päällisen ja päätyjen pinta-alaksi $745,2 \text{ m}^2$.

Tavoiteaikataulu on, että lumivarasto alkaa luovuttaa vettä tasaisesti toukokuun alusta aina heinäkuun loppuun asti eli 14 viikon ajan. Lumivaraton eristeenä käytetään 30 cm sahanpurua, joka päällä on vettä eristävä peite. Tämän takia sulamisen laskemisessa ei oteta huomioon sateiden sulatusvaikutusta vaan pelkästään pinta- ja pohjasulamien. Tarvittavia suureita ovat siis:

Pintasulamisen lämpövirran (Q_{surface}) osalta (kts kaava 6):

- A_{surface} on lumivaraston pinta-ala (m^2)
 - Lähtötilanteessa $745,2 \text{ m}^2$ Pinta ala muuttuu lumen sulamisen mukaan, lasketaan joka viikolle.
- λ_i on eristemateriaalin lämmönjohtavuuskerroin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
 - sahanpurun osalta $0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Lintzén & Knutsson 2018. s50)
- ΔT_s on lämpötilaero ilman ja lumen välillä (K)
 - $285,05 \text{ K}$ (Lintzén & Knutsson 2018. s50)
- d on eristemateriaalin paksuus (m)
 - $0,3 \text{ m}$

Pintasulamisen osalta (V_{surface}) (kts kaava 7):

- L_{snow} on lumen sulamislämpö (J/kg)
 - Käytetään $333\,000 \text{ J/kg}$ (Mäkelä, ym, 2008, s.177)
 - Lintzén & Knutsson, 2018, s.50) käyttää arvoa $92,8 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Syy tämän matalamman arvon käyttämiseen ei selvinnyt
- P_{snow} on lumen tiheys (kg/m^3)

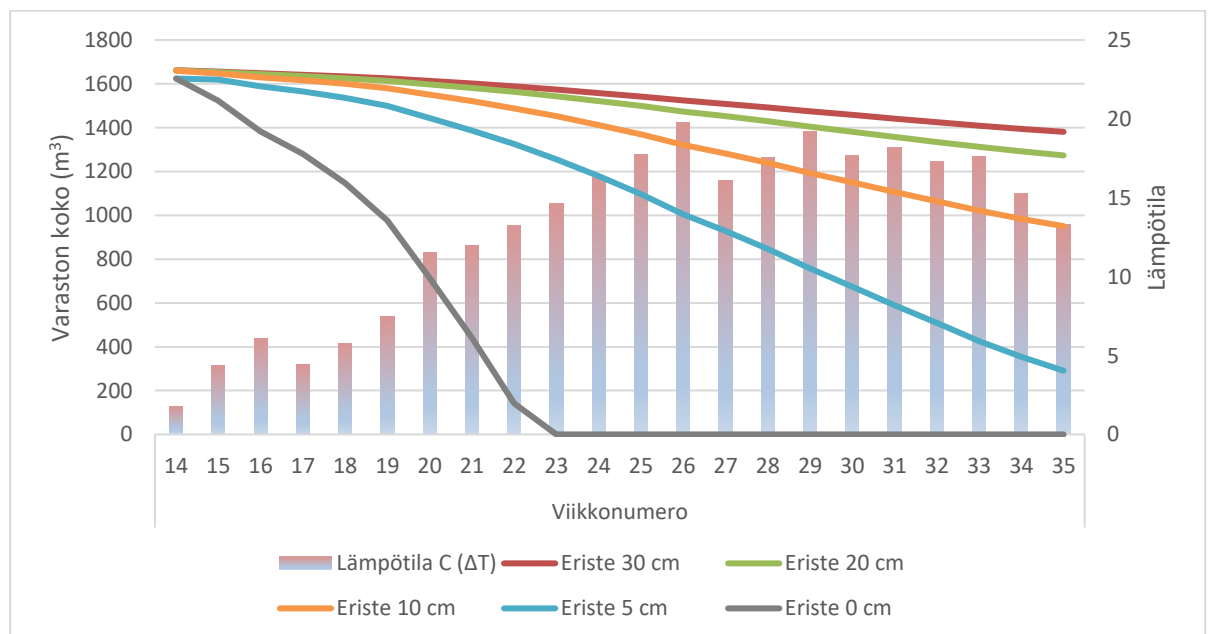
- 600 kg/m^3 (Lintzén & Knutsson, 2018, s. 51)

○ $Q_{\text{ground}} \& V_{\text{ground}}$

- λ_{ground} on $2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Pakarinen, 2012, s.7)
- A_{ground} on $211,6 \text{ (m}^2\text{)}$
- ΔT_g on $275,15 \text{ (K)}$
- L on 2 (m)

Kuvaan 5 on kerätty $1\,666,7 \text{ m}^3$ lumivaraston laskennallinen sulamisnopeus eri paksuisilla eristekerroksilla. Laskennassa käytetty eriste on kuiva sahanpuru, jonka päällä on kestopeite, jolle ei ole laskettu lämmönjohtavuutta mutta joka estää sateen pääsyn lumivarastoon. Sadannan vaikutusta lumen sulamiseen joka Lintzén & Knutssonin mukaan muodostaa noin 11–12 % kokonaissulannasta. Sadetta ei otettu mukaan siksi, että sateisuuden vaihtelu vuosittain on vielä suurempaa kuin lämpötilojen, jolloin keskimääräinen sateen kertymä ei anna meille realistista kuvaa sen vaikutuksesta sulamisnopeuteen. Lisäksi käytännössä lienee mielekkäämpää ohjata vesisateet suoraan varastoaltaaseen ilman että ne sulattavat varastoitua lunta. Kuvassa 5 käytetyt lämpötilat ovat Ilmatieteen laitoksen datapalvelusta poimittuja Kokemäen Tulkkilan sääaseman 2020-luvun huhti- elokuun keskiarvolämpötiloja. (Lintzén & Knutssonin, 2018, s.51)

Kuva 5. Lumivaraston sulamisnopeus eri sahanpurueristeen paksuuksilla suhteessa 2020-luvun lämpötilahavaintoihin. Tiedot noudettu ilmatieteen laitoksen latauspalvelusta (Ilmatieteen laitos, n.d.-a).



Kuvasta 5. on havaittavissa, että vähäinenkin eristekerros auttaa pitämään lumivaraston sulannan tasaisena läpi kesän. Taulukossa 1 on esitetty keskimääräinen sulamisnopeus laskenta-ajalta.

Taulukko 1. Keskimääräinen sulamisnopeus laskenta-ajalta

Keskimääräinen tuotto viikossa (m ³)	
Eriste 30 cm	13
Eriste 20 cm	18
Eriste 10 cm	33
Eriste 5 cm	63
Eriste 0 cm	185*
*keskiarvo 9 viikon ajalta	

Käytännössä esitetyn teoreettisen laskennan avulla saadut tulokset kertovat, että eristekerroksen ei tarvitse olla kovin suuri tai sitä ei tarvitse olla lainkaan, jos halutaan saada riittäviä kasteluveden antoisuuksia joka viikko. Tulokset ovat linjassa Lintzén & Knutssonin (2018) tutkimuksen kanssa, jonka lopputulemana oli, että paksuilla eristekerroksilla saadaan lumi säilymään syksyyn asti. Eristeiden paksuuden optimointi ja tarvittaessa niiden purkaminen kokonaan antaa mahdollisuuden säätää antoisuutta tarpeen mukaan.

Tarvittaessa lumen sulamista voi hidastaa käyttämällä parempia eristeitä kuten kuorikatetta tai varta vasten lumenvarastointiin tarkoitettuja katteita. Lumen sulamista voi nopeuttaa tummentamalla lumen pintaa esimerkiksi levittämällä sen päälle tuhkaa. Tällainen albedon eli heijastuvuuden vähentäminen auttaa lämpösäteilyä pureutumaan paremmin lumeen. (Yle, 2020; Warren, 1984).

Esitetyjä varastorakenteita voidaan hyödyntää kaikissa tässä opinnäytetyössä käsiteltävissä lumen ja jään varastointiratkaisuissa.

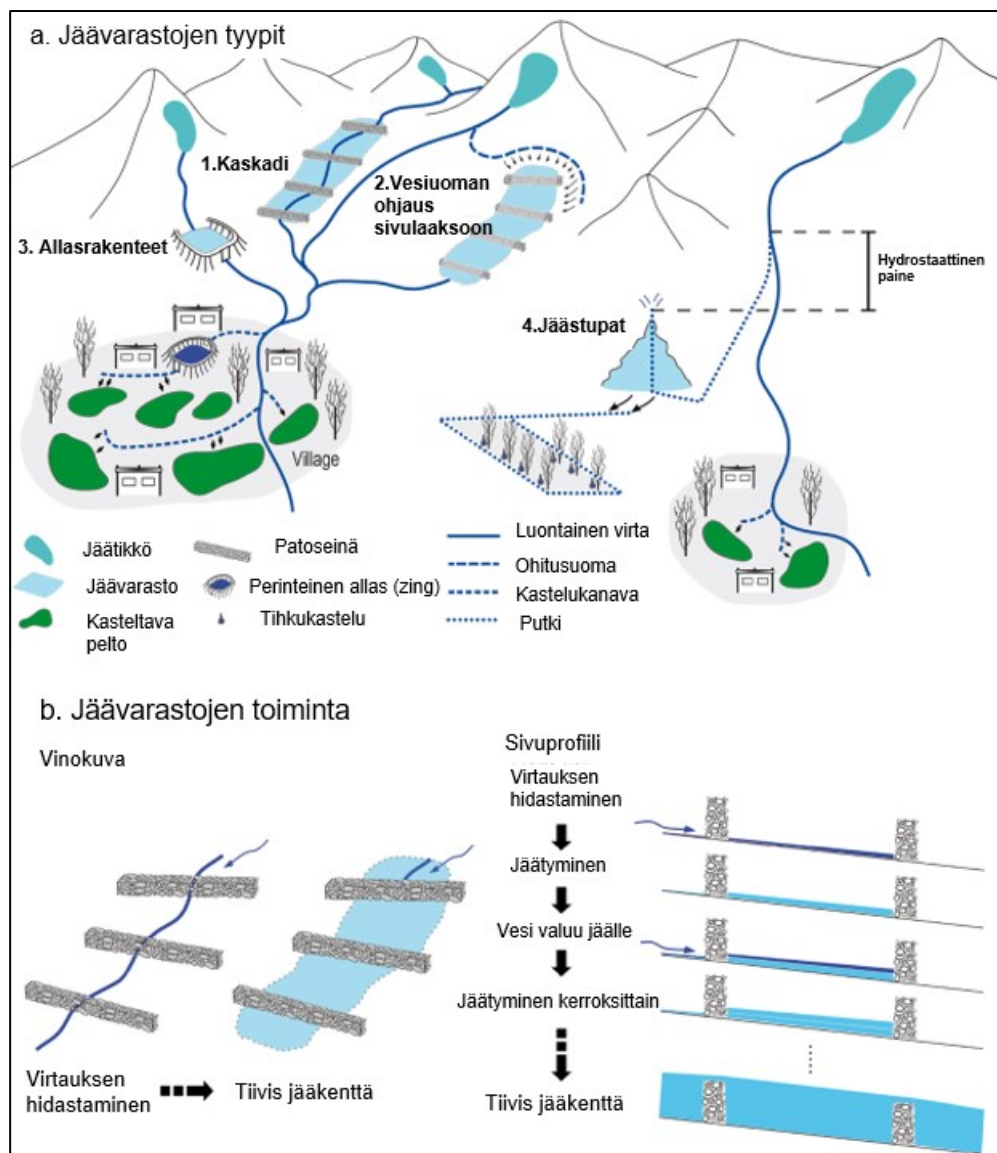
6 Keinotekoiset jäätiköt

Keinotekoiset jäätiköt (AIR = Artificial ice reservoir) ovat yksi lumen varastoinnin ja hyödyntämisen muoto, jossa vuoristo-olosuhteissa pyritään joko luomaan uutta jäätikkö tai säilyttämään olemassa olevaa jäätikköä. Molemmissa tapauksissa ihmistoiminnan vaikutus on olennainen osa määritelmää. Jäätiköiden peittäminen auringonvalolta suojaavalla peitteellä on jo vakiintunut käytäntö useissa Alppien jäätiköillä. Peittämisen tavoitteena on suojella jäätikköä kesäaikaiselta sulamiselta. (Baccolo, 2021)

Nüsser, ym (2019) avaavat keinotekoisien jäätiköiden historiaa ja toimintaperiaatteita. Useimmiten keinotekoisilla jäätiköillä tarkoitetaan kuitenkin veden varastointitarkoituksella perustettavia jäävarastoja, joita on tehty ainakin vuosikymmeniä Himalajan alueella. Intiassa Ladakhin maakunnassa käytetään keinotekoisien jäätiköiden muodostamista kuivuuden hallintaan. Yhteistä näille menetelmille on, että ne käyttävät ylempänä vuoristossa yli 5000 m korkeudessa olevien jäätiköiden sulamisvesiä, jotka uudelleen jäädytetään alempana vuoristossa ja lähempänä veden käyttökohteita syksyn ja talven aikana. Tämä on tarpeellista siksi, että kasvukauden ensimmäisinä kuukausina korkeammalla olevat jäätiköt eivät vielä luovuta sulamisvesiä, mutta alempana vuoristossa olevat jäävarastot alkavat luovuttaa vettä viljelyksille jo paljon aiemmin. Keinotekoiset jäätiköt eivät kuitenkaan ole aivan ongelmattomia. Vaikka paikalliset hyödyt ovat olleet kiistattomia, keinotekoiset jäätiköt ovat olleet myös kiistan aiheena, jonka keskiössä on ollut rajallisten sulamisvesien valjastaminen jäätiköiden muodostamiseksi. Lisäksi keinotekoisista jäätiköistä ei ole pitkäaikaiseksi ratkaisuksi vuoristoympäristöiden vesienhallintaan sillä ne perustuvat kutistuvien luonnollisten jäätiköiden olemassaoloon, jotka nykyisellä ilmaston lämpenemisen vauhdilla pysty tuottamaan vettä enää kauaa. (Nüsser ym, 2019, ss.1327–1328)

Nüsser jakaa Ladakhin alueella esiintyvät keinotekoisien jäätikön ratkaisut 4 eri päätyyppiin (Kuva 9) (Nüsser ym, 2019 s.1332).

Kuva 9. Jäävarastojen tyypit suomennettu (Nüsser ym, 2019, s.1332) mallin mukaan.



1. Kaskadityyppi (cascade)

Kaskadityyppisessä jäävarastossa vuoristopuron eteen rakennetaan kivisiä muureja useita peräkkäin sarjaan, josta tyyppi saa myös nimityksensä. Näiden muurien tarkoituksena on hidastaa veden liikettä ja siten luoda otollisemmat olosuhteet jään muodostumiselle. Talvikuukausien aikana jää alkaa muodostua kivimuurien väliselle alueelle. (Nüsser ym, 2019, s.1330).

2. Vesiuoman ohjaus sivulaaksoon (diverson)

Hyvin samanlainen menetelmä kuin kaskadi, mutta tässä vesi johdetaan pois pääuomasta toiseen laaksoon, jossa varjostuksen ja kaltevuuden puolesta otollisemmat olosuhteet jäätymiselle. Myös tässä perustetaan kivisiä muureja hidastamaan sulamista. (Nüsser ym, 2019, s.1330).

3. Allasrakenteet

Perinteisin jäävaraston muoto, joka muistuttaa Zing- vesivarastoja, jotka ovat kuitenkin tehty huomattavasti ylemmäs varsinaisilta viljelyksiltä. Näihin altaisiin aletaan varastoida vettä syksyllä ja annetaan jäätyä talven aikana. (Nüsser ym, 2019, s.1331).

4. Jäästupat (Ice Stupa)

Uusin menetelmä, joissa jäätikkö muodostetaan johtamalla ylempänä vuoristosta sulavaa vettä putkea pitkin haluttuun paikkaan, jossa vesi saatetaan pystysuoraa kapenevaa putkea pitkin painovoimaisesti haluttuun korkeuteen, jossa putken päässä oleva sprinkleri sumuttaa veden tasaisesti ympäristöönsä. Ladakhin alueen pakkasissa vedestä muodostuu lunta ja jäätä ja se muodostaa putken juurelle pyramidimaisen rakenteen. Jäästupien etuna muihin menetelmiin nähden on, että kartiomainen rakenne tarjoaa vähemmän sulamispinta-alaa vaakatasossa oleviin jäävarastoihin nähden, jolloin ne kestävät suhteessa pidempään kesään. (Nüsser ym, 2019, s.1331).

Jäästupat tuntuvatkin olevan viime aikoina eniten levinnein ja tutkituin jäävaraston muoto. Erityisesti suihkutuksen automatisoinnista on julkaistu useita artikkeleita, joiden tarkoituksena on pyrkiä laskennallisesti määrittämään ja optimoimaan jäävarastoon syötettävän veden painetta ja syöttöaikaa, jotta jäätyminen olisi mahdollisimman tehokasta. Balasubramanian ym (2023) vertailivat tutkimuksessaan kahta eri jäädytysstrategiaa - Manuaalista ja automatisoitua. Ongelmana on ollut, että veden hukkaprosentti on ollut jäästupien muodostuksessa jopa 75 %. (Balasubramanian ym, 2023, s.1)

Tutkimuksessa perustettiin kaksi jäästupaa, jossa toisen vedentulo säädeltiin manuaalisesti maksimivirtaukseksi koko kokeen ajaksi ja toisen jäästupan virtauksen säätö tapahtui reaaliaikaisen säätiedon ja mallinnuksen avulla. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että automaattinen järjestelmä saavutti saman varastointikapasiteetin, kun manuaalinen mutta käytti siihen vain 13 % manuaalisen käyttämästä vesimäärästä. (Balasubramanian, ym, 2023, s.10)

6.1 Keinotekoisien jäätikön perustaminen

Tässä kappaleessa tarkastellaan jäästupa -rakenteen perustamista vesivarastoksi. Lähtöoletamana on, että Suomessa talvien lämpötilat ovat kuitenkin vuosittain ainakin hetkittäin pakkasen puolella. Nämä pakkasjaksot mahdollistavat veden jäädyttämisen silloin kuin vesimuodostumisissa on luotettava virtaus, toisin kuin kesäaikaan. Kappaleessa 3 havainnollistettiin sitä, miten Varsinais-Suomalaisien jokien luontaisesti vähäjärvisillä

valuma-alueilla vuodenaikaiset vaihtelut virtaamisissa ovat merkittäviä. Etenkin pienempien joenhaarojen varsilla toimiville viljelijöille ei välttämättä kesäkuukausina riitä uomasta hyvälaatuista kasteluvettä, mutta virtaamien kasvaessa syksyllä ja talvella vettä riittää taas todennäköisemmin varastointiin. Tässä tilanteessa on täyttää kasteluveden varastointiin tarkoitettut altaat, mutta yksi mahdollisuus ylimääräisen veden keräämiseksi on muodostaa kastelualtaan viereen tai kauemmas valuma alueelle keinotekoinen jäätikkö, jonka sulamisvedet ruokkivat kasteluallasta kesäkaudella.

Toisin kuin Ladakhissa, Suomessa haasteena ei ole veden vähyys talviaikaan, mutta korkeuserojen puutteen takia veden siirtämiseen joudutaan käyttämään pumppuja veden siirtämiseksi, joka lisää toimenpiteen kustannuksia. Merkittävin haaste on kuitenkin putkiston ja pumppujen jäätyminen estäminen. Balasubramanian ym (2023) tutkimuksessa automatisoinnilla pystyttiin vähentämään jäätymistapahtumia.

Jäätyminen ehkäisemiseksi imuputken pää tulisi laittaa veteen jäätymisrajan alapuolelle kohtaan, jossa virtaama on rauhallista 0,4–0,6 m/s jotta jääkansi syntyy mahdollisimman herkästi ja välttyään alijäähtymiseltä (Aarnipuro, 2004, s.7). Siirtolinja tulisi kaivaa maan sisään roudattomaan syvyyteen, jolloin putken päällä oleva maa toimii eristeenä. Routasyvyys riippuu maalajista ja vuosittain lumipeitteen ja pakkasen määrästä mutta lähtökohtaisesti turvallinen syvyys on 2 m, johon sovelletaan maalajin mukaista kerrointa 1,7–0,5 (Talotekniikkainfo, 2024.). Suuttimet ja pumput tulee mitoittaa niin, että niistä kulkeva vedenpaine riittää pitämään putket sulina ja tarvittaessa käyttää sulanapitokaapeleita.

Ilmatieteen laitoksen tilastoista voidaan poimia talvien pakkastuntien lukumäärä ja keskimääräiset lämpötilat. Taulukossa 2 on Kokemäen Tulkkilan havaintoaseman 2020-luvun havainnot tammi-huhtikuulta. Taulukossa nähdään, että lämpötila on painunut 0°C alapuolelle vähintään 1196 tuntina ja keskimäärin 1462 h per talvi. Yli 20°C pakkasissa on merkittävää vuosien välistä vaihtelua.

Taulukko 2. Pakkastuntien lukumäärä Kokemäen Tulkkilan mittausasemalla (Ilmatieteen laitos, n.d.-a)

Pakkastuntien lukumäärä (h)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Keskiarvo
0°C - (-2) °C	1450	1574	1529	1504	1519	1196	1462
(-2°C) - (-5°C)	411	319	547	488	415	390	428
(-5°C) - (-10°C)	418	442	529	500	364	452	451
(-10°C) - (-20°C)	425	415	267	377	297	298	347
<-20°C	195	343	182	139	273	56	198
<-20°C	1	55	4	0	170	0	38

Pakkasen kovuus auttaa laskemaan kuinka paljon vettä voidaan pumpata, jotta ei synny valuntaa ja siten turhaa energian kulutusta pumppujen käytöstä. Jäätymisen ja sulamisen nopeuteen vaikuttaa muitakin muuttujia lämpötilan ohella.

Oerlemans ym (2021) antaa kokoa yksinkertaistetun laskentakaavan jäätupa:n muodostumisesta eri ympäristöolosuhteissa. Laskentakaavassa hyödynnetään eri ympäristöolosuhteita laskemaan jokaiselle tunnille sulaako vai muodostuuko jäätä ja paljonko syntyy hukkavettä. Oletuksena Oerlemansin laskentakaavassa on, että jäätupa perustetaan lähes tasaiselle maalle, jotta valunta on hidasta sekä, että vettä on käyttää rajattomasti. Ensimmäinen osa määrittystä on kartiomuotoisen jäätupan geometrian määrittäminen, jossa ensimmäiseksi tulee päättää säteen r ja korkeuden h arvot.

Geometrian osalta kaavoilla 9 ja 10 lasketaan muotokerroin (s), pohjan pinta-ala A_{pohja} ja sivupinta-ala A_{sivu} (Oerlemans ym, 2021, s.3008):

Kaava 9. Jäätupan pohjan pinta-ala

$$A_{pohja} = \pi \times r^2$$

Kaava 10. Jäätupan sivupinta-ala

$$A_{sivu} = \pi \times r \sqrt{r^2 + h^2}$$

Jossa:

- h = aiottu jäätupan korkeus (m)
- r = aiottu jäätupan säde (m)

Korjauskertoimia (Oerlemans ym, 2021, s.3009):

$$\text{Aurinko } (f) = 1 + s/4$$

$$\text{Altistus (tuuli): } \mu = 1 + s/2$$

Jossa:

- muotokerroin $s=h/r$

Oerlemanssin kaavassa joka tunnille lasketaan massan muutos, jossa olennaisena tekijänä on eri energiamuotojen käyttäytyminen jään ja veden suhteen.

Massan muutos (kg/h) lasketaan kaavalla:

Kaava 11. Jää massan muutos (kg/h) (Oerlemans ym, 2021, s.3009)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{F_{sol} + F_{lw} + F_H + F_L}{L_m} + \frac{F_L}{L_v}$$

Jossa:

- F_{sol} on aurinkoenergia (W)
- F_{lw} on pitkäaaltoinen säteily
- F_H on havaittava lämpö
- F_L on latenttilämpö
- L_m on 334,000J/kg
- L_v on 2,830,000J/kg

Aurinkoenergian nettovirta F_{sol} (J/s):

Kaava 12. Aurinkoenergian nettovirta F_{sol} (J/s) (Oerlemans ym, 2021, s.3009)

$$F_{sol} = \mu q S_{in} (1 - \alpha) \pi r^2 + (1 - q) S_{in} (1 - \alpha) \pi r \sqrt{r^2 + h^2}$$

Jossa:

- S_{in} on saapuva aurinkosäteily (W/m^2)
- α on albedo (heijastuskerroin)
- q on suoran säteilyn osuus
- f on korjauskerroin kartiolle ($=1+s/4$)
- r on säde (m)
- h on korkeus (m)

Pitkäaaltoisen säteilyn nettovirta F_{lw} (J/s)

Kaava 13. Pitkäaaltoisen säteilyn nettovirta F_{lw} (J/s) (Oerlemans ym., 2021, s.3009)

$$F_{lw} = (L_{in} - L_{out})\pi r\sqrt{r^2 + h^2}$$

Jossa

- L_{in} on saapuva pitkäaaltoinen säteily (W/m^2)
- L_{out} on lähtevä pitkäaaltoinen säteily (W/m^2)
- r on säde (m)
- h on korkeus (m)

Turbulenttinen lämpövirta F_H :

Kaava 14. Turbulenttinen lämpövirta F_H (Oerlemans ym., 2021, s.3009)

$$F_H = \mu\rho c_p C U (T - T_s)\pi r\sqrt{r^2 + h^2}$$

Jossa

- μ on altistuskerroin
- ρ on ilman tiheys (kg/m^3)
- c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)
- C on turbulenttinen siirtymäkerroin
- U on tuulen nopeus (m/s)
- T on ilman lämpötila ($^{\circ}C$)
- T_s on jäästupan pinnan lämpötila ($^{\circ}C$)

Turbulentti latenttilämpö (sublimaatio) F_L

Kaava 15. Turbulentti latenttilämpö (sublimaatio) F_L (Oerlemans ym., 2021, s.3009)

$$F_L = 0,623\mu\rho L_v C U p^{-1}(e_s - e)\pi r \sqrt{r^2 + h^2}$$

Jossa

- L_v on sublimaation latenttilämpö (J/kg)
 - 2,848 MJ/kg (Balasubramanian 2022 s 9)
- $e_s - e$ höyryn paine ero
 - e_s on kylläisen vesihöyryn paine 0°C
 - e on vesihöyryn paine = suhteellinen kosteus (RH) x e_s
- p on ilmanpaine
 - 1013 hPa = 101 300 Pa

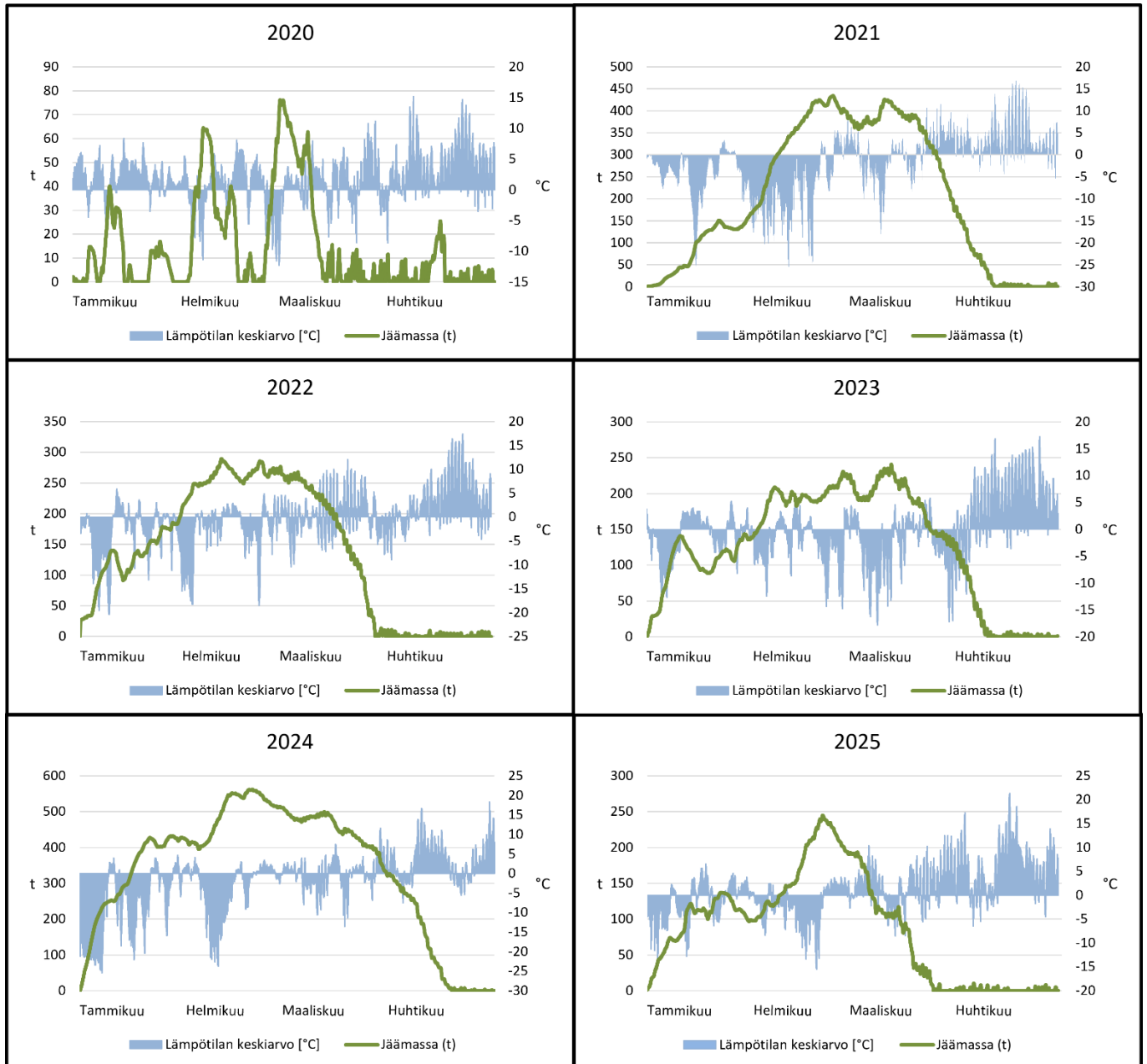
Oerlemanssin kaavojen perusteella laskettiin Ilmatieteen laitoksen tilastotietojen avulla 2020-luvun talville jäämassan muodostumispotentiaalia kartion muotoiselle rakenteelle, jonka lähtömitoiksi mitoiksi haarukoitiin $r=20$ m ja $h=1$ m. Laskenta tehtiin kevättalven 1. Tammikuuta – 30. huhtikuuta väliselle ajalle. Laskennassa käytettyjen arvojen lähteet on esitetty taulukossa 3. Tässä opinnäytetyössä käytetty Kokemäen Tulkkilan havaintoasemalta ei saatu kattavaa säteilytietoa, joten tietoja täydennettiin Jokioisten Ilmalan aseman säteilyhavainnoilla. Puuttuvien tiedot täydennettiin muodostamalla arvo edellisen ja seuraavan arvon keskiarvosta.

Taulukko 3. Jäästupan massalaskennassa käytetyt arvot ja niiden lähteet

Suuren nimi	suure	Arvo	yksikkö	Lähde
Korkeus	h	9	m	oletus
Säde	r	20	m	oletus
Kylläisen vesihöyryn paine (0°C)	es	610,8	Pa	(Mäkelä ym., 2008, s.180)
Ilmanpaine	p	101300	Pa	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Ilman tiheys (0°C)	ρ	1,293	kg/m ³	(Balasubramanian ym., 2022, s.9)
Ilman ominaislämpökapasiteetti	cp	1004	J/kgK	(Oerlemans ym., 2021, s.3009)
Turbulenttinen siirtymäkerroin	C	0,0013...0,0025	-	(Rolstad & Oerlemans, 2005, s. 370)
Jään pinnan lämpötila	Ts	0	°C	Oletus
Ilman lämpötila	T	-25,4 ... 21,3	°C	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Piin likiarvo	π	3,14	-	-
Jään sulamislämpö	Lm	334000	J/kg	(Oerlemans ym., 2021, s. 3009)
Sublimaation latenttilämpö	Lv	2830000	J/kg	(Balasubramanian ym., 2022, s.9)
Suoran säteilyn osuus	q	0,5	-	(Oerlemans ym., 2021, s.3010)
Albedo	α	0,6	-	(Oerlemans ym., 2021, s.3010)
Tuulen nopeus (keskiarvo)	U	0...12,3	m/s	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Saapuva pitkäaaltoinen säteily	L _{in}	148,9...373	W/m ²	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Lähtevä pitkäaaltoinen säteily	L _{out}	166,6...434,4	W/m ²	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Kokonaissäteilyn summa	S _{in}	-3...917	W/m ²	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)
Heijastuneen säteilyn summa (ei hyödynnetty)	S _{out}	-15...1684	W/m ²	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)

Laskennan tuloksia on avattu kuvassa 10, johon on kerätty kuvaajat vuosien 2020–2025 tilastoista. Kuvaajiin on kerätty jokaisen tunnin lämpötila-arvot sekä jäämassan kertyminen. Kuvaajissa positiiviset arvot eli vetenä kertyvän massan määrä pysäytettiin, kun se saavutti arvon nolla eli tilanteen kun kaikki jäämassa on kadonnut.

Kuva 10. Oerlemansin (2021) mukaan lasketut jään muodostumisen kehitys kevättalville 2020–2025.



Käytetty säde 20 m on tarpeettoman suuri virtaamamäärään nähden. Alentamalla sädettä ja korkeutta jäästupan tuotto laskee, mutta halutun jäämassan saavuttamiseksi jäästupia voidaan perustaa enemmän. Käytännössä tämä kasvattaa pumpuilta vaadittavaa tehoa ja sitä kautta investointikustannuksia.

Taulukkoon 4 kerätyissä tuloksissa nähdään, että kylmimmät talvet 2021 ja 2024 tuottivat odotetusti isoimmat jäämassat. Vuosittaisen vaihtelun ollessa kuitenkin suurta, välillä 76–562 t. Jokaisena vuotena jäämassa muodostaminen oli kuitenkin mahdollista ja jäämassan maksimin ajankohdat vaihtelivat myös runsaasti. Yhtenevää vuosien välillä toki oli, että ilman jäämassan suojausta massa katoaa myös nopeasti ja Oerlemanssin kaavaa käyttäen yhtenäkkään vuonna jäätä ei ollut enää jäljellä huhtikuun lopulla.

Taulukko 4. Esimerkkilaskennalla saadut jäämassat 2020-luvun säätiedoista

	Jäämassan maksimi (t)	Ajankohta
2020	76	1.maalis
2021	434	24.helmi
2022	289	12.helmi
2023	240	13.maalis
2024	562	20.helmi
2025	245	2.helmi

Tässä opinnäytetyössä käytetyssä Oerlemanssin esittelemässä kaavassa on runsaasti puutteita, joista Balasubramanian ym 2022 ja 2023 on kehittänyt pidemmälle viedyt mutta samalla monimutkaisemmat laskentakaavat. Merkittävimpiä lisäyksiä Oerlemansin kaavaan nähden on, että Balasubramanian mallintaa jään pinnan lämpötilaa ja albedon muutosta, sekä sulamisen ja jäätyksen eri vaiheita. Balasubramanian 2023 käsittelee enemmän automatisointia ja tuo teorian lähemmäs käytännön sovellusta. Suomen olosuhteissa ei tutkimusta ole tehty ja olisi hyvä varmentaa toimiiko Oerlemanin tai Balasubramanianin kaavat sellaisenaan Suomen olosuhteisiin. Balasubramanian ym 2022 vertailee tutkimuksessaan Sveitsin Bernissä, ja Intiassa Leh:n kaupungissa sijaitsevia jäätubia. Näiden olosuhteet eroavat Suomen säätiloista mm keskilämpötilan, sadannan ja ilmakehän kosteuden mukaan. Taulukkoon 5 on kerätty vertailuun talven 2021 arvoja Balasubramanian tutkimuksesta Intiasta ja Sveitsistä sekä Suomesta Kokemäen sääasemalta, joita käytettiin esimerkkilaskelman aineistossa. Eri alueiden tarkastelujaksot eivät ole yhdenmukaiset, joka hankaloittaa tuloksia, mutta Suomen olosuhteissa on havaittavissa Himalajan vuoristoa isommat ilmakehän kosteudet ja lämpötilanvaihtelut, etenkin jos Suomen tarkastelujaksota venytettäisiin pidemmälle kesään.

Taulukko 5. Eri alueiden arvojen keskiarvoja ja keskihajontojen vertailu talvella 2021

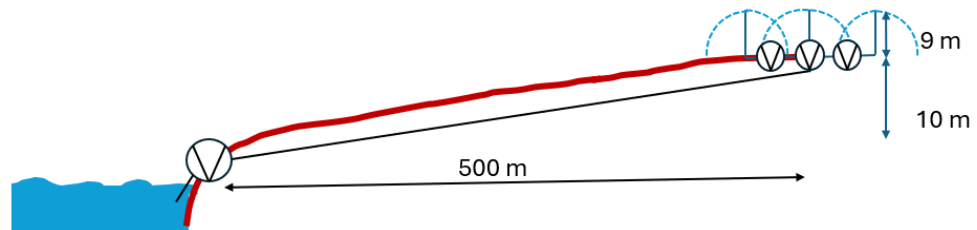
	Lämpötila	Ilmankosteus	Sadanta	Havaintojakso	Lähde
IN21	0±7	35 ± 20	0 ± 0	18.1.2021 – 20.6.2021	(Balasubramanian ym., 2022, s.3)
CH21	2 ± 6	79 ± 18	139 ± 457	22.11.2020 – 10.5.2021	(Balasubramanian., 2022, s.3)
FIN21	-2 ± 7	81 ± 16	0 ± 0,2	1.1.2021 – 30.4.2021	(Ilmatieteen laitos, n.d.-a)

6.2 Keinotekoisien jäätikön esimerkkilaskelma

Tässä kappaleessa tarkastellaan 1000 m³ vesimäärän varastoimista keinotekoiseen jäätikköön. Kappaleessa 6.1 määritetty 2020-luvun talvien potentiaalinen kertymän keskiarvo oli noin 308 m³. 1000 m³ saavuttamiseksi 20 m halkaisijaltaan olevia jäätiköitä tulisi olla siis 3–4 kappaletta. Suurimmillaan jäätyminen oli tarkastelujaksolla vajaa 3000 kg/h eli pyöristettynä 3 m³ esimerkkilaskennassa mitoitetaan pumpput mahdollistamaan tuon kaltaisen vesimäärän siirtämisen kolmeen kohteeseen. Laskennassa tehdään oletus, että jäädytyksessä käytetään automaatiota, jolloin vettä pumpataan oikea määrä jäätympotentiaaliin nähden. Jäänmuodostusta tapahtui tarkastelujakson aikana 966–1586 h, (keskiarvon ollessa 1355 h). Selkeyden vuoksi pumppauksen laskentaa yksinkertaistetaan niin, että käytetään tasaista pumpun virtaamaa, joka on 1080 m³/ 1355 h eli $Q = 0,79 \text{ m}^3/\text{h}$

Esimerkkitulannetta esitetään kuvassa 11 Esimerkkitulanteessa vettä tarvitsevat pellot sijaitsevat 500 m jokiuomasta ylemmäs maastoon, jonne tarvittava nostokorkeus on 10 m ja johon lisätään laskelmassa tolppa 9 m jäästupan korkeus. Energiankulutuksen laskentaa varten tulee tietää veden suihkutukseen riittävä paine sekä putkiston aiheuttama painehäviö.

Kuva 11. Keinotekoisin jäätikön laskentaesimerkin periaatekuva



Suuttimen valinnalla ja vedenpaineella on oleellinen merkitys veden jäätymisnopeuteen. Tavoitteena on saada mahdollisimman pientä pisarakokoa, jotta maksimoidaan pumpatun veden pinta-ala lämmönvaihtoa varten.

Lasketaan tarvittava paine

Pumppaukseen tarvittava paine lasketaan kaavalla:

Kaava 16. Pumppaukseen tarvittava paine

$$H_{\text{kokonais}} = H_{\text{staattinen}} + H_f + H_{\text{sprinkleri}}$$

Jossa:

- H_{kokonais} on tarvittavan vesipatjan korkeus metreinä
- $H_{\text{staattinen}}$ on nostokorkeus pumpusta
- H_f on laitteiston aiheuttama painehäviö
- $H_{\text{sprinkleri}}$ on sprinklerien tarvitsema paine

Putkiston painehäviön laskentakaavat 17–20 on poimittu Pumppulohja Oy:n esitteestä. Koska laskelma on hypoteettinen niin painehäviön laskennassa ei oteta huomioon liitosten, kulmapalojen ja venttiilien aiheuttamia lisähäviöitä, vaan oletetaan, että putki on yhtenäinen pumpulta suuttimeen. Suuttimen tarvittava painekulutus vaihtelee eri mallien välillä mutta tässä laskelmassa käytetään arvoa 4 bar per suutin eli yhteensä 12 bar.

Painehäviö putkessa (H_f) lasketaan kaavalla 17.

Kaava 17. Painehäviön kaava (Pumppulohja Oy)

$$\Delta P = \frac{1000 \times f \times L \times v^2}{2 \times g \times D}$$

Jossa:

- H_f = painehäviö (m)
- f = kitkatekijä
- L = putken pituus (m)
- D = putken sisähalkaisija (mm)
- v = Keskimääräinen virtausnopeus putkessa (m/s)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Kitkatekijä (f) lasketaan kaavalla 18 (Pumppulohja Oy):

Kaava 18. Kitkatekijä f (Pumppulohja Oy)

$$f = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \times D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2}$$

Jossa:

- ε = karkeusaste (mm)
- D = putken sisähalkaisija (mm)
- Re = Reynoldsin luku

Reynoldsin luku (Re) lasketaan kaavalla 19:

Kaava 19. Reynoldsin luvun laskenta Re (Pumppulohja Oy)

$$Re = \frac{v \times D}{1000 \times \mu}$$

Jossa:

- v = nopeus (m/s)
- D = putken halkaisija (mm)
- μ = viskositeetti (vedellä 2C lämpötilassa on (1.676 cSt)

Nopeus (V) lasketaan kaavalla 20:

Kaava 20. Veden virtausnopeus putkessa V (Pumppulohja Oy)

$$V = \frac{1274 \times Q}{D^2}$$

Jossa:

- Q = virtaus(l/s)
- D = putken halkaisija

Laskennan tuloksia esitetään taulukossa 5. Pumppulohja Oy:n esittämissä kaavoissa painehäviö esitetään metreinä. Muunnos paineen yksiköksi tapahtuu Hydrostaattisen laskentakaavan perusteella, jonka mukaan 10 m vesipatsas muodostaa 0,981 bar \approx 1 bar paineen. Taulukon 6 tuloksista voidaan havaita, että suurimmat painevaatimukset tulevat sprinklerien tarvitsemasta paineesta. Jos kaikki pumppaus jouduttaisiin tekemään yhdellä pumpulla kokonaispainevaatimus olisi noin 17 bar, joka aiheuttaisi haasteita pumpun valinnalle. Siksi on mielekkäämpää lisätä pumppujen määrää neljään pumppuun.

Taulukko 6. Esimerkissä tarvittavat paineen laskennat

Suure	Siirtolinja	Haara 1	Haara 2	Haara 3
H_{kokonais}	1,87	5,93	5,97	5,97
h_f (m)	8,74	0,35	0,70	0,70
L	500	20	40	40
h	10	9	9	9
Sprinklerin paine	0	5	5	5
v (m/s)	0,43	0,43	0,43	0,43
Re	6567,29	6567,29	6567,29	6567,29
f	0,05	0,05	0,05	0,05
D	25,40	25,40	25,40	25,40
ε (m)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Pumpun tehontarve (W)	26,85	131,59	131,59	131,59

Kustannushyötyanalyysi

Jäävarastoa varten lasketaan perustamisen ja käytön kustannukset esimerkkilaskennan perusteella.

Taulukkoon 7. on kerätty esimerkkitapauksen materiaalikustannukset ja taulukkoon 8 työkustannukset. Materiaalikustannusten hinnat on poimittu 24.11.2025.

Taulukko 7. Esimerkki jäästupan materiaalikustannukset

Asia	Määrä	Hinta	Yhteensä
Pumput (kpl)	4	350,00 €	1 400,00 €
Putki (100 m)	6	104,17 €	625,02 €
Sadettimet (kpl)	3	63,89 €	191,67 €
Tolpat (RST) m	27	7,75 €	209,25 €
Kuljetus	1	500,00 €	500,00 €

Taulukko 8. Esimerkki jäästupan työkustannukset

Työkustannukset	Määrä	Hinta	Yhteensä
Putken asennustyö	600	4,20 €	2 520,00 €
Tolppien valmistus ja pystytys h	4	28,01 €	112,04 €

Jääkentän perustamiskustannukset ovat siis 5 557,98 €.

Käyttökustannukset koostuvat pumppauksen energiakuluista ja huoltokustannuksista. Neljän pumpun käyttöön tarvittu tehontarve on 422 W kilowattitunneiksi muutettuna tarvittava energiamäärä on 0,422 kW x 1355 h = 571 kWh.

Sähkön hintaan käytetään kappaleessa 5.3.2 esitettyä hintalistausta vuoden 2024 hintatiedoista.

$$571 \times (5,8 \text{ snt/kWh} + 4,14 \text{ snt/kWh} + 2,83 \text{ snt/kWh}) + (1485 \text{ snt/kk} \times 3\text{kk}) = 11\,750,5 \text{ snt} = 117,50 \text{ €}$$

Tarkkoja huoltokustannuksia on vaikea arvioida, joten hyödynnetään kappaleessa 7 lumiaidoille määriteltyä summaa, joka on 5 % investointikustannuksista vuodessa.

Esimerkkitapauksessa tämä tarkoittaisi 277,90 €/v

$$\text{Vuositolliset kulut olisivat siis } 117,50 \text{ €} + 277,90 \text{ €} = 395,40 \text{ €}$$

Varastoitavan kasteluveden hinnaksi tulee siis $395,40 \text{ €} / 1080 \text{ m}^3 = 0,366 \text{ €/m}^3$

6.3 Keinotekoisten jäätiköiden yhteenveto

Keinotekoiset jäätiköt tai jäävarastot eng. AIR ovat tässä opinnäytetyössä esitellyistä menetelmistä varmatoimisimpia, sillä se tarvitsee muodostukseen ainoastaan pakkasta ja luotettavan talviaikaisen vesilähteen. Keinotekoisia jäätiköitä on kirjallisuuslähteiden mukaan neljää päätyyppiä:

- Kaskadityyppi (cascade)
- Vesiuoman ohjaus sivulaaksoon (diversion)
- Allasrakenteet
- Jäästupat (Ice Stupa)

Näistä menetelmistä jäästupat ovat kaikista tuottoisimpia, mutta samalla myös kaikkein teknisimpiä ratkaisuja. Kappaleessa 6.2 esitetyissä laskelmissa on runsaasti muuttujia, jotka vaikuttavat jään kertymiseen ja kustannuksiin. Tässä opinnäytetyössä jouduttiin rajoittamaan tarkasteltavien muuttujien määrää. Kustannusten osalta isoimpia muuttujia on tietenkin pumppuvalinnat ja sähkön hinta. Jään muodostumisen kannalta taas vuosittaiset vaihtelut ovat merkittäviä. Säätiloihin on mahdoton vaikuttaa, mutta kustannussäästöjä saadaan helposti, jos esimerkiksi vaihdetaan jäästupa rakenteen mittoja pienemmiksi tai vaihdetaan kokonaan toiseen keinotekoisen jäätikön tyyppiin. Iso osa paineen lisäyksestä syntyi sprinklerijärjestelmästä, mutta muissa keinotekoisissa jäätiköissä tarvetta veden sumutukselle ei ole, jolloin myös paine voidaan jättää pienemmäksi.

Jos viljelijä pystyy myös hyödyntämään olemassa olevaa kalustoaan suihkutukseen ja veden siirtoon, säästyään investointikustannuksilta. Viljelijä voi myös hyödyntää olemassa olevan kasteluallasta vesivarastona, josta otetaan jäästupaan jäädytettävä vesi. Tällöin säästyään talvikuukausina pitkien siirtolinjojen käytöltä, jotka monesti on asetettu maan pinnalle tai kaivettu liian lähelle pintaa ja siten alttiita jäätymiselle. Tyhjentyneet allas voidaan sitten täyttää joki- tai järvisedellä kevätvalumien aikaan.

Kappaleessa 6.2 esitetyistä kaavoista on huomioitava, että Oerleman ym laativat laskentatilanteen niin, että vettä jäätyy ainoastaan halutun säteen sisällä. Todellisuudessa kaikki ylimääräinen vesi valuisi pois ja jos on pakkasta niin se alkaisi jäätyä virtausreitinsä varrelle, jolloin se jäisi myös halutulle valuma-alueelle tai päätyisi kastelualtaaseen.

UArctic arvioi eri ilmastonmuutoksen sopeutumisen menetelmiä ja niiden käytettävyyttä. Keinotekkoisten jäätiköiden osalta he toteavat, että menetelmät ovat teknisesti valmiita ja hyödyllisiä, mutta näkevät ongelmia skaalattavuudessa. Ongelmiksi he viittaavat myös Nüsserinkin mainitseman toteaman, että menetelmän käyttö edellyttää luontaisilta jäätiköiltä valuvia vesi, joiden tiedetään hupenevan tulevaisuudessa. Keinotekkoisten jäätiköiden hyödynnettävyydestä arktisella ja pohjoisella alueella todetaan, että koska makeaa vettä on runsaasti, niin menetelmä ei ole yhtä kustannustehokas sopeutumiskeino kuin kuivilla seuduilla. (Uarctic, n.d.)

Jäävarastot soveltuvat erityisesti kohteille joissa:

- On käytössä oleva vesilähde, jossa kesäaikana on olematon virtaama
- Varastopaikalle on sopiva tila
 - Jäästukat kaipaavat tasaista maata
 - Muut voisivat toimia myös notkelmissa

Jäävarastojen etuja:

- toimintavarmuus
- edullisuus
- kasteluveden laatu säilyy hyvänä

Jäävaraston haasteita:

- Veden siirtoverkko on alttiina jäätymiselle
- Edellyttää pumppaamista eli energialähteen
- Edellyttää vesilähteen lähelle
- Edellyttää varaston peittämisen

7 Lumiaidat

Lumiaitoja hyödynnetään vähentämään pyryävän lumen haitallisia vaikutuksia maanteillä. Menetelmässä rakennetaan puoliläpäisevä aita, joka kerryttää tuulen kuljettamaa lunta kinokseksi aidan taakse. Tällaisten aitojen alkuperäinen tarkoitus on ollut pysäyttää tuulen mukana pyryvä lumi sellaiseen paikkaan, jossa siitä ei ole haittaa suojattavalle toiminnalle kuten tielle. Lumiaidat vähentävät tiestön talvikunnossapidon tarvetta ja vähentävät liikenneonnettomuuksia. (Tabler, 1991, ss. 3–9)

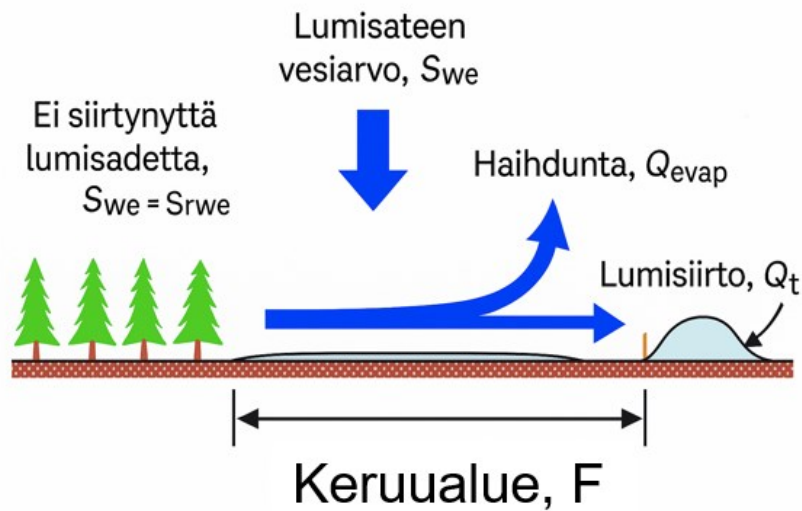
Tämän opinnäytetyön kannalta oleellista on, että lumiaidoilla voidaan kinostumista keskittää haluttuun sijaintiin, esimerkiksi kastelualltaan valuma-alueelle, jolloin kinostuneesta lumesta sulava vesi täyttää kasteluallasta. Oletuksenamme on, että ohjatulla kinostumisella vähennetään sulamisvesien luontaista hävikkiä, kuten haihduntaa ja imeytymistä. Koska vedellä on lyhyempi matka kulkeutua kastelualltaaseen ja paksut kinokset myös sulavat hitaammin, kuin tasainen lumihanki, jolloin kasteluvettä riittää kesällä pidempään.

7.1 Lumiaitojen suunnittelu

Lumiaitojen rakentamista on ohjeistettu R.D Tablerin vuona 1991 laatimassa ohjeessa *Snow fence Guide*, sekä vuonna 1994 julkaistussa ohjeessa *Design Guidelines for the control of Blowing and Drifting snow*, joka on huomattavasti tarkempi ja teknisempi opas. Tämän opinnäytetyön tarkoitukseen riittää vuoden 1991 versio, jossa Tabler avaa laskelmia, ja joka toimii monen tutkimuksen perustavana lähteenä. Uusin Tablerin ohjeista on vuoden 2003 raportti *Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design*, joka on yhdistelmä aikaisemmista raporteista.

Kuvassa 12 on Tablerin vuoden 2003 raportista suomennettu havainnekuva, jossa osoitetaan lumen kerääntymisen muuttujia. Aidan suunnittelu alkaa määrittämällä aidan mitoitusvaadittavat tekijät, jotka ovat lumisateen määrä, tuulen suunta ja nopeus, mutta myös etäisyys, jolta tuuli pystyy siirtämään lunta kohteeseen ilman esteitä. Merkittävä vaikutus on myös aidan tyypillä ja sen huokoisuudella. (Tabler, 1991, s. 9–12).

Kuva 12. Lumen kerääntymisen muuttujia. Kuva Suomennettu Tablerin 2003 kuvaajan pohjalta. (Tabler, 2003, s.35)

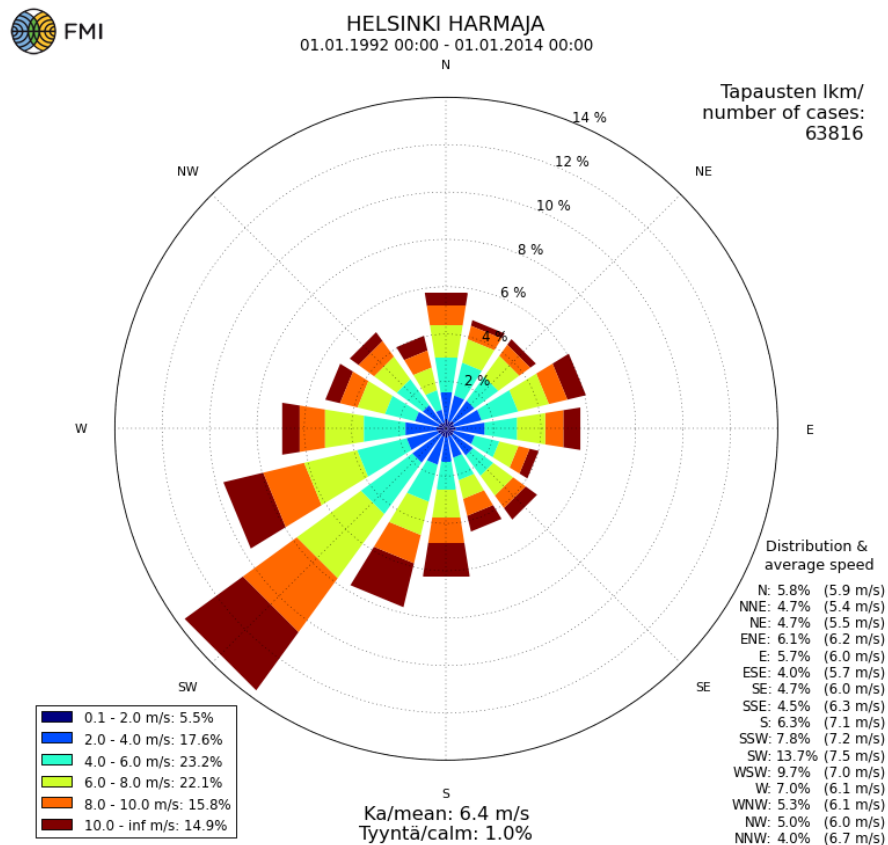


Määritä tuulen suunta

Vallitseva tuulen suunta tulisi määrittää mahdollisimman tarkasti. Vallitseva tuulen suunta määrittää lumiaidan sijainnin suhteessa suojattavaan kohteeseen. Tuulen suunnan määrittämiseksi voi käyttää apuna (Tabler, 1991, s. 16–17):

- Ilmatieteen laitoksen tarjoamia tilastoja kohteesta läheisimmän sääaseman aineistosta. Aineistoista valitaan vallitseva tuulen suunnan keskiarvot. Talviaikainen vallitseva tuulen suunta saadaan, kun talvikuukausien tunneista valitaan eniten toistuvat arvot. Arvojoukkojen ryhmittäminen sektoreihin antaa paremman kuvan todellisuudesta. Ryhmitelystä tietojoukosta käytetään usein kuvaajaa, jota sanotaan tuuliruusuksi (Kuva 13).
- Käyttää hyödyksi kaukokartoitusaineistoja kuten satelliittikuvia, joista etsitään kinostuksen merkkejä mahdollisimman läheltä kohdealuetta. Talviaikaisia satelliittikuvia löytyy Suomen ympäristökeskuksen Tarkkakartta palvelusta.
- Maastotarkastelua. Parhaiten kinoksia löytyy lopputalvella, kun kinostumista muodostavia tapahtumia on ollut useampia. Tablerin mukaan tuulen suuntaa voidaan päätellä myös muista ympäristöstä nähtävissä olevista tuulen vaikutuksen merkeistä, kuten kallistuneista puista yms. kasvillisuudesta. Tämä tarkastelu vaatii kuitenkin aika paljon tulkintaa ja asiantuntemusta, joten sitä ei tulisi käyttää ensisijaisena menetelmänä.

Kuva 13. Esimerkkikuva tuuliruusuasta (Ilmatieteen laitos, n.d.-b)



Tabler 2003 matemaattisia malleja voidaan hyödyntää muodostamaan yksinkertaistettu kuva lumen kertymisestä lumiaidan taakse. Kulkeutuvan lumen määrän arviointi on oleellista toimivan lumiaidan suunnittelun kannalta, oli sitten tarkoitus suojata kohdetta lumelta tai kerätä sitä tiettyyn paikkaan. Liian pieni tai liian lähelle kohdetta rakennettu aita voi aiheuttaa kinoksen muodostumisen juuri kohteen päälle. (Tabler ,1991, s. 18–19)

Kulkeutuvan lumen määrän määrittämiseksi tarvitaan tieto lumen keruualueesta, lumen määrästä, tuulennopeudesta ja lumen liikkumisen aikaisesta haihdunnasta. Lumihitualeet alkavat kulkeutua, kun tuulennopeus ylittää 6,6 m/s. Suurin osa kulkeutuvasta lumesta liikkuu alle 1 m korkeudessa. Kuitenkin mitä kovemmissa tuulilla yli 1,5 metrin korkeudella kulkeutuvan lumen osuus kasvaa voimakkaasti tuulen nopeuden kasvaessa. Tabler (2003, s.30) määrittää hetkellisen lumen kulkeutumisen tuulidatan perusteella kaavan 21 mukaan.

Kaava 21. Lumen kulkeuma tuulidatan perusteella alle viiden metrin korkeudessa Q_{0-5} (Tabler, 2003, s.30)

$$Q_{0-5} = U_{10}^{3,8} / 233847$$

Jossa:

- Q_{0-5} on lumen kulkeutuminen (kg/s) per metri tuulen leveydeltä
- U_{10} on tuulen nopeuden lukuarvo (m/s)
- 233847 on Tablerin määrittämä vakio

Ensimmäinen vaihe määrittämisessä on lumen keruualueen määrittäminen (eng. fetch). Keruualue on alue lumiaidasta vastatuuleen seuraavalle esteelle. Esteitä voi olla rakennukset, metsänreunat, mutta myös syvät ojat tai avovesialueet. Keruualue voidaan määrittää ilmakuvista tai maastossa. Tablerin mukaan keruualueen ylärajana voidaan pitää 6 km, sillä sitä kauempaa tulevat lumet eivät saavuta lumiaitaa haihtumisen vuoksi. (Tabler, 1991, s. 18)

Keruualueelle satavasta lumesta S_{we} osa jää maahan paikalleen ja osa kulkeutuu tuulen mukana S_{rwe} . Tästä kulkeutuvasta lumesta osa haihtuu Q_{evap} eikä koskaan saavuta lumiaitaa. Jäljelle jäävästä kulkeumasta käytetään merkkiä Q_t tai Q_{tave} jos käytetty lumen vesiarvo on koko talvikauden keskiarvo. (Tabler, 2003, s. 35–36)

Tietoja lumen vesiarvosta kerää Suomessa Ilmatieteen laitos. Tabler (2003) kertoo, että lumen siirtymisen tehokkuudesta kertova kerroin θ ylittää vain harvoin arvon 0,7 ja Yhdysvaltojen luoteisosissa voidaan tyypillisesti käyttää arvoja 0,2 tai 0,3, jotka soveltuvat metsäisemmille alueille. Tällä tehokkuuskertoimella voidaan laskea kulkeutuvan lumen vesiarvo kaava 22. (Tabler, 2003, s. 35)

Kaava 22. Kulkeutuvan lumen vesiarvo (Tabler, 2003, s. 35)

$$S_{rwe} = \theta \times S_{we}$$

Jossa:

- S_{rwe} on Siirtyvän lumen vesiarvo metreinä
- θ on Lumen siirtymistehokkuus

- S_{we} on lumen vesiarvo metreinä

Kun tunnetaan siirtyvän lumen vesiarvo, voidaan määrittää haihduntahäviö kaava 23.

Kaava 23. Kulkeutuvan lumen haihduntahäviö Q_{evap} (Tabler, 2003, s. 35)

$$Q_{evap} = 1000 \times S_{rwe} F - 500 \times T \times S_{rwe} (1 - 0.14^{F/T})$$

Jossa:

- Q_{evap} on haihduntahäviö (kg per metri tuulen leveydeltä)
- S_{rwe} on kulkeutuvan lumen vesiarvo (metreinä)
- F on keruualueen pituus (m)
- T on maksimaalinen kulkeutumisetäisyys (m)

Maksimi kulkeutumisetäisyys kertoo pisimmän etäisyyden, jonka keskimääräinen lumihiihtäjä voi kulkea ennen haihtumista. Tämä arvo vaihtelee suuresti sääolojen mukaan mutta Tabler toteaa, että arvo 3000 m vastaa hyvin yleistä keskiarvoa, jota voidaan säätää, jos se osoittautuu käytännön havaintojen mukaan virheelliseksi. Kausiluonteinen kulkeuma Q_t määritellään kaavan 24 avulla. (Tabler, 2003, ss. 35–36)

Kaava 24. Kausiluonteinen lumen kulkeuma Q_t (Tabler, 2003, s. 36)

$$Q_t = 500 \times T \times S_{rwe} (1 - 0.14^{F/T})$$

Jossa:

- Q_t on kausiluonteinen kulkeuma (kg/m)
- T on kulkeutumisetäisyyden maksimi (m)
- S_{rwe} on kulkeutuvan lumen vesiarvo (m)
- F on keruualueen pituus (m)

Lumen kulkeutumisen määrä voidaan siis karkeasti arvioida tuulen $Q_{0.5}$ tai Q_t avulla. Näistä kahdesta Q_t perustaa keskiarvoihin ja on siten parempi karkeaan tarkasteluun.

Lumiaidan korkeuden määrittäminen

Tablerin mukaan nyrkkisääntönä lumiaidan korkeuteen tulisi olla, että aidan tulee olla vähintään 2,4 m korkea. Tämä perustuu ajatukseen, että valtaosa lumesta kulkeutuu lähellä maata. Taulukossa 9 näkyy, että 10 m/s tuulilla 2,4 m korkea aita vaikuttaa 95 %:iin kulkeutuvasta lumesta. Tätä korkeammat aidat tuovat enää vähän lisäystä lumen pidättymiseen. (Tabler, 1991, s. 20)

Taulukko 9. Lumen siirtymisen kulkeutuminen vertikaalinen jakautuminen prosentteina eri tuulen nopeuksilla. Taulukko suomennettu Tablerin esimerkistä. (Tabler, 1991, s.19)

Korkeus (m)	Tuulen nopeus m/s				
	10	15	20	26	30
0,0–0,5	88,5	68,7	51,9	41,1	33,8
0,5–1,0	2,4	8,1	12,6	15,2	16,7
1,0–1,5	1,6	5	8	9,9	11,1
1,5–2,0	1,3	3,9	6,1	7,5	8,1
2,0–2,5	1,2	3,1	4,8	6	6,9
2,5–3,0	1,1	2,7	4,2	5,2	5,8
3,0–3,5	1	2,5	3,6	4,4	5,1
3,5–4,0	1	2,1	3,2	4	4,5
4,0–4,5	1	2	2,9	3,5	4
4,5–5,0	0,9	1,9	2,7	3,2	3,6

Aitaa vasten kinostuva lumi heikentää aidan tehoa vähentämällä aidan vapaata pinta-alaa. Tästä syystä aidan alalaitaan tulisi jättää aukko, joka on korkeudeltaan 10–12 % aidan kokonaiskorkeudesta. Aukon tarkoituksena on vähentää lumen kertymistä aivan aidan juureen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että aidan korkeuden ollessa 2,4 m aidan alalaitaan tulisi jättää n 28 cm aukko. Taulukoon 10 on kerätty suunnittelua helpottamaan aidan korkeuksien ja alalaidan aukkojen määrittämistä. Taulukossa sarake "aitamateriaalin korkeus" kuvaa aitamateriaalin alaa. Sarakkeessa ala-aukko on aitamateriaalin korkeuteen sopivat aukon koot ja sarakkeessa aidan korkeus aukon ja aidan yhteenlaskettu korkeus. (Tabler, 1991, ss. 30–31)

Taulukko 10. Taulukko lumiaidan alalaidan aukkojen koosta (Tabler, 1991, s. 31)

Aidoituksen korkeus (m)	Alaraon koko (m)	Aidan kokonaiskorkeus (m)
1,2	0,15	1,4
1,6	0,2	1,8
2,2	0,28	2,5
2,4	0,3	2,7
2,7	0,33	3,0
3,3	0,41	3,7
3,8	0,46	4,3

Lumiaidan sijainnin määrittäminen

Lumiaita tulisi perustaa suorakulmassa vallitsevaa tuulen suuntaa vasten, mutta 25 asteen poikkeamat on sallittuja. Jos lumiaidan tarkoitus on suojella kohdetta lumelta, tulisi lumiaita olla $35 \times h$, jossa h on lumiaidan korkeus jalkoina (Tabler, 1991, s. 14). Hämäläinen & Rahja (2012) antaa vastaavaksi etäisyysohjeeksi $15\text{--}20 \text{ m} \times h$ metreinä. Etäisyyden tarkoitus on estää lunta kinostumasta suoraa suojattavan kohteen päälle.

Rinteiden kaltevuudella suhteessa tuulen suuntaan on merkitystä syntyvän kinostuksen muotoon. Alarinteessä, jonka kaltevuus on yli 18 % tuuli kasaa lunta tuulen puoleiselle sivustalle ja tuulen vastaisella puolella muodostuu pitkä kinos. Yli 15 % asteen rinteissä kinokset muodostuvat muistuttamaan tilannetta, jossa tuuli on täysin vaakasuorassa. Tästä seuraa se, että kinokset ovat lyhyitä ja matalia. Aitojen sijoittamista ylämäkeen tai aivan niiden eteen, sillä ylämäki pienentää lumen varastoitumiskapasiteettia aidan taakse. (Tabler, 2003, ss.63–64)

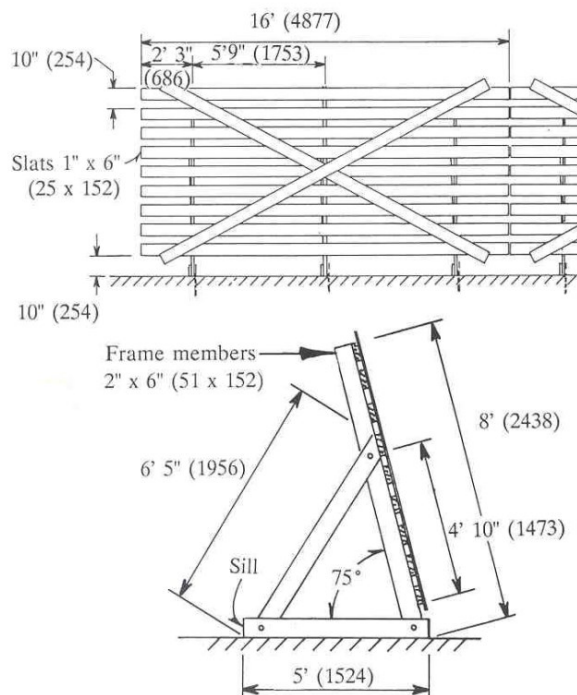
Mäen harjalle asetetuille lumiaidoille muodostuu syvämpi ja pidempi kinos kuin tasamaalle asetetuille aidoille. jos haluaa optimoida lumiaidan varastokapasiteettia maastonmuotojen mukaan, tulisi lumiaita sijoittaa joko rinteiden laelle tai painanteen kuten supan tai ojan eteen, jolloin painanne toimii lisätilavuutena. (Tabler, 2003, s.64)

Lumiaitojen tyypit

Tabler (2003) jakaa Lumiaitojen eri tyypit karkeasti kolmeen eri kategoriaan. Rakenteellisiin lumiaitoihin, siirrettäviin lumiaitoihin ja eläviin aitoihin.

Rakenteelliset aidat ovat tyypillisiä kiinteiden perustuksien varaan perustettuja aitoja, jotka on tarkoitettu jäämään paikalleen ympärivuotisesti. Tyypillisiä tällaisia aitoja ovat esimerkiksi Wyoming tyyppiset aidat (kuva 14) tai täysin kiinteät aidat. Näiden rakenteellisten aitojen hyvänä puolena on, että ne ovat tehokkaita, kestäviä eivätkä vaadi vuosittaista huoltoa, mutta niiden perustamiskustannukset ovat kalliimmat ja ne vievät tilaa kesällä. Tämä voi haitata esimerkiksi viljelmillä. (Tabler, 1991, ss. 31–33)

Kuva 14. Wyoming tyyppinen aita, jonka huokoisuus on 50 %. Suluissa olevat arvot ovat millimetreinä (Tabler, 1991, s. 34)



Siirrettävien aitojen tarkoitus on toimia kausittaisena lumen varastointirakenteena. Nämä aidat voivat olla kevyitä ja edullisia, mutta ne eroavat rakenteellisista aidoista juuri siirrettävyytensä ja kestäväytensä puolesta. Siirrettävät aidat vaativatkin enemmän työtä ja voivat rikkoutua herkemmin, mutta mahdollistavat esimerkiksi pellon käytön kesällä. (Tabler 1991, s. 40)

Elävät aidat (kuva 15) ovat lumen varastointia varten tarkoituksella istutettuja puita tai pensaita. Elävien aitojen hyvinä puolina on niiden edullisuus ja helppohoitoisuus sekä se, että ne tarjoavat myös muita ekosysteemipalveluja, kuten suojaa eläimille. Elävien aitojen haasteena on kuitenkin se, että niiden kasvaminen kyllin pitkiksi ja tuuheiksi voi kestää useita vuosia ja osa maastosta ei välttämättä sovellu kaikille lajeille. Laskennallisesti elävät

aidat ovat monimutkaisempia sillä niiden huokoisuusarvo vaihtelee puiden kasvaessa merkittävästi. (Tabler, 1991, s. 45)

Kuva 15. Elävän lumiaidan keräämä kinos (Tabler, 2003, s. 135)



Huokoisuus

Lumiaitojen huokoisuudella (eng. porosity), on merkitystä siihen, kuinka paljon lunta varastoituu ja millainen on lumiaidan taakse muodostuvan kinoksen profiili. Huokoisuudella tarkoitetaan sitä, kuinka iso osa aidan pinta-alasta on aukkoa, jonka läpi lumi ja tuuli pääsee kulkemaan. Täysin umpinaiset aidat keräävät lunta vain tuulen puoleiselle sivustalle aina siihen pisteeseen, että kinoksen korkeus saavuttaa aidan korkeuden. Tästä syystä umpinaisen aidan lumen varastointikapasiteetti on yleensä vain kolmannes siitä mitä se on 50 % huokoisuuden omaavalla aidalla. (Tabler, 1994, s. 175)

Tabler suosittelee lumen varastoinnin kannalta optimaaliseksi huokoisuudeksi 40–50 % (Tabler, 1994, s. 180). Zhang ym (2024) tutkivat vaakasäleisen aidan lumenkeruun ominaisuuksia tutkimuksessaan *Field measurements and predictions of snow distribution around horizontal-slat snow fences*. Tässä tutkimuksessa lopputulemana oli, että optimaalinen huokoisuus olisi 50–60 %. (Zhang ym., 2024, s. 950)

6.1.2 Lumiaidat vesienhallinnassa

Lumiaitojen hyödyntämisessä vesienhallinnassa on tavoitteena kerryttää talven aikana satavaa lunta tiettyyn kohtaan, jotta keväällä lumen sulamisvedet ovat paremmin ja pidempään hyödynnettävissä.

Stuefer ja Kane (2013) tutki ohjattua lumen kinostamista veden varastointia varten Pohjois-Amerikan tundra aroilla. Alaskassa koekaivauksia tekevät öljy ja kaasuteollisuus käyttävät talvella jäädytettäviä jääteitä koekaivauslaitteiston kuljettamiseen. Jääteiden luominen vaatii luotettavan vesilähteen. Tyypilliset tundran järvet ovat kuitenkin varsin matalia ja siksi myös niistä saatava vesimäärä on pieni. Menetelmän tarkoituksena on hyödyntää talvella esiintyvien lumimyrskyjen mukana liikkuvaa lunta rakentamalla aitoja järven laidalle niin, että lumi kerääntyy kinokseksi järven ylle. Järven ylle kertynyt lumi sulaa kesän aikana järveen, joka lisää järven vesitulavuutta kesällä, joka kantaa seuraavaan talveen asti. (Stuefer & Kane, 2013, ss. 6–7)

Stuefer ja Kane toteuttivat kokeen lumen kinostuksen hyödynnyksestä vuosina 2009–2011. Koe tapahtui Alaskassa North Slope alueella, joka valittiin koealueeksi siellä esiintyvien voimakkaiden tuulien vuoksi. Alueelta valittiin kaksi hydrologisesti samankaltaista matalaa koejärveä johon toiseen asennettiin lumiaita ja toinen toimi kontrollijärvenä. (Stuefer & Kane, 2013, s.10)

Kokeessa käytetty lumiaita oli Wyoming tyyppinen aita, joka oli 3 metriä korkea ja 130 metriä pitkä. Aita sijoitettiin kohtisuoraa vallitsevaan tuulensuuntaan nähden maksimaalisen lumikertymän saavuttamiseksi. Aitojen tulee olla lähellä järveä niin, että sulamisvedet valuvat järveen, mutta Stuefer & Kane eivät kuitenkaan suosittele lumiesteen rakentamista järven jään päälle sillä kinokset hidastavat avoveden muodostumista. (Stuefer & Kane, 2013, ss. 12–14)

Kokeen tuloksena järven vesimäärä oli vuonna 2011 loppukesällä 29 % lisäykseen vuoden 2009 alkutilanteeseen verrattua. Vesimäärä pysyi korkeampana koko kesän ajan, jonka seurauksena järvessä oli enemmän vettä talven tullessa. (Stuefer & Kane, 2013, s. 25)

Lumikinoksen ohjauksessa olennaisena tekijänä on kinostumistilanteiden voimakkuus. Kinostuminen on voimakkainta lumimyrskytilanteissa, jossa vaikuttaa olennaisesti tuulen nopeus. Alaskassa Stuefer & Kanen kokeessa kinostumistilanteiden aikaiset tuulennopeudet olivat 15–21 m/s. (Stuefer & Kane, 2013, s. 8)

7.2 Kerättävän lumen määrän arvioiminen

Perustettavaan lumiaitaan kertyvän lumen määrä on luontaisesti voimakkaasti riippuvainen talvella sataneesta lumesta ja pakkasjaksoista.

Arvio veden varastointikapasiteetista muodostetaankin määrittämällä ilmastodatan perusteella. Tabler:in mukaan riittävä aidan pituus, korkeus ja huokoisuus, jonka perusteella voidaan laskea maksimikapasiteetti.

Tabler antaa kaavan 25 maksimikapasiteetin määrittämiseen.

Kaava 25. Lumiaidan maksimitilavuus Q_c (Tabler, 2003, s. 59)

$$Q_c = (3 + 4 \cdot P + 44 \cdot P^2 - 60 \cdot P^3)H^{2,2}$$

Jossa:

- Q_c on aidan maksimitilavuus t/m (per metri leveyttä)
- P on huokoisuus (yleensä $P=0,5$)
- H on aidan korkeus metreinä

Yleisesti käytetylle 50 % huokoisuudella olevalle Wyoming tyyppiselle aidalle voidaan maksimitilavuuden kaava yksinkertaistaa kaavan 26 tapaan:

Kaava 26. Maksimikapasiteetti 50 % huokoisuuden aidoille (Tabler, 2003, s.111)

$$Q_c = 8,5 * H^{2,2}$$

Jossa:

- Q_c = aidan kapasiteetti t/m
- H = aidan korkeus metreinä

Viimeisenä vaiheena tulee selvittää, kuinka paljon liikkuvasta lumesta aita pystyy pidättämään.

Lumiaidan tehokkuutta (E) laskettaessa tulee laskea $V = Q_c$ (t/m). Jos liikkuvan lumen määrä Q_t on pienempi kuin suunnitellun aidan varastointikapasiteetti Q_c voidaan tehokkuuden laskemiseksi käyttää 50 % huokoisuuden omaaville aidoille kaavaa 27.

Kaava 27. Lumiaidan pidätystehokkuus E (Tabler, 2003, s. 70)

$$E = E_0 \left[1 - \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 \right]^{0,5}$$

Jossa:

- E on pidätystehokkuus
- E_0 on tehokkuus tyhjän aidan aikana. 50 % huokoisille aidoille $E_0=0,95$
- A on kinoksen hetkellinen poikkipinta-ala
- A_e on kinoksen maksimaalinen poikkipinta-ala

Koko talven kertymää E_{ave} voidaan arvioida kaavalla 28 (Tabler, 2003, s. 71).

Kaava 28. Koko talven lumikertymä E_{ave} (Tabler, 2003, s. 71)

$$E_{ave} = [1/(A_f/A_e)](E_0) \left\{ 0.5(A_f/A_e) \left[1 - (A_f/A_e)^2 \right]^{0,5} + 0.5 \sin^{-1}(A_f/A_e) \right\}$$

Jossa

- E_{ave} = keskimääräinen varastointitehokkuus
- A_f = kinoksen poikkipinta-ala kauden lopussa
- A_e = kinoksen maksimi poikkipinta-ala
- E_0 = tehokkuus tyhjän aidan aikana. 50 % huokoisille aidoille $E_0=0,95$

Koska meillä ei ole tiedossa lumen kertymistä ilman olemassa-olevaa mittaustietoa voidaan kaavaan soveltaa arvoja $A_f=Q_t$ ja $A_e = Q_c$ tämä antaa estimaatin, jolla saadaan aidan tehokkuuden arvo. Kertyvän lumen määrä saadaan vähentämällä E_{ave} liikkuvan lumen määrästä Q_t . Jos liikkuvan lumen määrä Q_t on suurempi kuin varastokapasiteetti niin voidaan käyttää kaavaa 29. (Tabler, 2003, s.72)

Kaava 29. Keskimääräinen varastointitehokkuus (E_{ave}) kun $Q_t > Q_c$

$$E_{ave} = E_0 \cdot (0,79) \cdot \left(\frac{Q_c}{Q_t}\right)$$

Jossa:

- E_{ave} = keskimääräinen varastointitehokkuus
- E_0 = tehokkuus tyhjän aidan aikana. 50 % huokoisille aidoille $E_0=0,95$
- Q_c = laskettu maksimikapasiteetti (t/m)
- Q_t = kulkeutuvan lumen määrä (t/m)

7.3 Esimerkki lumiaitojen hyödyntäminen Suomessa

Tässä kappaleessa käsitellään teoreettista esimerkkiä lumiaitojen hyödyntämisestä veden varastointiin Suomen ilmasto oloissa.

Suomessa on luovuttu lumiaitojen käytöstä tieverkon suojaamiseksi, koska tilapäisten lumiaitojen pystytys ja poisto on osoittautunut liian työlääksi ja auraukcaluston kehittyminen on vähentänyt lumiaitojen kustannustehokkuutta. (Hämäläinen & Rahja, 2012, s.61; YLE,2012)

Suomessa 2020 luvun korkeimmat talvikuukausien tuulennopeuksien keskiarvot ovat Kokemäen havaintoasemalla olleet 13 m/s. Stuefer & Kanen tutkimuksessa tuulennopeudet olivat 15–21 m/s. Nopeammat tuulet aiheuttavat merkittävästi suurempia mitoitusmääriä.

Keruualueen pituus on Suomessa yksi menetelmän kannattavuutta rajoittavista tekijöistä. Lähteet kuten Tabler (2004) käyttävät keruualueina useita kilometrejä. Suomessa maatalousmaiseman peltoaukeita rikkovat metsäsaarekkeet, joet ja suuremmat ojat.

Esimerkkilaskenta:

Muodostetaan teoreettinen sijainti:

- 2020-luvun talvikuukausien keskimääräinen tuulen suunta: 188° -Etelä
- Keruualue $F = 600$ m
- Korkeus $H = 2,4$ m
- Aidan pituus $L = 20$ m

- Huokoisuus $P = 0,5$
- Lumen vesiarvo talven lopussa (S_{we}) on 33 mm (kg/m^2)

Määritellään kulkeutuvan lumen määrä:

- $S_{rwe} = 0,2 \times 0,033 \text{ m}$
- $S_{rwe} = 0,0066$

Arvio lumen määrästä Q_t (kaava 24) jossa $T = 3000 \text{ m}$, $F = 600 \text{ m}$ ja $S_{rwe} = 0,0066 \text{ m}$

- $Q_t = 500 \times 3000 \text{ m} \times 0,0066(1 - 0,14 \times ((600 \text{ m} / 3000 \text{ m}))$
- $Q_t = 9769 \text{ kg/m} = 9,8 \text{ t/m}$ (leveydeltä tuulen suuntaan)

Lasketaan aidan varastointikapasiteetti Q_c kaavan 26 mukaan

- $Q_c = 8,5 \times H^2,2$ [$H = 2,4$]
- $Q_c = 60 \text{ t/m}$

Koska $Q_c > Q_t$ niin käytetään tehokkuuden määrittämiseen kaavaa 27 joka antaa aidan arvioiduksi tehokkuudeksi E_{ave} noin 0,75

Täten aita pysäyttää: $Q_t \times 0,75 = 16 \times 0,75$ eli 7,33 t/m ja koska aidan pituus on 20 m teoreettinen kerättävä määrä on $7,33 \times 20 = 146,5 \text{ t}$ lunta. Lumen vesisisältö voi vaihdella merkittävästikin mutta karkeasti voidaan sanoa, että muunnos on 1/10 eli vettä olisi 14,65 t eli noin 15 m^3 .

Huomioitavaa on, että tässä laskelmassa ei otettu huomioon aidan päissä tapahtuvaa tuulieroosiota, joka pienentää varastoituvan lumen määrää. Eikä myöskään sitä, että mikä on kattavan hangen paksuus ilman aidan aiheuttamaa kinostusta. Näiden seikkojen takia kerättävä lumimäärä olisi vieläkin pienempi.

Taulukossa 11 on kuvattuna yllä olevien laskelmien tuloksia 2020-luvulta. Lumen vesiarvon tiedot on poimittu Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä HYD-valikosta, mutta vastaavat arvot saa poimittua myös julkisista lähteistä. Vesiarvoista on poistettu talvikuukausien 0 arvot sillä ne eivät ole oleellisia lumen kertymisen kannalta.

Taulukko 11. Teoreettisen lumiaidan lumenkeruupotentiaalin laskentaa 2020-luvun keskimääräisillä vesiarvoilla (Syke 2025)

Talvi	S_{we} (mm)	S_{rwe} (m)	Q_t (t/m)	Q_c (t/m)	E_{ave} (%)	Kerätty lumi(t/m)	Q_{tot} (t)
2020	5,4	0,0011	1,6	60	18,3	0,29	5,8
2021	35,3	0,0071	10,3	60	90,2	9,28	185,6
2022	50,5	0,0101	14,7	60	87,5	12,89	257,7
2023	37,7	0,0075	11,0	60	89,7	9,87	197,4
2024	42,1	0,0084	12,3	60	89	10,92	218,4
2025	28,6	0,0057	8,3	60	91,2	7,61	152,3

7.4 Lumiaitojen kustannushyötyanalyysi

Lumiaitojen perustamiskustannukset vaihtelevat merkittävästi eri menetelmien mukaan. Tässä kappaleessa käsitellään kiinteiden aitojen ja elävien aitojen kustannuksia.

Esimerkkikohteen vedentarve on 1000 m^3 eli $1\,000\,000 \text{ kg}$. Lumiaitaan tulisi siis varastoida lunta $1\,000\,000 / 100 \text{ kg/m}^3 = 10\,000 \text{ m}^3$. Hyödyntäen kappaleessa 7.3 käytetyn esimerkkilaskelman arvoja $Q_t = 9,8 \text{ t/m}$ ja $E_{ave} = 0,75$ saadaan kerääntyvän lumen keskiarvoiseksi määräksi $n = 7,3 \text{ t/m}$.

$$L = \frac{1\,000\,000 \text{ kg}}{7\,326 \text{ kgm}} = 136,5 \text{ m}$$

Tabler (2003) esittää Wyoming tyyllisen lumiaidan piirustukset ja tarvittavat osalistaukset. Hinnat rakennusmateriaaleille, perustuvat 30.8.2025 poimituihin hintatietoihin K-raudan ja Byggmaxin verkkosivuilta. Puutavaraksi valikoitui lähinnä Tablerin mittoja vastaavat painekyllästetyt tuotteet. Rakennusmateriaalien kokonaiskustannus 137 m aidalle on $4\,398,86 \text{ €}$. Tuotteiden toimitukseen varataan 500 € .

Rakennusmateriaalien ja kuljetuksen yhteiskustannus on:

$$4\,398,86 \text{ €} + 500 \text{ €} = 4\,898,86 \text{ €}$$

Työaika-arvioksi Tabler mainitsee, että koulutautunut ryhmä kokoaa yhden paneelin tunnissa. Koska paneeleita tulee 137 m aitaan 56 kappaletta ja arvioidaan 3 hengen työksi saadaan työaika arvioksi. (Tabler, 2003, s.152)

$$56 \times 3 = 168 \text{ henkilötyötuntia (h)}$$

Työtuntihinnan arvioksi voidaan ottaa tuntipalkka Talorakennusalan vuoden 2025 työehtosopimuksen mukaiseksi urakkapalkaksi on mainittu 28,01 €. (Rakennusliitto, 2025)

Työn osuuden hinta:

$$168 \text{ h} \times 28,01 \text{ €} = 4\,705,68 \text{ €}$$

Wyoming tyyppinen aita voi kestää hyvin hoidettuna 25–30 vuotta. Ainakin parin vuoden päästä perustamisesta tulee kiristää aidan liitoksia, sillä kuivunut puu on voinut löystyttää pultteja. Vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi Tabler määrittää 5 % investointikustannuksista, josta kertyy merkittävä osa aidan kokonaiskustannuksista. (Tabler, 2003, ss. 159; 19)

Vuosittaiset hoitokulut 5 %:

$$(4\,705,68 \text{ €} + 4\,898,86 \text{ €}) \times 0,05 = 480 \text{ €}$$

30 Vuoden käyttöaikana:

$$480 \text{ €} \times 30 = 14\,406,82 \text{ €}$$

Elinkaarikustannukset ovat siis

- Rakentamiskustannukset 9 604,54 €
- Ylläpitokustannukset 14 406,82 €
- Kokonaiskustannukset 24 011,37 €
- Per vuosi (30 v) 800 €

Suhteutettuna keskimääräiseen 1000 m³ aidasta saatavaan lisävesimäärään saadaan kuution hinnaksi 0,8 €/m³.

Elävien lumiaitojen elinkaarikustannukset poikkeavat olennaisesti rakenteellisista aidoista. Elävien aitojen käyttöikä voi olla jopa 60 vuotta ja lajivalinnan mukaan se voi toimia myös tulonlähteenä. Haittapuolena on se, että sen tehokkuus saavuttaa huippunsa 5–20 vuoden kuluessa istutuksesta ja ensimmäiset vuodet taimisto vaatii aktiivisempaa hoitoa, kuten kastelua ja suojausta. (Tabler, 2003, s. 246)

Elävien aitojen perustamiskustannusten raaka-arvio (Taulukko 12)

Euroopanpähkinäpensaan (*corylus avellana*) taimet n 11 €/kpl (Savonlinnan taimisto, 2025). 1,5 metrin istutusvälillä 137 m:n aitaan tulee 91 tainta. Materiaalien kuljetuskustannukset ovat samat kuin rakenteellisessa aidassa. Elävää aitaa suojaavaksi aidaksi valitaan tolilla tuettu verkkoaita, jonka pituudeksi tulee 278 m. Hankkija Oy:lta ja Puuilo Oy:sta poimittujen hintatietojen perusteella suoja-aidan kokonaiskustannukseksi tulisi 1 209,38 €. Perustamisen työn arvioidaan kestävän 40 h sopivalla maakairalla.

Taulukko 12. Elävän lumiaidan perustamiskustannukset

Taimet	1 001,00 €
Aita	1 209,38 €
Kuljetuskustannukset	500,00 €
Työkustannukset	1 120,40 €
Yhteensä	3 830,78 €

Ylläpitokustannukset 5 %

$3\,830,78\text{ €} \times 0,05 = 191\text{ €}$

60 v käyttöiän aikana kustannukset ovat 11 492,34 €

Elinkaaren aikaiset kustannukset ovat siis:

$11\,492,34\text{ €} + 3\,830,78\text{ €} = 15\,323,12\text{ €}$

Kustannukset per vuosi:

$15\,323,12\text{ €} / 60\text{ a} = 255,4\text{ €/a}$

Suhteutettuna keskimääräiseen 1000 m³ aidasta saatavaan lisävesimäärään saadaan kuution hinnaksi 0,26 €/m³.

Elävien lumiaitojen suunnittelu on erilaista, kun kiinteiden aitojen ja vastaava lumen pidentävyys voi vaatia useampia rivejä tai eri kasvien hyödyntämistä. Etenkään kuusen taimista tehty ylimääräinen rivi ei ole merkittävä kuluerän lisäys, jolla voidaan tiivistää talviaikaista huokoisuutta. Tablerin mukaan rakenteelliset ja elävät aidat ovat kustannuksiltaan samansuuruisia, kun otetaan huomioon koko elinkaari. Elävien aitojen hintaa nostaa niiden ensimmäiset vuodet, jolloin ne eivät vielä pidätä lunta ja vaativat intensiivisempää huolenpitoa. (Tabler, 2003, s. 245)

7.5 Lumiaitojen hyödyntämisen yhteenveto

Lumiaitojen avulla voidaan ohjata lumen kinostumista haluttuun paikkaan. Jotta lumiaidoista olisi hyötyä tulisi sijainnin olla tarkkaan suunniteltu. Oleellisia asioita lumiaidan perustamisessa lisäveden keräämiseksi ovat mahdollisimman suuri keruualue, tarve varastoida vettä ja kasteluallas johon vedet kerätään.

Lumiaitojen rakenteessa oleellista on:

- aidan suuntaus kohti vallitsevaa talviaikaista tuulen suuntaa
- aidan huokoisuus eli läpäisevyys tulisi olla 50–60 %
- korkeudeksi riittää 2,5 m koska se korkeus saavuttaa 95 % kulkeutuvasta lumesta
- aidan alalaitaan tulisi jättää aukko, joka on noin 10 % aidan korkeudesta
- tällä edistetään optimaalista kinoksen muodostumista
- aita tulisi perustaa kyllin kauas suojattavasta kohteesta

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin yksinkertaistettua versiota Tablerin esittämistä laskelmista. Todellisten keruumäärien määrittämiseksi tulisi tehdä kokeita sillä Suomen ja Pohjois-Amerikan maastot eroavat merkittävästi toisistaan.

Kustannuslaskelmissa havaittiin, että tarvittavan määrän vettä keräämiseen tarvitaan laajoja aitoja. Tämän takia lumiaidoilla saavutettava veden kuutiohintaa €/m³ nousi 0,8–0,26 €. Kustannuksissa oli kuitenkin paljon tulkinnan varaa, sillä iso osa kustannuksista oli työn osuutta, joka voidaan tuoda alemmas tai poistaa jos lisätään oman työn osuutta. Rakentamisen voi myös tehdä osissa, jolloin investointia ei tarvitse tehdä kerralla. Tämä voi jopa olla viisasta, sillä näin voi varmistua aidan oikeasta sijainnista ennen resurssien sitouttamista.

Aidan sijoittamisessa tulisi mahdollisuuksien mukaan ottaa huomioon mahdollisia suojeltavia kohteita, kuten teitä, joiden suojaamisesta voi saada hyötyä.

8 Tulokset

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin lumen ja jään hyödyntämistä kasteluveden varastoinniseksi Suomen olosuhteissa.

Opinnäytetyön menetelmänä oli kirjallisuuskatsaus, jonka pohjalta laskettiin teoreettiset laskelmat eri lumen ja jään varastoinnin menetelmien hyödynnettävyydestä Lounais-Suomessa. Ilmastollisesti lumiset pakkastalvet tulevat harvinaistumaan mutteivat katoa kokonaan ilmastomuutoksen seurauksena. Tämä jättää auki mahdollisuuden hyödyntää lumen ja jään varastoinnin menetelmiä kasteluveden varastointiin alkukesän kuivuuksia varten.

Opinnäytetyössä käsitellyt menetelmät olivat:

- Lumen keruu pellolta
- Tekolumen muodostaminen
- Keinotekoiset jäätiköt
- Lumiaita (rakenteelliset)
- Lumiaita (elävä)

Näiden lisäksi tarkasteltiin lumen varastorakenteiden sulamisen matematiikkaa ja käytettävyyttä pidentämään lumivarastojen säilyvyyttä pidemmälle kasvukaudella. Koska kasteluveden varastointiin tarkoitettujen lumi- ja jäävarastojen tarkoituksena ei ole säilyä seuraavaan talveen niin teoreettisten laskelmien mukaan hyvin pienet eristekerrokset tai pelkkä vedenpitävä peite antaa riittävän suojan, jotta lumivarastot luovuttavat vettä tasaisesti pitkin kesää.

Eri lumen ja jään varastoinnin menetelmien käytettävyyttä pyrittiin arvioimaan kahden kysymyksen pohjalta:

- Onko menetelmä käytettävissä Suomen olosuhteissa?
- Mitä kustannuksia käyttöön liittyy?

Taulukkoon 13 on kerätty opinnäytetyössä käsiteltyjen menetelmien esimerkkilaskelmien tuloksia. näistä voidaan havaita, että eri menetelmien välillä ei ole suurta eroa kuutiohinnassa. Pellolta kerättävän lumen hintahaitari on suuri, mutta siinäkin pienimmät arvot ovat linjassa muiden tulosten kanssa, joissa kaikki jäävät alle 1 €/m³. Vertailun vuoksi Vesihuollon tietojärjestelmän (VEETI) mukaan vuonna 2024 Suomen koko maan keskiarvo veden käyttömaksusta oli 2,61 €/m³. (VEETI, 2026)

Esimerkkilaskelmia tulkittaessa on huomioitava, että laskentoihin liittyy runsaasti epävarmuuksia ja jatkohyödynnyksessä kannattavuudet tulisi laskea kullekin kohteelle erikseen. Merkittävimpiä epävarmuuksia tulee yksikköhinnoista ja sääolosuhteista, jotka voivat vaikuttaa suuresti lumen koostumukseen tai veden jäätymiseen.

Lumiaitojen osalta laskennassa on perustamiskustannukset jaettu niiden odotetulle 30 vuoden käyttöiälle. Muille menetelmille tällaista arvoa on vaikeampi laskea.

Taulukko 13 Lumen ja jään varastoinnin suuntaa antavat hinnat per 1000 m³ varastoitua vettä.

	Investointikustannukset	Käyttökustannukset (€/ 1000 m ³)	€/ 1 m ³ vettä	€/ 1 m ³ vettä AVG
Lumen keruu	0	1 088–4 950 €	0,36–4,95 €	2,65 €
Tekolumi	1 000–20 000 €	395,72 €	0,40 €	0,40 €
Jäästupa	5 557,98 €	366,13 €	0,36 €	0,36 €
Lumiaita (rakenteelliset)	24 011,37 €	800,00 €	0,80 €	0,80 €
Lumiaita(elävä)	15 323,12 €	255,40 €	0,26 €	0,26 €

Eri menetelmien käytettävyyteen on olemassa reunaehtoja ja suosituksia, milloin menetelmää kannattaa käyttää. Taulukkoon 14 on kerätty eri menetelmien hyvät puolet ja haasteet sekä reunaehtoja.

Lumen keruu pellolta

Lumen keruu pellolta on vahvasti riippuvainen talvella satavan lumen määrästä.

Positiivisena puolena on, että menetelmä ei edellytä kiinteitä investointeja vaan lumen keruuseen ja varastointiin pystytään hyödyntämään muuta maatilan koneistoa.

Riippuvaisuus kunkin talven lumitilanteesta tekee tästä menetelmästä epävarman, mutta sen käyttö on myös joustavaa, sillä päätös lumen varastoinnista voidaan tehdä vasta silloin, kun näyttää siltä, että talvesta tulee runsasluminen. Sijainniltaan lumen keruu on kannattavinta alueilla, joilla ei ole mahdollisuutta hyödyntää vesistöjä veden kasteluun tai veden varastointiin. Monesti tällaisessa kohteessa ei harrasteta kastelua, joten lumen

keruu säätösalaajitetuilta pelloilta voisi olla tehokkain tapa hyödyntää tätä menetelmää sillä säätösalaajitusta voidaan hyödyntää myös salaajakasteluun.

Tekolumen muodostaminen lumivarastoksi

Tämän menetelmän reunaehtona on pakkanen ja pääsy luotettavaan vesilähteeseen, sekä sähköön varastokohteessa. Menetelmä edellyttää hankintoja vedensiirtoon vaadittaviin pumppuihin, putkistoon ja itse lumitykkiin. Vedensiirtoon voidaan hyödyntää mahdollisesti tilalla kastelua varten valmiina olevaa putkistoa ja pumppuja. Sijainniltaan tekolumenteko onnistuu kohteille, joissa on pääsy vesilähteeseen ja sähköön. Jotta menetelmä olisi kannattavaa kesäaikaiseen sadetukseen nähden, vesistön on oltava taipuvainen kuivuuteen tai huonoon veden laatuun kasvukaudella.

Keinotekoiset jäätiköt

Keinotekoiset jäätiköt tai jäävarastot (AIR) ovat kattotermi eri veden jäätymistä hyödyntäville ratkaisuille. Menetelmän reunaehtoina on pakkanen ja pääsy luotettavaan vesilähteeseen, joka on taipuvainen kasvukauden aikaiseen kuivuuteen tai heikkoon veden laatuun. Jos jäävaraston tyyppi on jäästupa se vaatii todennäköisesti myös sähköä varastointikohteessa pumppujen käyttöön. Muut jäävarasto tyytit eivät tarvitse sähköä kuin veden siirtoon, joten ne mahdollistavat alhaisemmat kustannukset. Sijainniltaan jäävaraston kohde tulee olla lähellä vesistöä ja sillä on oltava sähköyhteys pumppujen käyttöön. Jäävarastojen perustamispaikan maaperän kaltevuus tulee olla mahdollisimman tasainen, jotta veden siirtyminen kohdealueelta on mahdollisimman hidasta.

Lumiaidat

Menetelmänä tämä on kaikkein passiivisin, mutta myös epävarmin. Lumiaitojen toiminnan reunaehtoja on pakkanen, lumisade ja tuuli. Lumiaidat tulee sijoittaa kohtisuoraan vallitsevaan tuulensuuntaan nähden ja lähelle veden käyttökohdetta, mutta se ei ole riippuvainen vesistön läheisyydestä tai sähköyhteydestä. Perustamiskustannukset ovat lumiaidoissa merkittävät ja vaativat ajoittaista kunnostamista, mutta eivät jatkuvaa seurantaa kinoksen muodostumisaikana. Kinosten laajan pinta-alan takia niiden suojaaminen on vaikeaa, joten kinokset joko vaativat koneellista kasaamista tai sitten hyväksytään, että ne luovuttavat vettä muita varastointimenetelmiä nopeammin. Elävien aitojen osalta lumiaidat voivat tuottaa myös muita hyödykkeitä kuten pähkinöitä, hedelmiä sekä ekosysteemipalveluita. Sääolosuhteiden epävarmuuden takia on suositeltavaa

suunnitella lumiaitojen sijoittaminen ja käyttö monihyödylliseksi eikä pelkästään veden varastointiin. Elävien lumiaitojen hyödyntäminen olisi hyödyllistä peltometsäviljelyssä, jossa yhdistetään maa ja metsätaloutta samalle alueelle.

Taulukko 14 Eri menetelmien hyvät- ja huonot puolet sekä reunaehdoja

Menetelmä	Hyvät puolet	Haasteet	Reunaehdot & kommentit
Lumen keruu	<ul style="list-style-type: none"> • Päätös on tehtävissä tilanteen mukaan • Ei kiinteitä investointeja 	<ul style="list-style-type: none"> • Riippuvainen lumimäärästä • Epävarma • Vaatii työtä 	<ul style="list-style-type: none"> • Paras kohteissa ilman vesistöä • Säättösalaojitus lisää tehokkuutta
Tekolumi	<ul style="list-style-type: none"> • Ei riippuvainen luonnonlumesta • Hallittavissa oleva menetelmä 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaatii investointeja (lumitykki, pumput) • Riippuvainen sähköstä ja vesilähteestä • Korkeat käyttökustannukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Pääsy vesilähteeseen ja sähköön • Pakkanen välttämätön • Vesistön läheisyys
Keinotekoiset jäätiköt	<ul style="list-style-type: none"> • Suuri varastointipotentiaali • Joissain tyypeissä ei tarvita sähköä 	<ul style="list-style-type: none"> • Rakentaminen työlästä • Riippuvainen pakkasesta • Jäätymisongelmat vaativat tarkkailua 	<ul style="list-style-type: none"> • Pakkanen ja vesilähde välttämättömiä • Jäästupa vaatii sähköä • Vaatii tilaa ja tasaisen maaston • Lähellä vesistöä
Lumiaidat	<ul style="list-style-type: none"> • Passiivinen menetelmä • Elävät aidat tuottavat lisähyötyjä 	<ul style="list-style-type: none"> • Epävarma (riippuvainen säästä) • Perustamiskustannukset merkittävät • Kinosten suojaaminen vaikeaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Pakkanen, lumisade ja tuuli välttämättömiä • Aidat kohtisuoraan tuuleen • Lähelle käyttökohdetta • Mahdollisimman pitkä keruualue

9 Pohdintaa

Lumen ja jään varastointi ja hyödyntäminen kastelukäyttöön on toistaiseksi Suomessa vielä täysin hyödyntämätön menetelmä. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että sekä kuivuusriskit että niihin varautuminen ovat vasta viime vuosina herättäneet laajempaa mielenkiintoa, eikä sopeutumistoimille ole aiemmin nähty tarvetta. Myöskään Suomessa ei laajasti ole totuttu ajattelemaan vettä rajallisena resurssina, jonka määrää tulisi aktiivisesti turvata. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena ei kuitenkaan ole väittää, että kuivuus tai kryösfäärin hyödyntäminen tulisi olla suomalaisen vesienhallinnan tutkimuksen keskiössä. Tarkoituksena on pikemminkin avata keskustelua siitä, että veden kiinteä olomuoto on meillä mahdollisuus, jota useimmilla kuivuudesta kärsivillä valtioilla ei ole käytettävissään. Suomessa on paljon osaamista talveen liittyen ja ennen kaikkea lähes joka vuosi toistuvat talviset testiolosuhteet, joissa lumen ja jään hyödyntämisen teoriaa ja käytäntöjä voidaan testata. Ilmastollisten olosuhteidemme vuoksi meille voisi nopeasti kertyä sellaista osaamista, joka voisi hyödyttää laajemmin myös muita maailman kylmiä alueita.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellut menetelmät ja niihin liittyvät laskelmat ovat suuntaa antavia, eikä niitä voida käyttää yksin investointipäätösten perusteena. Ne sisältävät runsaasti muuttujia, joiden varmistaminen edellyttäisi kenttäkokeita ja yksityiskohtaisempia tutkimuksia, joita tässä työssä ei ollut mahdollista toteuttaa. Puutteista huolimatta lumen ja jään varastoinnin eri menetelmillä on mielestäni Suomessa potentiaalia. Yksi merkittävimmistä tulevaisuuden kuivuuteen liittyvistä haasteista tulee olemaan Suomessa ja maailmalla vesidiplomatia tai tarkemmin se, kenellä on oikeus käyttää vettä tilanteissa, joissa vesiolosuhteet eivät mahdollista sen hyödyntämistä totutulla tavalla. Suomessa ei vuonna 2025 vielä valvottu tai edellytetty kasteluilmoitusten tekemistä, mutta keinokastelun yleistyessä veden omistajuuden ja riittävyys kysymykset nousevat väistämättä jossain vaiheessa esiin. Lumen ja jään hyödyntämisen tärkeimpiä etuja on se, että menetelmillä pyritään ottamaan talteen vettä talviaikaan, jolloin vettä on yleensä runsaasti tarjolla, ja säilömään se hyvälaatuisena pitkälle kesään. Näin voidaan vähentää kesäaikaan tapahtuvaan vedenottoon kohdistuvaa painetta vesistöissä ajankohtana, jolloin virtaamat ovat pienimmillään. Tällaisella talviaikaisella vedenotolla voitaisiin jopa välttää vesiluvan tarve, koska vedenotosta ei oletettavasti aiheudu haittaa vesistöille talviaikaan, mikäli vedenotto pysyy kohtuullisena.

Tässä opinnäytetyössä jouduttiin jättämään pois monia toteutusvaihtoehtoja sekä menetelmien optimointia, joilla lumen ja jään varastoinnin kustannustehokkuutta voitaisiin parantaa. Yhtenä esimerkkinä voidaan mainita kastelultaan hyödyntäminen veden

välivarastona, josta vesi pumpataan varsinaiseen maalla olevaan jäävarastoon. Tämä välivarasto voidaan täyttää pumppaamalla vettä edullisen energian aikaan tai hyödyntämällä esimerkiksi veden liike-energialla toimivaa oinaspumppua.

Toinen tärkeä huomio liittyy eri menetelmien yhdistämiseen veden hankinnan maksimoimiseksi. Esimerkiksi elävien lumiaitojen lisäksi kohdepelloilta voidaan ajaa talvella sataneet lumet samaan varastoon, jota voidaan tarvittaessa täydentää vaikkapa lumitykillä riittävän volyymin saavuttamiseksi. Näin lumen ja jään varastointia voidaan mitoittaa tarvelähtöisesti ja välttää ylimääräisiä kustannuksia. Tällaiset yhdistelmäratkaisut ja mahdollisesti laajempi valuma-alueellinen suunnittelu, yhdistettynä muihin vesienhallinnan menetelmiin, voisivat tuoda odottamattomia hyötyjä muun muassa pienten uomien hydrologiaan, joissa veden laatu ja lämpötila ovat merkittäviä tekijöitä vesieliöiden hyvinvoinnin kannalta.

Tässä opinnäytetyössä käsitellyistä lumen ja jään varastoinnin menetelmistä nousi esiin jatkotutkimustarpeita, jotka voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan:

- 1) Opinnäytetyön tulosten varmistaminen ja tarkentaminen kenttäkokeilla. Tässä opinnäytetyössä esitellyt lumen ja jään varastoinnin menetelmiin liittyvät laskelmat perustuvat kirjallisuudesta saatuihin matemaattisiin kaavoihin ja suomalaisiin meteorologisiin tilastoihin. Kaavat eivät ole optimoituja Suomen olosuhteisiin, vaan niitä tulisi kalibroida kenttäkokeiden avulla. Tällaisia muuttujia ovat esimerkiksi ilmankosteus ja auringon säteilykulma.
- 2) Lumi- tai jäävarastosta sulavan veden käyttäytyminen ja hyödyntäminen. Jään sulaessa vedeksi se alkaa liikkua ja altistuu uusille muuttujille, kuten haihtumiselle ja imeytymiselle. Olisi siksi tärkeää selvittää, miten sulavasta vedestä saadaan mahdollisimman suuri osa hyötykäyttöön mahdollisimman pienillä kustannuksilla.
- 3) Lumen ja jään varastoinnin menetelmien optimointi. Tämä saattaa edellyttää pitkäaikaisempaa koetoimintaa, jossa pyritään varastoitavan lumen ja jään kustannustehokkaaseen optimointiin ja ratkaisemaan tunnistettuja haasteita, kuten vedensiirtolinjaston ja pumppujen jäätymistä.

Tarkemmat tutkimuskysymykset määräytyvät kunkin lumen ja jään varastoinnin menetelmän omista tunnuspiirteistä. Näiden jatkotutkimusten avulla lumen ja jään varastoinnin menetelmiä voidaan kehittää edelleen kohti valmiita, käytännön sopeutumisen ratkaisuja.

Lähteet

- Aarnipuro, Y. (2004). Kalanviljelyn laitostekniikka Suomessa – Tuloveden johtaminen ja käsittely. *Kala- ja riistaraportteja*, 302. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.
<https://jukuri.luke.fi/server/api/core/bitstreams/7d4267e6-b84d-4fec-b60c-76a807d4ed20/content>
- Ahopelto, L. (2024). Drought in water abundant Finland: Tools and data for drought management. Aalto-yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-6742-9>
- Ahopelto, L., Parjanne, A., & Tuukkanen, T. (2024). Kuivuusriskien hallinnan kansalliset suuntaviivat. *Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja* 2024:26.
<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/7f3a14db-4b1b-407a-acf0-489a3a1465e1/content>
- Baccolo, G. (2021). Did you know about Artificial Glaciers? Cryospheric Sciences | Blogs of the European Geosciences Union. <https://blogs.egu.eu/divisions/cr/2021/08/27/did-you-know-about-artificial-glaciers/>
- Balasubramanian, S., Hoelzle, M., & Waser, R. (2023). Fountain scheduling strategies for improving water-use efficiency of artificial ice reservoirs (Ice stupas). *Cold Regions Science and Technology*, 205, 103706. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103706>
- Buck, C. (ohjaaja). & Lee, J. (ohjaaja). (2013). Frozen [elokuva]. Walt Disney Pictures.,
- Consensus. (2025). Introducing: Consensus Deep Search. <https://consensus.app/home/blog/deep-search/>
- Hankkija Oy. (2025). Neste Pro Moottoripolttoöljy -29/-38, talvilaatu. Viitattu 23.2.2026.
<https://www.hankkija.fi/tuotantopankset/polttoaineet-ja-lammitysoljy/ia-neste-pro-moottoripolttooljy-2938 -talvilaatu-2037013/>
- Hämäläinen, E., & Rahja, J. (2012). Yksityisteiden kunnossapito. Suomen Tieyhdistys.
<https://www.tieyhdistys.fi/site/assets/files/1366/ytienkunnpitoss.pdf>
- Ilmatieteen laitos. (n.d.-a). Havaintojen lataus. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- Ilmatieteen laitos. (n.d.-b). Tuuliruusut. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliruusut>
- Johansson, E. L. (2012). The melting Himalayas: Examples of water harvesting techniques [Bachelor's thesis, Lund University].
- Lintzén, N., & Knutsson, S. (2018). Snow storage – Modelling, theory and some new research. *Cold Regions Science and Technology*, 153, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.04.015>
- Liu, S. Y., Wu, T. H., Wang, X., Wu, X. D., Yao, X. J., Liu, Q., Zhang, Y., Wei, J., & Zhu, X. (2020). Changes in the global cryosphere and their impacts: A review and new perspective. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 12(6), 343–354. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2020.00343>
- LUOKO ry. (2023). Kasteluopas 2023. Salaojayhdistys ry. https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2023/06/Kasteluopas_2023.pdf

- Luomaranta, A., et al. (2025). *Sateisuuden havaittuja ja ennakoituja muutoksia*. Ilmatieteen laitos. <https://doi.org/10.35614/isbn.9789523362055>
- Maanmittauslaitos.(2025). Karttapaikka. <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/?lang=fi>
- Motiva. (2010). Energiatehokas hiihtokeskus. https://www.motiva.fi/files/5287/Energiatehokas_hiihtokeskus.pdf
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., & Öistämö, J. (2008). Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä (6. painos). Tammertekniikka: AMK-kustannus. <https://www.finna.fi/Record/vaari.1336047?imgid=1>
- Nüsser, M., Dame, J., Kraus, B., Baghel, R., & Schmidt, S. (2019). Socio-hydrology of “artificial glaciers” in Ladakh, India: Assessing adaptive strategies in a changing cryosphere. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1327–1337. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0>
- Oerlemans, J., Balasubramanian, S., Clavuot, C., & Keller, F. (2021). Growth and decay of an ice stupa in alpine conditions – a simple model driven by energy-flux observations over a glacier surface. *The Cryosphere*, 15(6), 3007–3012. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3007-2021>
- Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P., & Äijö, Helena. (2016). Maan vesi- ja ravinnetalous. Salaojayhdistys ry. ISBN 978-952-5345-22-3.
- Pakarinen, M. (2012). *Maalämmön hyödyntäminen matalaporauksella*. [Opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu]. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/45183/Lopullinen%20versio.pdf>
- Parkkila, P. (2025). Kuva lumenvarastoinnista Tampereen Kaupin urheilupuistossa.
- Peltonen-Sainio, P., Laurila, H., Jauhiainen, L., & Alakukku, L. (2015). Proximity of waterways to Finnish farmlands and associated characteristics of regional land use. *Agricultural and Food Science*, 24(1), 24–38. <https://doi.org/10.23986/afsci.48045>
- Pikkarainen, K. (2017). *Puhdas kuin lumi?* [Pro gradu-tutkielma, Helsingin yliopisto]. <http://hdl.handle.net/10138/299030>
- Pumppulohja Oy. (n.d.). Tekninen lisäinformaatio: Painehäviöiden laskeminen letkuissa ja putkissa [PDF]. <https://www.pumppulohja.fi>
- Rakennusliitto. (2025). Talonrakennusala. <https://rakennusliitto.fi/tyoehtosopimukset/talonrakennusala/>
- Rogstam, J., & Dahlberg, M. (2011). Energy usage for snowmaking. <https://www.ekanalys.se>
- Rolstad, C., & Oerlemans, J. (2005). The residual method for determination of the turbulent exchange coefficient applied to automatic weather station data from Iceland, Switzerland and West Greenland. *Annals of Glaciology* 42. DOI: 10.3189/172756405781813041
- Savonlinnan taimisto. (2025). Metsä- ja koristepuiden, sekä -pensaiden taimet 2025–2026. Savonlinnan taimisto. <https://taimet.net/index.php?pageid=21&aid=64&kieli=fi>

- Skogsberg, K. (2005). Seasonal Snow Storage for Space and Process Cooling. Luleå University of Technology Department of Civil and Environmental Engineering Division of Architecture and Infrastructure. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990071/FULLTEXT01.pdf>
- Skogsberg, K., & Nordell, B. (2001). Skogsberg, K., & Nordell, B. (2001). The Sundsvall hospital snow storage. *Cold Regions Science and Technology*, 32(1), 63–70. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00021-5)
- Snellman, R., & Todorovic, S. (2023a). Kuivuusvaara ja -haavoittuvuuskarttojen tuottaminen Suomessa. Suomen ympäristökeskus Syke. <https://vesi.fi/aineistopankki/2990-2/>
- Snellman, R., & Todorovic, S. (2023b). Kuivuusriskit Suomessa. Kuivuusriskien hallinta Suomessa KUHASUO. <https://kuivuus.shinyapps.io/kuivuusriskit/>
- Snowgun. (2026). Snowgun lumitykkiä. SNOWPARK OÜ. Viitattu 23.2.2026 <https://snowgun.eu/fi/products/>
- Stuefer, S. L., & Kane, D. L. (2013). Using snow fences to augment fresh water supplies in shallow arctic lakes (Report No. INE/WERC 13.06). University of Alaska Fairbanks, Water and Environmental Research Center.
- SYKE. (2024). Lumen aluevesiarvo. Suomen ympäristökeskus Syke. <https://www.i3.ymparisto.fi/i3/kktiedote/FIN/2024/02/lumipistemallilaskenta/lumi.htm>
- SYKE. (2025). HYD-valikko. Suomen ympäristökeskus Syke. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/hyd-valikko>
- SYKE. (2026). Routa Varsinais-Suomessa. Suomen ympäristökeskus Syke. <https://www.i3.ymparisto.fi/i3/tilanne/FIN/routa/LOS.htm>
- Tabler, R. D. (1991). Snow Fence Guide (Report No. SHRP-W/FR-91-106). Strategic Highway Research Program, National Research Council. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-h-320.pdf>
- Tabler, R. D. (2003). Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design: Final report. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.
- Talotekniikkainfo. (2024). Vesi- ja viemärlaitteistot -opas. <https://www.talotekniikkainfo.fi/rakennusten-vesi-ja-viemarilaitteistot-opas>
- Työteho-seura. (2025). Maatalouskoneurakointihintoja 2024. <https://www.tts.fi/wp-content/uploads/2023/10/Urakoinnat-2024-alustavia-tuloksia-toukokuu-2025.pdf>
- Uarctic. (n.d.). Climate interventions – Artificial glaziers. GRID-Arendal, Arctic Centre/University of Lapland. <https://climateinterventions.org/interventions/artificial-glaciers/#>
- VEETI. (2026). Vesihuollon maksut. Vesihuollon tietojärjestelmä (Veeti) <https://raportit.ymparisto.fi/ReportServer/Pages/ReportViewer.aspx?%2fJulkiraportti-Vesihuollon%20maksut>
- Veijalainen, N., Ahopelto, L., Marttunen, M., Jääskeläinen, J., Britschgi, R., Orvomaa, M., Belinskij, A., & Keskinen, M. (2019). Severe drought in Finland: Modeling effects on water resources and

assessing climate change impacts. *Sustainability*, 11(8), 2450.

<https://doi.org/10.3390/su11082450>

Vilkka, H. (2023). Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Art House

LVV (n.d.). Lumen vesiaron mittaaminen. Vesi.fi. Lupa- ja valvontavirasto.

<https://vesi.fi/aineistopankki/lumen-vesiarvon-mittaaminen/>

Vesistömallijärjestelmä. (2025). Vesistömallijärjestelmä. Suomen ympäristökeskus Syke.

<https://www.i2.ymparisto.fi/i2/35/q3510350y/wqfi.html>

Warren, S. (1984). Impurities in snow. *Annals of Glaciology*, 5, 177–179.

<https://doi.org/10.3189/1984AoG5-1-177-179>

WMO. (n.d.). Cryosphere. <https://wmo.int/topics/cryosphere>

YLE. (2020). Kaipaatko kevätpuuhaa? <https://yle.fi/a/3-11273725>

YLE. (2012). Lumiaidat kadonnutta kansanperinnettä. <https://yle.fi/a/3-5065840>

Zhang, Z., Ma, W., Li, Q., Si, C., & Li, S. (2024). Field measurements and predictions of snow distribution around horizontal-slat snow fences. *Transportation Research Record*, 2679(4), 939–951. <https://doi.org/10.1177/03611981241298694>