



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Emmi Peltola

Tietunnelin laitetilojen hukkalämmön talteenoton kannattavuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

11.3.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Emmi Peltola Tietunnelin laittilojen hukkalämmön talteenoton kannattavuus 35 sivua + 4 liitettä 11.3.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	suunnittelupäällikkö Samuli Korpi yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin hukkalämmön talteenoton kannattavuutta tietunnelin laittiloista.</p> <p>Tietunnelit pyritään pitämään erossa kunnallisesta kaukolämmöstä, joten hukkalämpö tulee hyödyntää kohteessa. Kohteessa ei ole vesikiertoista patteriverkostoa, eikä merkittävää käyttöveden lämmitystarvetta, siksi hukkalämpö on hyödynnettävä ilmanvaihdon lämmityksessä.</p> <p>Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta eri vaihtoehtoa. Vaihtoehto A ei hyödynnä hukkalämpöä ollenkaan ja toimii vertailukohtana vaihtoehdolle B, jossa hukkalämpöä hyödynnetään. Vaihtoehdossa A tuloilmaa lämmitetään sähköpatterilla. Vaihtoehdossa B laittiloissa lämmentyttä ilmaa johdetaan ilmanvaihtokoneelle, jossa LTO:n avulla lämmitetään tuloilmaa ja jäähtynyt palautusilma johdetaan takaisin laittiloihin. Tämä jäähtynyt palautusilma vähentää erillisen jäähtytysjärjestelmän käyttöä. Molemmissa vaihtoehdoissa erillinen jäähtytysjärjestelmä on mitoitettava yhtä suureksi, koska kesällä jäähtynyttä palautusilmaa ei ole tarjolla. Vaihtoehtoja vertailtiin toisiinsa sähköenergian kulutuksen, CO₂-päästöjen ja kannattavuuden perusteella. Laskelmat suoritettiin Excel-ohjelmiston avulla, jotta laskentapohjaa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös tulevaisuudessa.</p> <p>Laskelmien perusteella havaittiin, että hukkalämmön talteenotto on kannattavaa. Lisäinvestointi maksaa itsensä takaisin noin kahdeksassa vuodessa. Vaihtoehto B, jossa on lämmön talteenottojärjestelmä, olisi nykyarvoltaan kannattavampi kuin vaihtoehto A, vaikka investointikustannukset ovat yli kaksinkertaiset. Tässä tapauksessa laskentajakso oli 15 vuotta ja reaalkorko 3 %.</p>	
Avainsanat	hukkalämpö, LTO, kannattavuus

Author Title Number of Pages Date	Emmi Peltola Cost-effectiveness of Waste Energy Recovery from Road Tunnel Technical Toom 35 pages + 4 appendices 11 March 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Samuli Korpi, Design manager Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to study the cost-effectiveness of waste energy recovery from a road tunnel technical room and to develop an Excel based spreadsheet that could be used in future projects.</p> <p>The final year project combined literary research and calculative methods. Based on the literary research of road tunnel HVAC regulations and the relating thermodynamic principles, certain simplifications were made to facilitate the calculations. In the second part of the project, two alternatives for waste energy recovery were studied. Alternative A was to not implement a heat recovery system, while option alternative B was to implement a design that would recirculate the warm air from the technical room through a heat exchanger that would redirect the cooled air back into the technical room. These options were studied from the energy usage, carbon dioxide emissions and cost-effectiveness perspectives.</p> <p>The thesis showed that an investment in heat recovery would pay itself back in eight years. The calculation using the present value method indicated that alternative B was more cost-effective than alternative A, despite its initial cost being more than double that of option A for a 15-year calculation period and 3 % real interest rate.</p>	
Keywords	waste energy recovery, cost-effectiveness

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hukkalämpö	2
3	Tietunnelien laittilojen LVI-suunnittelun periaatteita	3
3.1	Turvallisuus ja energiatehokkuus	3
3.2	Laittilat	3
4	Laittilojen lämpökuormat ja jäähdytystarve	4
4.1	Kallion vaikutus	4
4.2	Lämpökuormat ja jäähdytysteho	5
5	Kohteen esittely ja vaihtoehdot	6
5.1	Vaihtoehto A	8
5.2	Vaihtoehto B	9
5.3	Vertailu	10
6	Laskennalliset vertailut	10
6.1	Lähtötiedot ja oletukset	11
6.2	Laskelmat vaihtoehtojen energiankulutuksesta	13
6.2.1	Lämmitysenergian tarve	13
6.2.2	Laitteistojen kuluttama sähköenergia	18
6.3	Sähkön käytön CO ₂ -päästöt	20
6.4	Kannattavuuslaskelmat	21
7	Tulokset	25
8	Pohdinta	31
9	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

Liitteet

Liite 1. Ilmatieteen laitos: lämpötilan esiintyvyys

Liite 2. Tehon ja energian laskentataulukko

Liite 3. Kannattavuuslaskenta

Liite 4. Vertailu

Lyhenteet

c_{px}	ominaislämpökapasiteetti, J/(kgK), kJ/(kgK), ilma $c_{pi} = 1 \text{ kJ/(kgK)}$
IV	ilmanvaihto
LTO	lämmöntalteenotto
Q_{xx}	lämmitys- tai jäähdytysenergia, kWh, MWh
$q_{v, xx}$	ilmavirta, m ³ /s (, dm ³ /s)
SFP	puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, kW/(m ³ /s)
T_{xx}	lämpötila, °C, K
W_{xx}	sähköenergian kulutus, kWh, kWh/a, MWh, MWh/a
Δ	muutos
ε	kylmäkerroin, -
ρ_{xx}	tiheys, kg/m ³ , ilma $\rho_i = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Φ_{xx}	teho, W, kW

1 Johdanto

Tämä insinööriyö tehdään A-insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Yritys on perustettu Tampereella 1959, ja työntekijöitä on yli 850 usealla eri paikkakunnalla Suomessa. Yritys tarjoaa rakennusalan suunnittelu- ja konsulttipalveluita.

Yritykset ja yhteisöt ovat kiinnostuneita hyödyntämään hukkalämmön lähteitään energian kulutuksen vähentämiseksi ja tehostamiseksi, jota kautta saadaan taloudellista hyötyä. Viime vuosien laitteiden tekninen kehitys (mm. lämpöpumput) on mahdollistanut aiempaa tehokkaamman lämmöntalteenoton alemmista lämpötiloista.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on laskennallisesti todeta, minkälaisia säästöjä kallion sisällä sijaitsevan tietunnelin laittilojen lämmöntalteenotolla voidaan saada. Valittua vaihtoehtoa on tarkoitus verrata laskennallisesti vaihtoehtoon, jossa hukkalämpöä ei hyödynnetä. Vertailun perusteena ovat kustannukset (säästöt vs. lisäkustannukset) ja ekologisuus (hiilidioksidipäästöt). Laskelmien toteutuksessa käytetään Microsoft Excel -sovellusta. Tarkoituksena on luoda laskentataulukko, jota voitaisiin hyödyntää myös tulevaisuudessa.

Tässä insinööriyössä ei ole tarkoitus käsitellä syvällisesti kylmätekniikkaa, tietunnelin LVI-suunnittelua tai kalliotilan suunnittelua. Näistä aiheista käydään läpi pintapuolisesti kohteeseen ja aiheeseen liittyvät seikat, jotta niiden vaikutus insinööriyöhön käy ilmi. Kylmätekniikan perusteet -kirja (Kaappola, Hirvelä, Jokela ja Kianta, 2011) on hyvä teos, jonka avulla voi tutustua jäähdytystekniikkaan. Tietunneleiden LVI-suunnittelusta kiinnostuneet löytävät lisätietoa mm. Väyläviraston ohjeita 5/2019 (4). Kalliosuunnittelusta ja lämpöhäviöistä kiinnostuneille mm. Suuret kalliotilat (7) ja Kalliorakentaminen 2000 (6) ovat suositeltavaa luettavaa.

2 Hukkalämpö

Hukkalämpö määritellään Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä (EU) 2018/2001 (1, 2 artikla) seuraavalla tavalla:

” - - 'hukkalämmöllä ja -kylmällä' tarkoitetaan teollisuus- tai sähköntuotantolaitoksissa tai palvelualalla sivutuotteena väistämättä syntyvää lämpöä tai kylmää, joka katoaisi käyttämättömänä ilmaan tai veteen, jos sitä ei johdettaisi kaukolämmitys- tai jäähdytysjärjestelmään, jos on käytetty tai käytetään yhteistuotantoprosessia tai jos yhteistuotanto ei ole mahdollista.”

Hukkalämpöä (tai ylijäämälämpöä) syntyy monista eri lähteistä, esimerkiksi jäähdytysveden tai erilaisten poistoilmojen tai jäähdytyksen lauhdelämmön mukana (2, s. 7). Eri lähteistä saatavilla lämpövirroilla on erilaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat niiden hyödyntämispotentiaaliin. Näitä ovat muuan muassa lämpötilataso, entalpiavirran suuruus, lämpövirran väliaine ja faasi, väliaineen kemialliset ominaisuudet ja väliaineen puhtaus. Lainsäädäntö (energiatehokkuus ja ympäristönsuojelu), energian hinnannousu ja tekniikan kehitys ovat vaikuttaneet panostuksiin hukkalämmön hyödyntämiseksi. Hyödyntämiselle on monia esteitä, jotka ovat myös luonteeltaan taloudellisia, teknisiä ja lainsäädännöllisiä. Lisäksi lämmön käyttökohteen puuttuminen on yksi merkittävistä esteistä, joita hukkalämmön hyödyntämisellä on. Edellä mainittujen seikkojen takia on (yleensä) tarkoituksenmukaista aloittaa tarkastelut sisäisten käyttökohteiden löytämiseksi ja vasta sen jälkeen miettiä lämmön myyntiä ulkopuoliselle toimijalle ja vasta lopuksi miettiä sähköntuotantoa hukkalämmön avulla. (3, s. 8–11.) Matalalämpöisestä hukkalämmöstä (< +100 °C) sähköntuotannon hyötysuhde on alle 10 % (2, s. 5).

Tässä insinööriyössä keskitytään hukkalämmön sisäiseen hyödyntämiseen, koska Väyläviraston ohjeita 5/2019 noudattaen tietunneleiden laitetilat halutaan mahdollisuuksien mukaan pitää erossa kunnallisista verkoista (4, s. 101). Tämän takia hukkalämmön myyntiä kaukolämpöverkoston ei ole otettu huomioon erilaisia ratkaisua mietittäessä. Ohjeissa todetaan myös, että ensisijaisesti teknisten laittilojen hukkalämpöä pyritään hyödyntämään tilojen lämmityksessä (4, s. 101). Tämä ohjeistus on hyvin ymmärrettävä, koska lämmintä käyttövettä ei kohteessa tarvita. Kohteeseen ei tule vesikiertoisia lämmitysjärjestelmiä, joissa hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää veden lämmitykseen. Tuotantolaitoksista poiketen tietunnelissa ei ole erilaisia prosessikohteita, jonne hukkalämpöä voisi johtaa (3, s. 11). Datakeskukset tuottavat hukkalämpöä, jolle ei välttämättä löydy rakennuksen sisältä sopivaa käyttökohdetta. Näissä tapauksissa on tullut esille

lämmön myyminen kunnalliseen verkostoon tai läheiselle muulle kiinteistölle (5, s. 12–13). Nämä vaihtoehdot on suljettu pois kohteen sijainnin ja kunnallistekniikasta erossa pysymisen perusteella.

3 Tietunnelien laittilojen LVI-suunnittelun periaatteita

Tietunneleiden suunnittelussa on huomioitava se, että tunnelin käyttöturvallisuus ja siihen liittyvä tekniikka menee kaiken edelle. Laite- ja aputilojen olosuhteet eivät saa vaarantaa laitteiden toimintaa.

3.1 Turvallisuus ja energiatehokkuus

Tietunneleiden kaikkien teknisten järjestelmien, LVI-järjestelmästä liikenteenhallintajärjestelmään, on toimittava yhtenä kokonaisuutena, jotta liikenteen turvallisuus voidaan taata myös vaaratilanteissa. LVI-järjestelmien suunnittelussa pyritään turvallisuuden lisäksi energiatehokkaisuun ja ekologisiin ratkaisuihin, jotka tukevat tietunnelin huoltotoimintaa ja käyttöä. Tämä tarkoittaa sitä, että laitevalinnoissa kiinnitetään huomiota niiden energian kulutukseen ja päästöihin niin vuositasolla kuin koko elinkaaren aikana. Myös ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja hukkalämmön hyödyntämiseen on panostettava. Näiden keinojen lisäksi ”laitteiden ohjauksilla sekä järjestelmävalinnoilla minimoidaan sähköenergiankäyttö ja samalla pienennetään tietunnelin hiilijalanjälkeä.” (4, s. 4, 10, 107.)

3.2 Laittilat

Laittiloihin on sijoitettu tietunnelin turvallisuuden ja toimivuuden kannalta merkittävää tekniikkaa. Tällaisia laite- ja aputiloja ovat esimerkiksi muuntamotilat, sähkö- ja teletilat, yhdyskäytävät ja puhallintilat. Tietunnelia palvelevia laittiloja on tietunnelissa ja maanpinnalla. Tietunnelissa sijaisevien laittilojen ”ilmanvaihdon tulee olla vähintään $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$ ”, ja ilmanvaihdon ja sisäilmaston tulee täyttää voimassa olevat Väyläviraston ohjeet ja ympäristöministeriön asetukset (1009/2017) (4, s. 102). Laittilojen lämmitys ja jäähditys on tarpeenmukaista taulukon 1 mukaan. Mahdollisuuksien mukaan

tilojen lämmityksessä ja jäädytyksessä pyritään hyödyntämään hukkalämpöä; yhden tilan jäädytystä käytetään toisen tilan lämmitykseen (4, s. 101–102).

Taulukko 1. Laitetilojen lämmityksen ja jäädytyksen raja-arvot, kun laitetilat sijaitsevat tietunnelissa (4, s. 101).

Tila, huone	Lämpötila (lämmitys)	Lämpötila (jäädytys)
Sähkötila	+15 °C	+25 °C
Muuntamo-tila	+5 °C	+25 °C
Yhdyskäytävä	+5 °C	–
Huolto- ja tekniikkakäytävä	+0 °C	–
Muu tekninen laitetila	+15 °C	+25 °C

Taulukosta nähdään, että erilaisten tilojen lämpötila ei saa nousta yli +25 °C:n, kun taas yhdyskäytäviä ja huolto- ja tekniikkakäytäviä ei tarvitse jäädyttää. Kaikki tilat on pidettävä vähintään plusasteisina. Taulukon 1 raja-arvoja voi verrata ST-kortin 53.61 Sähkötilojen ilmanvaihto ja jäädytys vastaaviin raja-arvoihin (5, s. 3).

4 Laitetilojen lämpökuormat ja jäädytystarve

Tässä luvussa tarkastellaan lyhyesti teoreettisesti lämpökuormia ja jäädytystehontarvetta, koska ne liittyvät oleellisesti tämän insinööriyön aiheeseen.

4.1 Kallion vaikutus

Laitetilojen sijainti kallion sisällä vaikuttaa tilojen lämpöhäviöihin ja lämpökuormiin. Johdumislämpöhäviöt pysyvät läpi vuoden samalla tasolla, koska ulkolämpötilalla ei ole suurta vaikutusta niihin. Samaan tapaan muillakaan ulkoisilla kuormilla, esim. auringon säteilyenergialla, ei ole vaikutusta tilojen olosuhteisiin. (7, s. 88.) ”Kalliotilat lämmitetään yleensä ilman avulla ja tarpeen vaatiessa paikoin myös lämmityspattereilla” (8, s. 11).

Kalliotilan johtumislämpöhäviöihin vaikuttavat mm. jänneväli ja kattopaksuus. Kallion johtumislämpöhäviöt tasaantuvat noin 3–5 vuoden jälkeen lämmityksen aloittamisesta. Kun tilojen lämmitys aloitetaan, ovat niiden lämpöhäviöt kalliopinta-alaa kohden siis suuremmat kuin tasaantumiskauden jälkeen. Tutkimusraportissa Kalliorakentaminen 2000 esitellään erilaisia kohteita, joiden 1. vuoden lämpöhäviöt ovat noin 9–12 W/m² välillä ja tasaantumisjakson jälkeen noin 4–7 W/m² välillä. (7, s. 89, 92, 94, 96.)

Tässä insinööriyössä on arviot kohdistettu tämän tasaantumisajan jälkeiseen aikaan, jolloin lämpöhäviöt eivät ole niin suuret kuin silloin kun tunnelin laitetilat on otettu käyttöön. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkastelu keskittyy aikaan, jolloin hukkalämpöä on hyödynnettävissä enemmän, koska kallioon siirtyvän lämmön määrä pienenee ensimmäisten vuosien jälkeen. Samalla jäähdytystehon tarve on suurempi tasaantumisjakson jälkeen, koska kallion jäähdyttävä vaikutus on pienempi kuin tilojen lämmityksen alkuvaiheessa.

4.2 Lämpökuormat ja jäähdytysteho

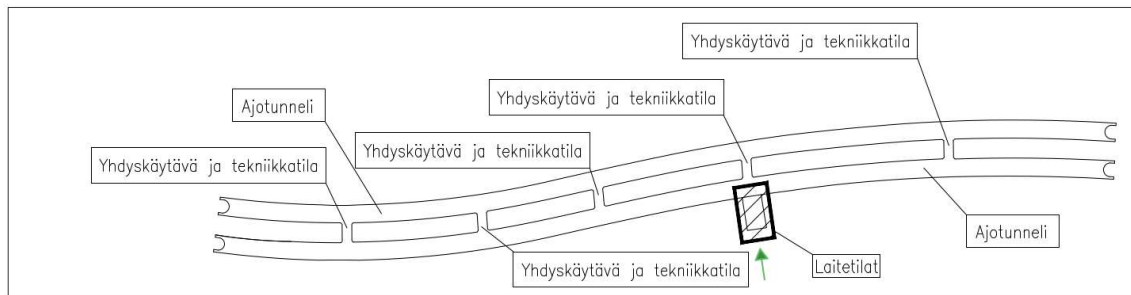
”Lämpökuorma on huoneeseen tulevien lämpötehojen kokonaissumma” (9, s. 421). Lämpökuormat voivat olla sisäisiä kuormia henkilöistä, laitteista ja valaistuksesta, tai aurinkokuormaa (9, s. 430–439). Laittekuormien määrittelyssä on tärkeää muistaa, että liitântäteho ei ole laitteen lämpökuorma, mutta laitteen käyttämä sähköteho muuttuu lämmöksi (9, s. 430). Lämpökuorma ei kerro suoraan jäähdytystehon tarvetta. Osa lämpökuormasta varastoituu rakenteisiin, jolloin tarvittava hetkellinen jäähdytysteho ei ole yhtä suuri kuin lämpökuormien summa. (9, s. 421.)

Tässä insinööriyössä käsiteltävässä tapauksessa ei tilojen sijainnin takia ole muita kuin sisäisiä lämpökuormia. Laittekuormat ovat sen verran merkittävät, että valaistus- tai henkilökuormaa ole erikseen huomioitu. Auringon lämpökuormaa ei ole, koska laitetoissa ei ole ikkunoita. Osa laitekuormasta siirtyy kallioon lämpöhäviöinä. Jäljelle jäävä osuus lämpökuormasta on pakko jäähdyttää, jotta laitetojen lämpötila ei nouse liian korkeaksi ja vaaranna laitteiden toiminnan.

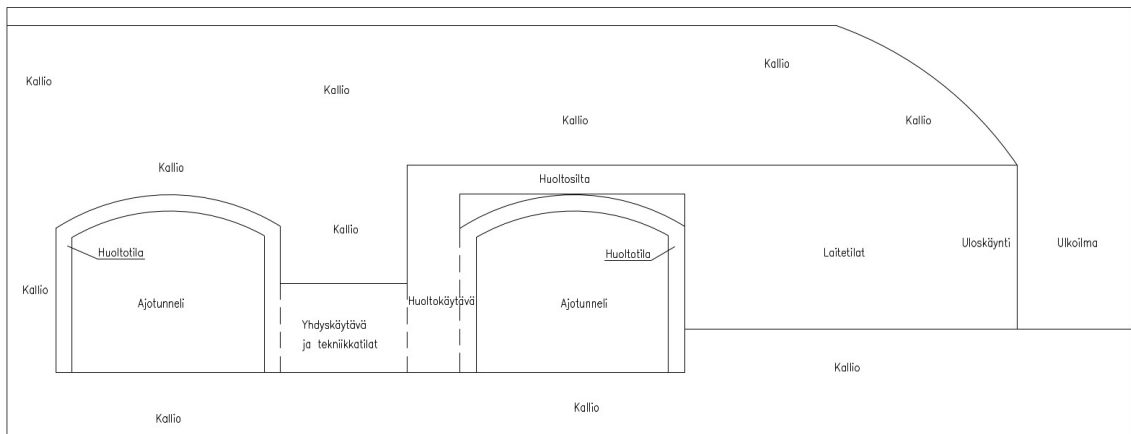
5 Kohteen esittely ja vaihtoehdot

Tässä luvussa esitellään laittilojen ilmanvaihdon, lämmityksen ja jäähdytyksen yleiset periaatteet. Sen jälkeen esitellään kaksi vaihtoehtoa, joita laskelmissa vertaillaan keskenään.

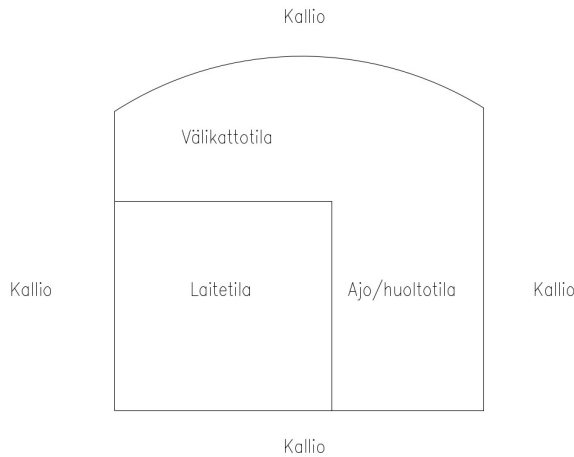
Tässä opinnäytetyössä mallikohteenä toimivan tietunnelin laittilat on louhittu varsinaisen tietunnelin yhteyteen. Kuvassa 1 esitetään tietunneli kokonaisuudessaan. Laittiloista päästään huoltosiltaa pitkin ajotunnelien välissä sijaitseviin yhdyskäytäviin ja sähköiloihin sekä huoltotilaan, joka kattaa koko tunnelin. Kuvassa 2 havainnollistetaan poikkileikkauksen avulla tunnelikokonaisuutta. Kuvassa 3 havainnollistetaan poikkileikkauksen avulla laittilojen kokonaisuutta.



Kuva 1. Havainnekuva tietunnelista, tarkasteltavat laittilat ja sisäänkäynti merkitty vihreällä nuolella. Kuva on projektin kuvasta muokattu.



Kuva 2. Havainnollistava poikkileikkaus tietunnelista



Kuva 3. Havainnollistava poikkileikkaus laitetiloista.

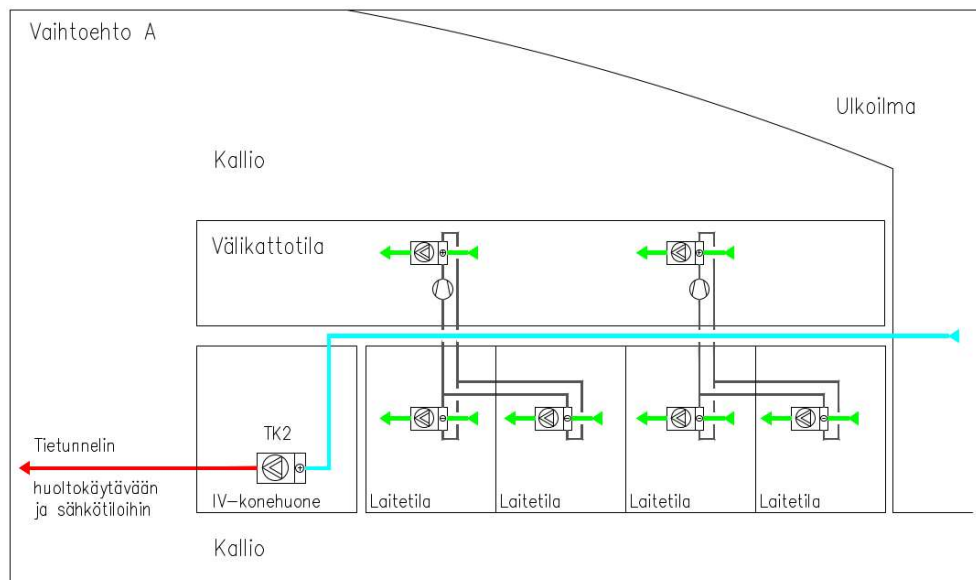
Laitetiloihin on sijoitettu kaksi ilmanvaihtokonetta. Molemmat ilmanvaihtokoneet käyvät 24 h/vuorokaudessa joka päivä. Molemmissa ilmanvaihtokoneissa on sähkölämmittimen patteri, muuta lämmitysjärjestelmää laitetiloissa ei ole. Ilmanvaihtokoneissa ei ole jäähdytyspattereita vaan tilat jäähdytetään erillisillä jäähdytyskoneikoilla. Ensimmäinen ilmanvaihtokone (TK1) huolehtii laitetilojen normaalista ilmanvaihdosta. Se puhaltaa lämmitettyä tuloilmaa tiloihin vähintään $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$ ja puhaltaa jäteilman ulos lämmöntalteenoton jälkeen. Toisen ilmanvaihtokoneen (TK2) perustoiminto on huolehtia tietunnelien huoltokäytävään (leveys noin 600 mm) yhdyskäytävien ja tekniikkatilojen ilmanvaihdosta. Tuloilman johdetaan huoltokäytävään tuloilmakanaviston avulla. Näihin tiloihin johdetaan vain tuloilmaa, jotta ne ovat ylipaineisia ajotunneliin nähden. Yhdyskäytävä on varustettu onnettomuustilanteita varten ylipaineistusjärjestelmällä, joka ”lisää henkilöturvallisuutta onnettomuustilanteissa” (4, s. 50). Laitetiloissa sijaitsee varavoimakonehuone, jossa on ilmanvaihtokoneesta TK1 (ja TK2) erillinen ilmavaihtojärjestelmä varavoimakoneen palamisilmaa ja tilan jälkijäähdytystä varten. Tietunneleiden ilmanvaihdosta huolehtivat siirtoilmapuhaltimet, jotka huolehtivat savunpoistosta onnettomuustilanteissa.

Seuraavaksi esiteltävät vaihtoehdot eroavat toisistaan ilmanvaihtokoneen TK2 osalta. Koneen perustoiminto ei muutu, mutta toisessa vaihtoehdossa (B) siihen lisätään lämmöntalteenottolaite ja toinen puhallin, joka kierrättää laitetilojen ilmaa lämmöntalteenottolaitteen läpi. Ilmanvaihtokoneen TK1 toiminta ei muutu.

5.1 Vaihtoehto A

Vaihtoehtoon A on tarkoitus olla vertailukohta, jossa toteutuvat laitetiloille asetetut ilmanvaihtoon ja lämpötilaan liittyvät vaatimukset mutta laitetilojen hukkalämpöä ei oteta talteen. Kuva 4 on havainnekuva, jonka tarkoituksena on selventää vaihtoehtoon A kokonaisuutta.

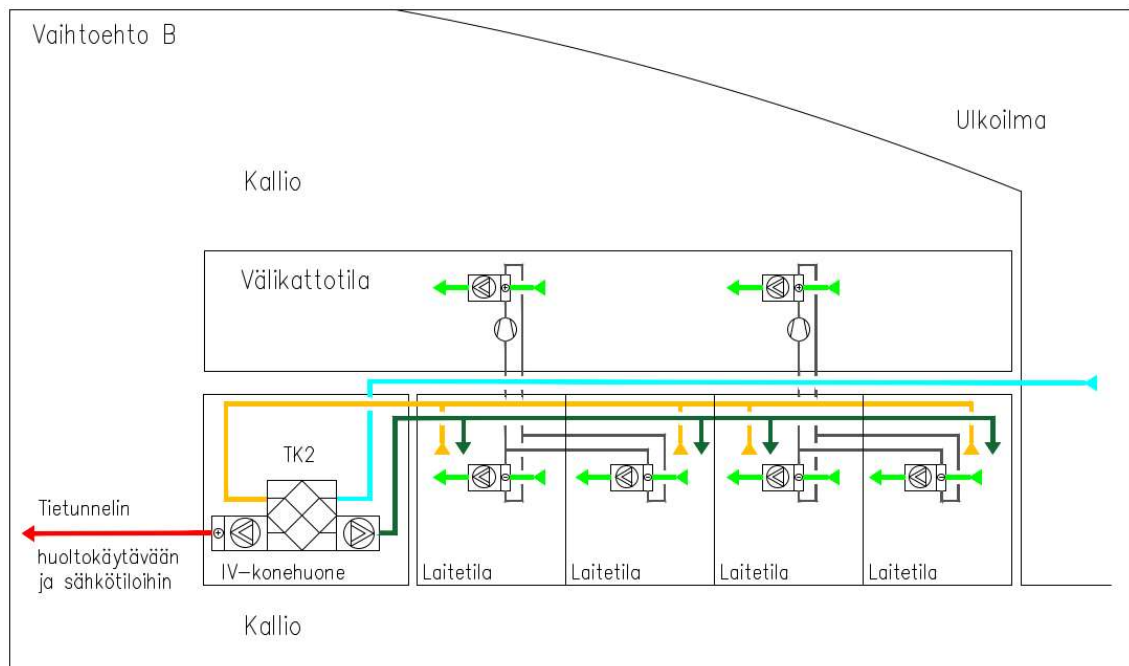
Ulkoilma (sininen viiva) kulkee kanavaa pitkin ilmanvaihtokoneelle, jossa se lämmitetään. Tuloilma (punainen viiva) kulkee kanavaa pitkin tietunnelin muihin tiloihin. Kuvasta 4 nähdään, että tietunnelin huolto- ja sähkötilojen tuloilma lämmitetään kokonaisuudessaan sähköpatterilla. Samalla laitetiloja jäähdytetään ainoastaan sähkökäyttöisellä jäähdytysjärjestelmällä. IV-konehuoneessa on ilmanvaihtokone, jossa on yksi puhallin ja yksi lämmityspatteri. Jäähdytysjärjestelmä sisältää laitetilassa sijaitsevan höyrystinyksikön kiertoilmapuhaltimiseen. Kaksi tällaista laitetilaa jäähdytetään yhdellä kompressorikoneikolla, jonka lauhdutinyksikkö sijaitsee välikatolla. Laitetiloja on neljä, joten kuvattu koneikkoja on kaksi kappaletta. Kuvaan ei ole sisällytetty samassa IV-konehuoneessa olevaa ilmanvaihtokonetta TK1, koska sen toiminta on sama molemmissa vaihtoehtoisissa eikä näin ollen vaikuta laskelmiin.



Kuva 4. Havainnekuva vaihtoehtosta A, jossa laitetilojen jäähdytyksestä syntyneellä lämmöllä lämmitetään välikattotila. Ei lämmöntalteenottoa.

5.2 Vaihtoehto B

Vaihtoehto B:ssä laittilojen hukkalämpöä otetaan talteen ilmanvaihtokoneen TK2 avulla. Kuva 5 on havainnekuva, joka selventää kokonaisuutta. Vertaamalla kuvia 4 ja 5 nähdään, että vaihtoehto B:n jäähdytysjärjestelmä on sama kuin vaihtoehdossa A. Kahdella lauhdutinyksiköllä ja neljällä höyrystinyksiköllä jäähdytetään tilat haluttuun lämpötilaan. Sen sijaan ilmanvaihtokoneeseen TK2 sisältyy kaksi puhallinta ja LTO-kenno sekä sähköinen lämmityspatteri. Ulkoilma (sininen viiva) virtaa kanavaa pitkin ilmanvaihtokoneelle. Laittilojen lämmin poistoilma (oranssi viiva) tuodaan ilmanvaihtokoneelle kanavaa pitkin. LTO-kennossa poistoilma lämmittää ulkoilmaa, jolloin muiden tilojen tuloilma (punainen viiva) lämpenee ja laittilojen poistoilma (oranssi viiva) jäähtyy. Jäähdytynyt palautusilma (tummanvihreä viiva) johdetaan takaisin jäähdyttämään laittiloja. Kuvaan ei ole sisällytetty samassa IV-konehuoneessa olevaan ilmanvaihtokonetta TK1, koska sen toiminta on sama molemmissa vaihtoehdoissa eikä näin ollen vaikuta laskelmiin.



Kuva 5. Havainnekuva vaihtoehdosta B, jossa laittilojen jäähdytyksestä syntyneellä lämmöllä lämmitetään välikattotila ja poistoilmasta otetaan lämpöä talteen huoltokäytävän ja sähkötilojen tuloilmaan ja jäteilmalla jäähdytetään laittiloja.

5.3 Vertailu

Jäähdytysjärjestelmä on molemmissa vaihtoehdoissa täysin identtinen mitoitusta myöten, koska kesällä lämpimällä ulkoilmalla ei voida jäähdyttää poistoilmaa. Vaihtoehdot eroavat toisistaan siten, että vaihtoehdossa B jäähdytystehoa saadaan talvella myös jäteilmaasta, jolloin jäähdytyskoneikkojen ei tarvitse käydä samalla teholla kuin kesällä. Samalla tuloilman lämmityspatterin ei tarvitse lämmittää ilmaa niin paljon kuin vaihtoehdossa A, koska poistoilma esilämmittää sitä. Kesällä molemmat vaihtoehdot toimivat samalla tavalla, koska ulkoilmasta ei saada jäähdytystehoa, eikä tuloilmaa tarvitse lämmittää ollenkaan.

Vaihtoehto A:n ilmanvaihtokone on halvempi, koska se sisältää vähemmän osia ja samalla sen huoltokustannukset ovat myös pienemmät, vaikka sähköinen lämmityspatteri on isompi kuin vaihtoehdossa B. Vaihtoehto A käyttää jäähdytykseen ja lämmitykseen enemmän sähköä kuin vaihtoehto B, joka on investointi- ja huoltokustannuksiltaan kalliimpi koneen laitemäärän takia. On huomioitava myös, että vaihtoehto B kuluttaa enemmän sähköenergiaa ilmanvaihdossa, koska sen ilmanvaihtokone sisältää kaksi puhallinta ja lämmöntalteenottokennon yhden puhaltimen sijaan.

6 Laskennalliset vertailut

Laskelmissa vaihtoehtoa A ja vaihtoehtoa B vertaillaan seuraavien kriteerien perusteella:

- energiankulutus
- taloudellisuus
- ekologisuus.

Energiankulutuksen osalta vaihtoehtoja verrataan niiden kuluttaman sähköenergian perusteella. Tarkastelussa otetaan huomioon seuraavat osa-alueet: ilman lämmitys sähköenergialla, tilojen jäähdytys sähköenergialla ja ilmanvaihtokoneiden käyttämä sähköenergia. Vaihtoehdon B kannattavuutta arvioidaan vertaamalla lisäinvestointikustannuksia ja käyttökustannussäästöjä verrattuna vaihtoehto A:n käyttökustannuksiin. Tarvittaessa suoritetaan herkkyytstarkastelu. Ekologisessa tarkastelussa lasketaan vaihtoehto-

jen sähkön kulutuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Jos haluttaisiin tehdä kokonaisvaltaisempi hiilidioksidipäästöjen vertailu, siinä tulisi huomioida vaihtoehdon B rakentamisesta aiheutuvat lisääntyneet hiilidioksidipäästöt ja lisämateriaalien tarve kuten kanavien asennus ja kuljetukset. Vaihtoehdon B vaatima lisärakennustarve on ei ole kovin suuri (noin 20 m pitkä kanavisto), eivätkä siitä aiheutuvat lisäpäästöt ole merkityksellisiä verrattuna vuosittaiseen säästöön sähkön kulutuksessa.

6.1 Lähtötiedot ja oletukset

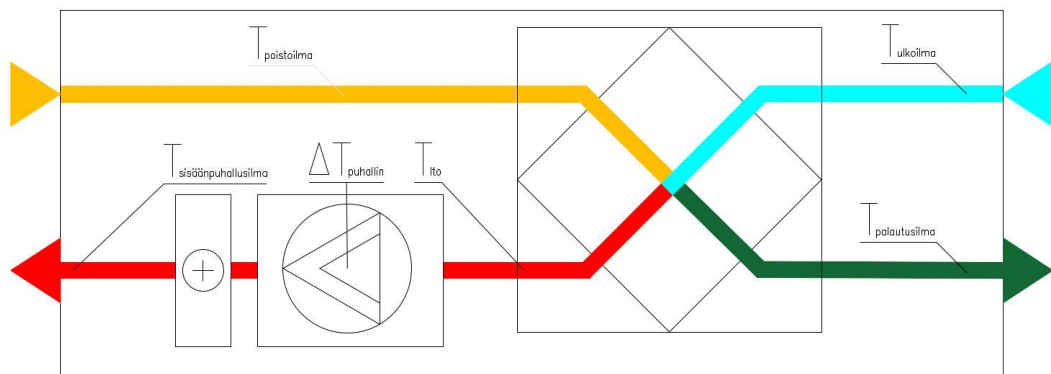
Tässä insinööriyössä tehdään yksinkertaistuksia, jotta laskenta on mahdollista suorittaa Exceliin luodun laskentapohjan avulla. Laitetilat käsitellään yhtenä kokonaisuutena laskelmissa, jotta lämpöhäviöiden ja -kuormien vaikutukset ovat laskettavissa ilmanvaihtokoneen (TK2) kierrättämän kokonaisilmavirran avulla. Lämpöhäviöt on laskettu periaatteella, jonka mukaan kalliopinta-alaa kohden lämpöä siirtyy 5 W/m^2 . Tämä on tyypillinen arvo laskettaessa kalliotilojen lämpöhäviöitä, kun tarkkojen laskelmien tekeminen ei ole kustannustehokasta. Tässä insinööriyössä ei ole laskettu laitteiden lämpökuormia, vaan lämpökuormatiedot ovat lähtötietoja. Jäähdytystehon tarve on laskettu molemmissa vaihtoehdoissa laitekuorman ja kallion lämpöhäviöiden erotuksena. Poisto- ja tuloilmavirrat ovat saman suuruisia. Kohteen sijainnin mukaiset ulkolämpötilat ja pysyvyystiedot pyydettiin Ilmantieteen laitokselta (ks. liite 1). Jäähdytyslaitteisto käynnistyy, kun tilan lämpötila on $+27 \text{ °C}$, ja sammuu, kun tilan lämpötila on $+25 \text{ °C}$. Tämän takia poistoilman lämpötilaksi on oletettu $+25 \text{ °C}$. Sisäänpuhallusilman lämpötila on valittu Väyläviraston ohjeen perusteella, ja tiloihin ei voida puhaltaa pakkasilmaa, joten tiloihin puhallettava ilma on rajattu $+10 \text{ °C}$ laitteiden toiminnan varmistamiseksi. Alla on kooste lähtötiedoista ja olettamuksista.

Lähtötiedot:

- Poistoilman lämpötila $T_{po} +25 \text{ °C}$
- Huoltokäytävän sisäänpuhallusilman lämpötila $T_{sp} +10 \text{ °C}$
- Laitetiloihin puhallettavan palautusilman lämpötilarajoitus $T_{pa} +10 \text{ °C}$
- Ilman lämpötilan nousu puhaltimessa $\Delta T_{puhallin} 0,5 \text{ °C}$
- Tuloilma- ja poistoilmavirta $q_{v,tp} 0,45 \text{ m}^3/\text{s}$

- Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde η_a 0,8
- Laitteista aiheutuva lämpökuorma Φ_{lk} 15 000 W
- Lämpöhäviöt kallioon Φ_k 2 000 W
- Jäähdytysenergian tuotto-prosessin vuotuinen kylmäkerroin $\varepsilon_E = 3$
- Sähkön hinta = 120 €/MWh (9)
- Reaalikorko = 3 %
- Tarkasteluaika = 15 a
- Investoinnin jäännösarvo = 0 €
- Vaihtoehdon A investointikustannus $I_A = 25\ 000$ €
- Vaihtoehdon B investointikustannus $I_B = 60\ 000$ €.

Sähkön hintaan vaikuttaa useampi tekijä, lisäksi on tärkeä huomioida myös sähkön siirtohintaa ja verot. Sirénin dokumentissa Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta (11) todetaan, että reaalikorko energiainvestointeja laskettaessa on yleensä noin 3–6 %. Alempi korkokanta on valittu, koska voiton maksimointi ei ole tämän investoinnin päätavoite. (11, s. 27.) Tarkasteluaika on valittu järjestelmän teknisen käyttöajan perusteella nojautuen Sirénin dokumentissa esitettyyn arvioon 10–20 vuotta (11, s. 30). Investointikustannukset ovat arvioita. Investointikustannuksissa on huomioitu ilmanvaihtokoneen ja kanavoinnin hinta. Kuvassa 6 havainnollistetaan laskelmissa käytettyjen lämpötilojen sijainteja suhteessa lämmöntalteenottolaitteistoon ja sähköpatteriin.



Kuva 6. Havainnekuva lämpötilojen nimistöstä.

6.2 Laskelmat vaihtoehtojen energiankulutuksesta

6.2.1 Lämmitysenergian tarve

Tässä insinööriyössä käytetään tavanomaisia LVI-suunnittelun sääntöjä ja kaavoja. Seuraavaksi esiteltävät kaavat löytyvät muun muassa ympäristöministeriön ohjeesta Energiatehokkuus: Rakennuksen energiankulutus ja lämmitystehontarpeen laskenta (tästä eteenpäin Laskentaohje) (12). Tässä luvussa esitellyt kaavat on lainattu edellä mainitusta ohjeesta. Kaava 1 on mukailtu Laskentaohjeen (12, s. 23) kaavasta (3.12). Käyntiaikasuhdetermit on jätetty pois, koska ilmanvaihtokone (TK2) käy koko ajan.

$$\phi = \eta_a * q_v * \rho * c_{pi} * (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Φ on teho [W]

η_a on hyötysuhde, -

q_v on tilavuusvirta [m^3/s]

ρ on tiheys [kg/m^3]

c_p on ominaislämpökapasiteetti [$J/(kgK)$]

T_x on lämpötila [$^{\circ}C$].

Esimerkiksi lämmöntalteenottolaitteistosta saatava maksimiteho lasketaan seuraavalla tavalla, kun poistoilman lämpötila T_{po} (T_1) ja ulkolämpötila T_u (T_2) tunnetaan eikä palautusilman lämpötilarajoitusta T_{pa} ole huomioitu:

$$\phi_{lto} = 0,8 * 0,45 \frac{m^3}{s} * 1,2 \frac{kg}{m^3} * 1\,000 \frac{J}{kg/K} * (25\,^{\circ}C - (-33\,^{\circ}C)) = 25\,056\,W.$$

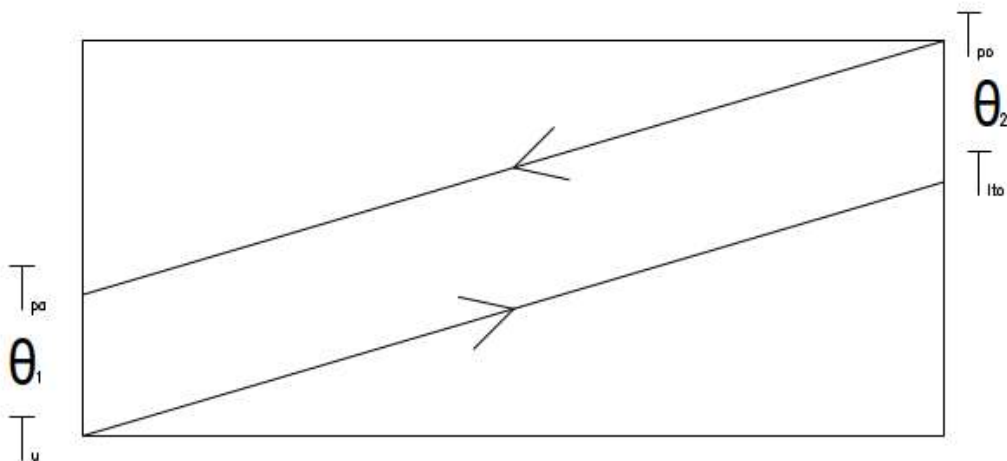
Ratkaistaan kaava 1 lämpötilan T_1 suhteen, tässä tapauksessa lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen T_{lto} , kun T_2 on ulkoilman lämpötila (palautusilman lämpötilarajoitusta ei ole huomioitu):

$$T_{lto} = (-33\,^{\circ}C) + \frac{25\,056\,W}{1,2 \frac{kg}{m^3} * 1\,000 \frac{J}{kg/K} * 0,45 \frac{m^3}{s}} = 13,4\,^{\circ}C.$$

Ratkaistaan kaava 1 lämpötilan T_2 suhteen, kun T_2 on palautusilman lämpötila ja T_1 on poistoilmalämpötila (palautusilman lämpötilarajoitusta ei ole huomioitu):

$$T_{pa} = +25 \text{ °C} - \frac{25\,056 \text{ W}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg/}^\circ\text{C}} * 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = -21,4 \text{ °C}.$$

Koska tiloihin ei voida puhaltaa liian kylmää ilmaa, pitää lämmöntalteenotto rajoittaa palautusilman perusteella. Lämmöntalteenotossa tapahtuvia lämpötilan muutoksia havainnollistetaan kuvassa 7, kun ulkoilma on kylmempää kuin poistoilma. Lämpötilaero arvojen T_{po} ja T_{lto} välillä on sama kuin lämpötilojen T_u ja T_{pa} , koska tuloilma- ja poistoilmavirrat ovat saman suuruiset ja niiden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti on oletettu samoiksi. Tämän tiedon avulla voidaan laskea lämmöntalteenotosta saatava teho ja T_{lto} , kun T_{pa} joudutaan rajoittamaan $+10 \text{ °C}$:seen.



Kuva 7. Havainnekuva lämpötilojen muutoksista lämmöntalteenotossa, kun T_u on kylmempää kuin T_{po} .

Näiden tietojen avulla rajaus lämpötilan vaikutus otetaan huomioon laskelmissa. Laskeaan lämpötilojen T_{pa} ja T_u erotus θ_1 , kun palautusilman lämpötila on rajoitettu $+10 \text{ °C}$:seen:

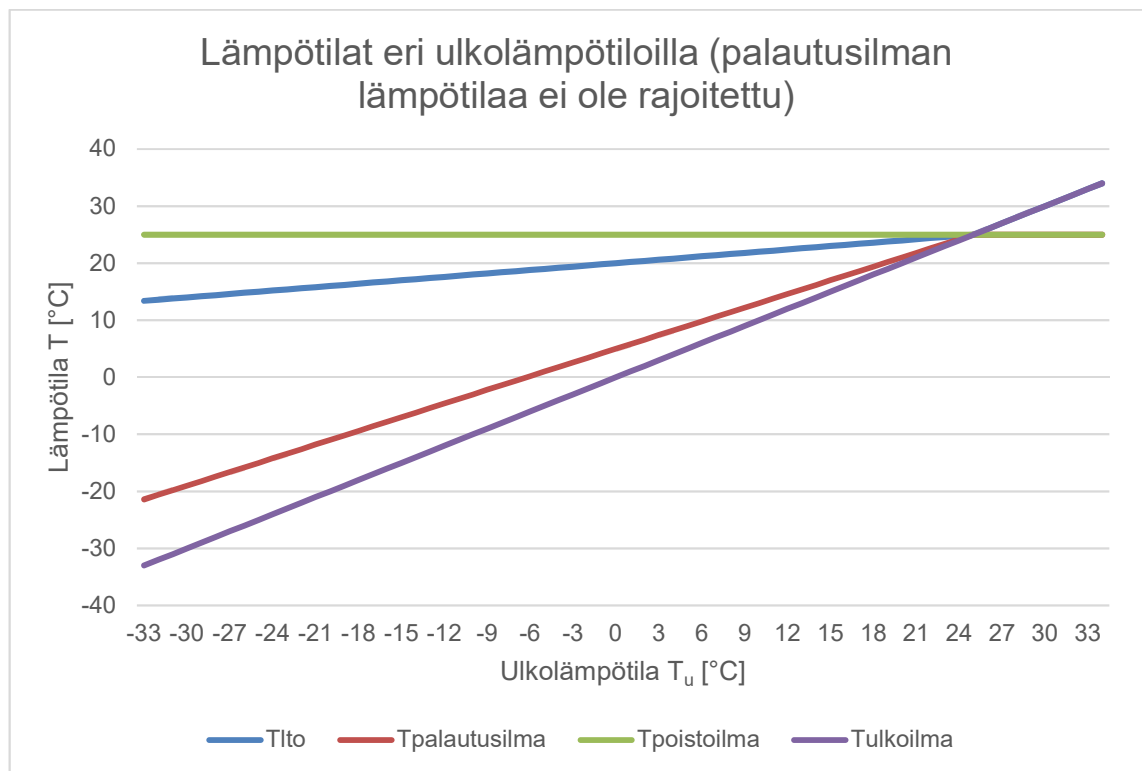
$$\theta_1 = 10 \text{ °C} - (-33 \text{ °C}) = 43 \text{ °C}.$$

Lämpötilojen T_{po} ja T_{lto} erotus Θ_2 on sama kuin Θ_1 eli ratkaistaan lämpötilojen erotus T_{lto} suhteen:

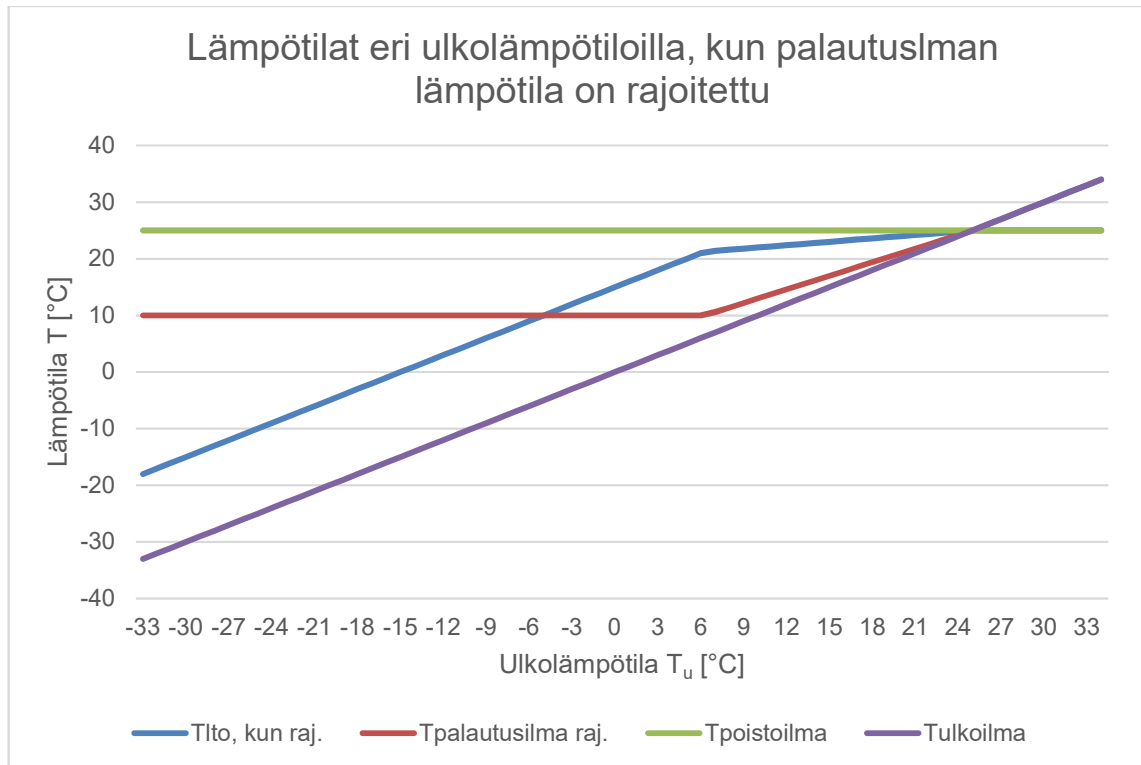
$$T_{lto} = +25 \text{ °C} - 43 \text{ °C} = -18 \text{ °C}.$$

Jos palautusilman lämpötilaa ei rajoiteta, T_{lto} voidaan ratkaista myös lämpötilasuhteen avulla, $T_{lto} = (T_{po} - T_u) * \eta_a + T_u$. Tällöin lämmöntalteenotosta saatavaa tehoa laskettaessa ei enää tarvitse huomioida hyötysuhdetta, koska se on jo huomioitu lämpötilaa laskettaessa. (13, s. 14–15.)

Kuvissa 8 ja 9 on esitetty palautusilman ja lämmöntalteenoton jälkeiset lämpötilat eri ulkoilman lämpötiloilla. Kuvista nähdään selvästi palautusilman lämpötilarajoituksen vaikutukset talteen saatavaan lämpöön. Ulkoilman lämpötila on piirretty myös kuvaajana kaavion lukemista helpottamaan.



Kuva 8. Kaaviokuva lämpötiloista, kun palautusilman lämpötilaa ei ole rajoitettu.



Kuva 9. Kaaviokuva lämpötiloista, kun palautusilman lämpötila on rajoitettu.

Siten lämmöntalteenottolaitteistolla saadaan lämpöä talteen, kun palautusilman lämpötilarajaus otetaan huomioon:

$$\phi_{lto} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg/K}} * 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * (-18\text{ °C} - (-33\text{ °C})) = 8\,100\text{ W} .$$

On laskettu, että lämmöntalteenottolaitteiden avulla T_{lto} saadaan nostettua -33 °C :sta -18 °C :seen. Kun tiedetään kyseisen ulkoilman lämpötilan pysyvyys (ks. liite 1), voidaan laskea lämmitysenergian tarve kaavan 2 avulla, joka on mukailtu Laskentaohjeen (12, s. 23) kaavasta (3.10). Käyntiaikasuhdetermit on jätetty pois, koska ilmanvaihtokone (TK2) käy koko ajan.

$$Q_{iv} = q_v * \rho_i * c_{pi} * ((T_{sp} - \Delta T_{puhallin}) - T_{lto}) * \Delta t / 1\,000 \quad (2)$$

Q_{iv} on lämmitysenergian tarve [kWh]

q_v on tilavuusvirta [m^3/s]

ρ on tiheys [kg/m^3]

c_p on ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]

T_x on lämpötila [°C]

$\Delta T_{\text{puhallin}}$ on lämpötilan nousu puhaltimessa; 0,5 °C Laskentaohjeen oletusarvon mukaan

Δt on ajanjakson pituus, h

1000 kerroin.

Lasketaan tarvittava lämmitysenergia, kun ulkolämpötila T_u on -33 °C, jolloin T_{lto} on -18 °C:

$$Q_{iv} = 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg/K}} * ((+10 \text{ °C} - 0,5 \text{ °C}) - (-18 \text{ °C})) * 0,4 \text{ h} / 1\,000 = 5,7 \text{ kWh}.$$

Vaihtoehdossa A ei ole lämmöntalteenottoa, joten lämmitysenergiatarve lasketaan edelleen kaavan 2 mukaan, mutta T_{lto} on sama kuin ulkolämpötila T_u , esim. $T_{\text{lto}} = T_u = -33 \text{ °C}$, jolloin lämmitysenergian tarve on

$$Q_{iv} = 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg/K}} * ((+10 \text{ °C} - 0,5 \text{ °C}) - (-33 \text{ °C})) * 0,4 \text{ h} / 1\,000 = 9 \text{ kWh}.$$

Koko vuoden lämmitysenergian tarve saadaan laskemalla kaikille eri ulkolämpötiloille lämmitysenergian tarve (kaava 2) ja summaamalla tulokset yhteen.

Kaavaa 1 voidaan soveltaa palautusilmasta saatavaan jäähdytystehoon. Ilmanvaihtokone puhalttaa kylmää palautusilmaa laitetilään, joka lämpenee tilassa olevan laitekuorman vaikutuksesta lämpötilaan +25 °C. Esimerkiksi kun palautusilman lämpötila on +10 °C (rajoituksen takia) ja poistoilman lämpötila on keskimäärin +25 °C, palautusilmaan siirtyy teho

$$\phi_{\text{poistoilma-palautusi}} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg/K}} * 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * (+25 \text{ °C} - (10 \text{ °C})) = 8\,100 \text{ W}.$$

Koska laitteiden lämmönluovutusteho on 15 000 W ja seinämien kautta kallioon johtuu 2 000 W, pitää tilaa jäähdyttää jäähdytyskoneikolla:

$$15\,000\,W - 2\,000\,W - 8\,100\,W = 4\,900\,W.$$

Lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve lasketaan erikseen kaikille lämpötiloille pysyvyyssietojen perusteella. Lasketut lämmitysenergian tarpeet summataan yhteen ja näin saadaan koko vuoden lämmitystarve laskettua. Näin tehdään myös jäähdytysenergian tarpeelle. Tällainen laskelma suoritetaan sekä vaihtoehdolle A (ei lämmöntalteenottoa, $T_{lto} = T_u$) ja vaihtoehdolle B (lämmöntalteenotto, palautusilma rajoitettu +10 °C). Vaihtoehdon A jäähdytysenergian tarve on laitteiden lämpökuorma vähennettynä tilan lämpöhäviöllä.

6.2.2 Laitteistojen kuluttama sähköenergia

Ilmanvaihtojärjestelmän ja jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutukset lasketaan Laskentaohjeen mukaan. Laskelmissa hyödynnetään tietoa ilmanvaihtokoneen halutusta ominaissähkötehosta (SFP-luku). Laskentaohjeessa sanotaan, että koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä on hyvä suunnitella niin, että SFP-luku on pienempi kuin 1,8 kW/(m³/s). Tätä on käytetty vaihtoehdon B sähkönkulutuksen laskemiseksi. Vastaavasti vaihtoehdolle A, koneellinen poistoilmavaihtojärjestelmän (tässä tapauksessa koneellinen tuloilmajärjestelmä) SFP-luku on pienempi kuin 0,9 kW/(m³/s). (12, s. 56.) Kaavan 3 ja kaavan 4 avulla lasketaan ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus (12, s. 56):

$$W_{ilmanvaiht} = \sum SFP * q_v * \Delta t + W_{iv,muut} \quad (3)$$

$W_{ilmanvaihto}$ on ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus, [kWh]

SFP on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, [kW/(m³/s)]

q_v on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ilmavirta, [m³/s]

Δt on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen käyttöaika laskentajaksolla, [h]

$W_{iv,muut}$ on muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus, [kWh].

$$W_{iv,muut} = \sum P_{muu} * \Delta t / 1\,000 \quad (4)$$

$W_{iv,muut}$ on muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus, [kWh]

P_{muu} on muiden ilmanvaihtojärjestelmän laitteiden kuin puhaltimien ja puhaltimen tehonsäätölaitteiden sähköteho, [W]

Δt on ajanjakson pituus, [h].

Esimerkiksi lasketaan vaihtoehto B:n ilmanvaihdon sähköenergian kulutus vuodessa kaavalla 3 ja 4. Kaavan 4 mukainen muiden laitteiden sähköteho ΣP_{muu} on arvio, joka perustuu erään laitevalmistajan valintaohjelman antamiin tietoihin. Se koostuu mm. tehonsäätölaitteiden verkosta ottamaan sähkötehoon.

$$W_{\text{ilmanvaihto}} = 1,8 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} * 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 8\,760 \text{ h} + \left(\frac{10 \text{ W} * 8\,760 \text{ h}}{1\,000} \right) = 7\,183 \text{ kWh}.$$

Jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus lasketaan Laskentaohjeen mukaan. On huomioitavaa, että jäähdytystehon ja -energian tarpeen laskelmat perustuvat ajatukseen, jossa koko laitekuorma on jäähdytetty. Muita hetkellisiä tai puuttuvia kuormia, kuten huoltohenkilön käyntiä, valoja ja aurinkoa, ei ole laskelmissa huomioitu. Vaikka jäähdytysjärjestelmät ovat molemmissa vaihtoehdossa identtiset, vaihtoehdossa B jäähdytystehoa saadaan laittiloihin myös ilmanvaihdon kautta, jolloin jäähdytysenergian tarve on pienempi. Kun jäteilmaa ei voida enää jäähdyttää ulkoilman avulla, molemmat vaihtoehdot toimivat samalla tavalla. Kaavojen 5¹, 6 ja 7 avulla lasketaan jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutus (10, s. 59–62).

$$Q_{jk} = (1 + \beta_{h_{jv}}) * Q_{jv} \quad (5)$$

Q_{jk} on jäähdytysjärjestelmällä tuotettu jäähdytysenergia, [kWh/a]

$\beta_{h_{jv}}$ on järjestelmän vesipuolen häviöt huomioon ottava kerroin, oletettu nolllaksi

Q_{jv} on huonelaitteiden käyttämä jäähdytysenergia, [kWh/a]

$$W_{\text{jäähdytys}} = \frac{Q_{jk}}{\epsilon_E} + W_{\text{jäähd.apu}} \quad (6)$$

$W_{\text{jäähdytys}}$ on jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus, [kWh/a]

ϵ_E on jäähdytysenergian tuottoprosessin vuotuinen kylmäkerroin, [-]

$W_{\text{jäähd.apu}}$ on jäähdytysjärjestelmän apulaitteiden sähkönkulutus, [kWh/a]

$$W_{\text{jäähd.apu}} = \beta_{\text{apu}} * Q_{jk} \quad (7)$$

β_{apu} on järjestelmän vuotuinen apulaitteiden sähkönkulutuksen kulutuskerroin, oletettu 0,05 (12, s. 62) [-].

¹ Kaavasta jätetty pois ilmastointikoneen ja ilmapuolen termit.

Esimerkiksi voidaan laskea vaihtoehto B:n jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus, kun lähtötiedot tuotettu jäähdytysenergian ja kylmäkertoimen osalta ja häviöt on oletettu nollassa, koska jäähdytysjärjestelmän häviöiden oletetaan olevan mitättömät, koska kyseessä on suora höyrysteinen ja suoralauidutteinen koneikko, jossa putkipituudet ovat pienet:

$$W_{\text{jäähdytys}} = \frac{55\,302 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{3} + 55\,302 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} * 0,05 = 21\,199 \text{ kWh/a.}$$

6.3 Sähkön käytön CO₂-päästöt

Vaihtoehtojen ekologisuutta arvioidaan CO₂-päästöjen laskennallisella vertailulla. Laskelmat perustuvat Motiva Oy:n ohjeistukseen Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet (12/2012) (14). Ohjeen on tarkoitus palvella tilanteissa, joissa halutaan ”arvioida yhtäaikaaisesti sekä yksittäisen kohteen energiankäyttöön että siellä toteutettavien energiansäästötoimenpiteiden CO₂-päästövaikutuksia.” Sähkön käytön CO₂-päästöjen laskennassa kiinteistön vuosittainen sähkönkulutus (MWh/a) kerrotaan laskennallisella CO₂-päästökertoimella. Laskettaessa ostosähkön päästöjä ohjeessa suositellaan, että laskelmat tehdään sähkönmyyjän ilmoittamalla CO₂-päästökertoimella K1 ja Suomen keskimääräisellä CO₂-päästökertoimella K2. (14, s. 2, 8–9.) Viimeisin päivitys (12.5.2020) CO₂-päästökertoimelle K2 on 141 kgCO₂/MWh (15). Sähkön myyjän CO₂-päästökertoimen, K1, on 211 gCO₂/kWh (16).

Esimerkiksi vaihtoehdon B CO₂-päästöt laskettuna kertoimilla K1 ja K2 ovat

$$K_1 = 211 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MWh}} * 32,5 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} / 1\,000 = 6,8 \frac{\text{tCO}_2}{\text{a}},$$

$$K_2 = 141 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MWh}} * 32,5 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} / 1\,000 = 4,6 \frac{\text{tCO}_2}{\text{a}}.$$

6.4 Kannattavuuslaskelmat

Tässä insinööriyössä hyödynnetään Sirénin Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta -dokumenttia, joka esittelee investointilaskelmien perusteita ja menetelmiä lyhyesti. Laskettaessa investointien kannattavuutta on otettava huomioon se, että eri ajankohtina tapahtuvat menoerät eivät ole suoraan laskettavissa yhteen. Kaikki menoerät on tuotava samaan hetkeen korkotekijöiden avulla, jotta päästään arvioimaan kannattavuutta. (11, s. 3.)

Hankkeiden kannattavuutta voidaan arvioida useamman eri laskentamenetelmän avulla. Tässä insinööriyössä kannattavuuden arvioinnissa käytetään seuraavia menetelmiä:

- takaisinmaksuaika
- nykyarvo
- sisäinen korkokanta.

Takaisinmaksuaikamenetelmien etu on se, että ne ovat helposti laskettavissa ja ymmärrettävissä. Jos takaisinmaksuaika on liian pitkä verrattuna tavoiteltuun takaisinmaksu-aikaan, hanke ei ole kannattava. Takaisinmaksuaikamenetelmiä on kaksi: yksinkertainen (kaava 8) ja korollinen (kaava 9) (11, s. 11–12):

$$N = \frac{I}{VNT} \quad (8)$$

$$N = \frac{\ln(1 - \frac{I}{VNT} * i)}{\ln(\frac{1}{1+i})} \quad (9)$$

N on takaisinmaksuaika, [a]

I on investointi, [€]

VNT on vuotuinen nettotuotto, [€/a]

i on valittu korkokanta, [%/100].

Esimerkiksi vaihtoehdon B yksinkertainen ja korollinen takaisinmaksuaika (reaalikorolla), kun investointi on (I) 35 000 € (B–A = 60 000 € – 25 000 €), vuotuinen nettotuotto (VNT) 5 285 €/a ja korkokanta 3 %:

$$N = \frac{35\,000 \text{ €}}{5\,285 \text{ €/a}} = 6,6 \text{ a} \quad \text{ja}$$

$$N = \frac{\ln\left(1 - \frac{35\,000 \text{ €}}{5\,285 \text{ €/a}} * 0,03\right)}{\ln\left(\frac{1}{1+0,03}\right)} = 7,5 \text{ a.}$$

Nykyarvomenetelmä ”ottaa huomioon rahan aikariippuvaisuuden.” Kaikki menoerät siirretään nykyhetken diskonttaustekijöiden avulla. (11, s. 13.) Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviä 2010/31/EU (rakennusten energiatehokkuus) täydentävässä Euroopan komission asetuksessa N:o 244/2012 (energiatehokkuuden kustannuslaskelma) ohjataan nykyarvomenetelmän käyttöön kokonaiskustannuslaskelmissa. Jos vuotuinen tuotto on sama vuodesta toiseen ja jos tämä pätee myös vuotuisiin kuluihin, voidaan nykyarvomenetelmä laskea kaavan 10 avulla (11, s. 13):

$$P = a_{nT} * T - a_{nK} * K - I_0 + \frac{S}{(1+i)^n} \quad (10)$$

P on pääoma/nykyarvo, [€]

a_{nT} on samansuuruisien tuottojen n vuoden tarkastelujaksolle laskettu diskonttaustekijä

T on tuotot vuodessa, [€/a]

a_{nK} on samansuuruisien kulujen n vuoden tarkastelujaksolle laskettu diskonttaustekijä

K on kulut vuodessa, [€/a]

I_0 on alkuinvestointi ensimmäisen vuoden alussa, [€]

S on jäännösarvo vuoden n lopussa, [€]

i on valittu laskentakorko, [%/100]

n on tarkastelu-aika, [a].

Diskonttaustekijä a_{nX} lasketaan kaavalla 11 (9, s. 7):

$$a_{nX} = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \quad (11)$$

a_{nX} on jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä, [-]

i on valittu laskentakorko, [%/100]

n on tarkastelu-aika, [a].

Esimerkiksi diskonttaustekijä reaalkorolla 3 %, kun tarkastelujakso on 15 vuotta, on

$$a'_{nT} = \frac{1-(1+0,03)^{-15a}}{0,03} = 11,94.$$

Tällöin nykyarvo on, kun vuodessa säästetty energiakustannus on (T) 6 363 €, lisääntyneet käyttökustannukset (K) 1 078 €, (lisä)investointi (I_0) 35 000 € ja jäännösarvo (S) 0 €:

$$P = 11,94 * 6\,363 \text{ €} - 11,94 * 1\,078 \text{ €} - 35\,000 \text{ €} = 28\,088 \text{ €}$$

Nykyarvomenetelmällä saatavat tulokset voidaan jakaa kolmeen kategoriaan sen mukaan, onko tulos (P) negatiivinen, positiivinen vai nolla. $P < 0$ tarkoittaa, että tuottovaatimus valitulla korolla ei toteudu, mutta tämä ei suoraan tarkoita sitä, että hanke on tappiollinen. $P > 0$ tarkoittaa, että tuottovaatimus asetetulla korolla toteutuu ja ylittyy. Hanke on kannattava. $P = 0$ tarkoittaa, että tuottovaatimus täyttyy valitulla korolla, eli hanke on kannattava. (11, s. 12–13.)

Sisäinen korkokantamenetelmä ilmaisee tuoton vuotuisena korkona. Tämän korkomuo-
toisuuden ansiosta tällä menetelmällä voidaan vertailla keskenään erilaisia investointeja,
esim. energiansäästöinvestointia osakesijoitukseen. Yksinkertaisessa tapauksessa,
jossa vuotuinen nettotuotto on vakio ja jäännösarvo on 0, saadaan nykyarvon yhtälö
kaavan 12 muotoon (11, s. 13):

$$P = a_n * VNT - I_0 = 0 \tag{12}$$

P on pääoma, [€]

a_n on jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä, [-]

VNT on vuotuinen nettotuotto, [€/a]

I_0 on alkuinvestointi, [€].

Tällöin korko voidaan esittää kaavan 13 muodossa (11, s. 14):

$$i = \frac{1-(1+i)^{-n}}{VNT} \tag{13}$$

i on korko, [%/100]

n on tarkastelu-aika, [a]

I_0 on alkuinvestointi, [€]

VNT on vuotuinen nettotuotto, [€/a].

Kaavasta 13 nähdään, että sen ratkaiseminen vaatii iterointia, mutta tämä hoituu helposti Excelin avulla, esimerkiksi tavoitteen haku -työkalulla tai SISÄINEN.KORKO -funktiolla. Esimerkiksi, kun investointi on (I_0) 35 000 €, vuotuinen nettotuotto (VNT) 5 285 € ja tarkastelu-aika (n) 15 vuotta, ja arvataan koroksi (i) 5 %, saadaan tulokseksi

$$i = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-15}}{35\,000 \text{ €} / 5\,285 \frac{\text{€}}{\text{a}}} = 0,078.$$

Arvattu korko ei ole sama kuin laskettu korko, joten iteroidaan, kunnes oikea korko löytyy.

Helppolukuinen graafinen esityksen luomiseksi insinööriyössä käytettiin kassavirtalaskelmaa. Kassavirtalaskelmassa "kunkin vuoden diskonttaustekijänä käytetään yksittäisen suorituksen diskonttaustekijää" (11, s. 17) kaavan 14 avulla:

$$a_k = \frac{1}{(1+i)^k} \quad (14)$$

a_k on diskonttaustekijä, [-]

i on reaalikorko, [%/100]

k on vuoden järjestysnumero, [-].

Jokaisen vuoden kulut kerrotaan jokaisen vuoden omalla diskonttaustekijällä, jolloin saadaan jokaisen vuoden kulujen nykyarvo. Summaamalla jokainen vuoden kulujen nykyarvo lasketaan diskontattu kassavirta (ks. liite 3).

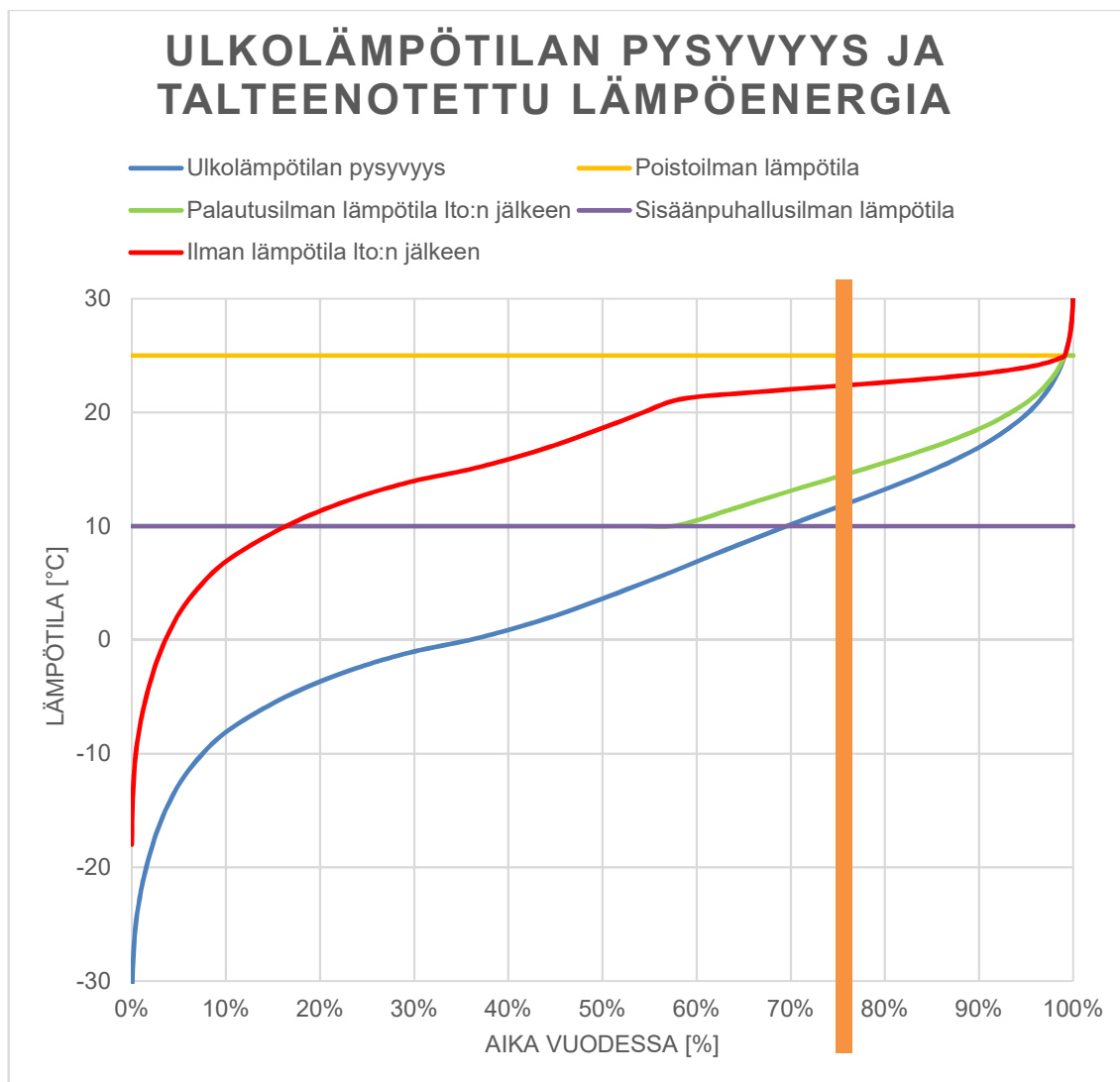
Nämä eri menetelmät on valittu sen perusteella, että kannattavuutta voitaisiin arvioida useammasta eri näkökulmasta. Kannattavuuslaskelmat on toteutettu sillä periaatteella, minkälaisia säästöjä saadaan lisäinvestoinnin avulla. Tässä tapauksessa A:n investointikustannukset ovat 25 000 € ja B:n 60 000 €, jolloin lisäinvestointi on 35 000 €. Vuotui-

nen nettotuotto on säästettyjen vuotuisten kustannusten (lämmitys ja jäähdytys) ja lisääntyneiden vuotuisten kustannusten (ilmanvaihtokone ja huolto) erotus A:n kustannusten ja B:n kustannusten välillä. Tämän valinnan on tarkoitus selkeyttää vaihtoehdon B kannattavuuden arviointia. Vaihtoehdoista on tehty myös suora vertailu, jossa molempia vaihtoehtoja verrataan toisiinsa sellaisenaan.

7 Tulokset

Tässä luvussa esitellään laskelmien tarkemmat tulokset eri tarkastelualueilta. Liitteessä on otteita työssä laaditusta laskentataulukosta.

Tässä työssä tavoitteena oli selvittää vaihtoehdon B kannattavuus verrattuna siihen, että lämpöä ei oteta talteen (vaihtoehto A). Esitellyssä hukkalämmön talteenottojärjestelmässä oleellista ei ole vain se, kuinka paljon lämmityskustannukset pienenevät vaan myös se, kuinka paljon tämän järjestelmän avulla voidaan vähentää jäähdytyskustannuksissa. Kuvassa 10 tämä on esitetty lämpötilan ja ajan (prosentuaalinen aika vuodessa) funktiona. Kuvassa sinisellä on ulkolämpötilan pysyvyys eli kuinka monta tuntia vuodessa ulkolämpötila on alle valitun lämpötilan. Liila käyrä kuvaa sisäänpuhallusilman lämpötila +10 °C eli lämpötila, johon tuloilma lämmitetään. Näiden kahden käyrän (sininen ja liila) väliin jäävä alue kuvaa lämmitystarvetta järjestelmälle ilman LTO:a (vaihtoehto A:n lämmitystarve). Oranssilla on laiteloista poistoilmana ilmanvaihtokoneelle tuleva ilma, jonka lämpötilan oletetaan olevan +25 °C. Tästä ilmasta otetaan lämpöä talteen vaihtoehdossa B. Vihreä kuvaa palautusilman lämpötilaa lämmön talteenoton jälkeen. Tämä ilma puhalletaan takaisin laittiloihin. Punainen väri kuvaa tuloilman lämpötilaa, johon LTO-laite ulkoilman nostaa. Tarvittaessa tätä ilmaa lisä lämmitetään. Punaisen ja liilan käyrän väliin jäävä alue kuvaa lämmitystarvetta, kun LTO on käytössä (vaihtoehto B).



Kuva 10. Kaavio lämmöntalteenotolla saatavasta lämpöenergiasta. Oranssi pystyviiva kuvaa lämmityskautta.

Tässä insinööriyössä vaihtoehtojen A ja B sähkönkäytön erot muodostuvat seuraavista osa-alueista: tuloilman jälkilämmityspatterin ja jäähdytysjärjestelmän kuluttama sähköenergia sekä puhaltimien sähköenergian kulutus. Taulukoihin 2–10 on koottu osa-alueittain laskelmien tulokset.

Taulukkoon 2 on koottu lämmitys- ja jäähdytystarvelaskelmien tulokset molempien vaihtoehtojen osalta. Nähdään, että vaihtoehdolla B säästetään 28,8 MWh vuodessa eli 88 % lämmitysenergiassa ja 58,6 MWh vuodessa, eli 51 % jäähdytysenergiassa.

Taulukko 2. Lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve vuodessa

Tarve	A	B	Muutos A -> B	%	Yksikkö
Ilmanvaihdon lämmitystarve, Q_{iv}	32,9	4,1	-28,8	88	MWh/a
Laitetilojen jäähdytysenergian tarve, Q_{jk}	113,9	55,3	-58,6	51	MWh/a

Taulukossa 3 on esitetty kertaalleen jäähdytysjärjestelmän lähtötiedot ja laskelman tulokset molemmille vaihtoehdoille. Kaavoista ja taulukon arvoista voidaan todeta, että sähkönkulutus on riippuvainen jäähdytysjärjestelmällä tuotetusta jäähdytysenergiasta. Siten kun jäähdytysenergian tarvetta onnistutaan pienentämään 51 %, sähkönkulutus laskee saman verran.

Taulukko 3. Jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus

Muuttuja	A	B	Muutos A -> B	%	Yksikkö
Laitetilojen jäähdytysenergian tarve, Q_{jk}	113,9	55,3	-58,6	51	MWh/a
Kylmäkerroin, ϵ_E	3	3			
Apulaitteiden sähkönkulutuskerroin, β_{apu}	0,05	0,05			
Jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus, $W_{jäähdytys}$	43,7	21,2	-25,9	51	MWh/a

Taulukkoon 4 on koottu laskelmien tulokset, kun käyntiaika on molemmissa 8 760 h ja ilmavirta on 0,45 m³/s ja SFP-luvut ovat A:lle 0,9 kW/(m³/s) ja B:lle 1,8 kW/(m³/s). Taulukosta 4 nähdään, että vaihtoehdon B ilmanvaihtokone kuluttaa 106 % enemmän sähköä. Tämä johtuu siitä, että B:ssä on kaksi puhallinta ja LTO-laitteisto A:n yhtä puhallinta vastaan.

Taulukko 4. Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus

Sähkönkulutus	A	B	Muutos A -> B	%	Yksikkö
Puhaltimen sähkönkulutus vuodessa, $\Sigma SFP \cdot q_v \cdot \Delta t$	3,5	7,1	+3,6		MWh/a
Muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus, $W_{iv, muut}$	0	0,09	+0,09		MWh/a
Ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus, $W_{ilmanvaihto}$	3,5	7,2	+3,6	102	MWh/a

Taulukossa 5 on esitetty yhteenvetona vaihtoehtojen A ja B eri osa-alueiden sähkönkulutukset ja CO₂-päästöt laskentaohjeistuksen mukaan edellä mainituilla CO₂-päästökerointen arvoilla, K1 = 211 kg/CO₂/MWh ja K2 = 141 kg/CO₂/MWh.

Taulukko 5. CO₂-päästölaskelma

Kulutustiedot	A	B	Muutos A -> B	%	Yksikkö
Ilmanvaihtokoneen käyttämä sähköenergia	3,5	7,2	+3,7	102	MWh/a
Lämmityksen käyttämä sähköenergia	32,9	4,1	-28,8	88	MWh/a
Jäähdytyksen käyttämä sähköenergia	43,1	21,2	-22,5	51	MWh/a
Kokonaissähköenergian kulutus	80,1	32,5	-47,6	59	MWh/a
Sähkötöiden kokonaispäästöt CO ₂ : K1	16,9	6,8	-10,1	59	tCO ₂ /a
Sähkötöiden kokonaispäästöt CO ₂ : K2	11,3	4,6	-6,7	59	tCO ₂ /a

Taulukosta 5 nähdään, että CO₂-päästöt ovat vaihtoehdossa B 59 % pienemmät kuin vaihtoehdossa A kertoimella K1 ja K2. Tämä johtuu lämmityksessä ja jäähdytyksessä säästettävästä sähköenergian kulutuksessa. Lämmityksessä säästetään 88 % ja jäähdytyksessä 51 %. Vaikka vaihtoehdon B ilmanvaihtokone kuluttaa enemmän sähköä, sen vaikutus on vähäinen verrattuna lämmityksen ja jäähdytyksen sähkön säästöön ja sitä kautta CO₂-päästöihin.

Kuten edellä on nähty (taulukko 5), vaihtoehdolla B voidaan säästää yhteensä n. 48 MWh/a vuodessa. Kun sähkön hinta on 120 €/MWh, sähkölaskussa säästetään 5 716 € vuodessa. Vuodessa säästettäviin kustannuksiin on huomioitava myös muuttuvat huoltokustannukset, jotka ovat vaihtoehdossa B 600 €/a enemmän kuin vaihtoehdossa A. Siten vaihtoehdolla B säästetään 5 116 €/a, kun sähkön kulutus ja huoltokustannukset on huomioitu. Taulukkoon 6 on koottu sähkönkulutuksen muutos A:n ja B:n välillä ja selvitetty, mitä se tarkoittaa rahallisesti.

Taulukko 6. Sähkönkulutuksen muutos ja siitä saatavat säästöt

Muuttuja	Muutos	Yksikkö	Muutos	Yksikkö
Säästetty sähkö lämmityksessä	28,8	MWh/a	3 458	€/a
Säästetty sähkö jäähdytyksessä	22,5	MWh/a	2 695	€/a
IV-koneen lisäsähkö	-3,6	MWh/a	-436	€/a
Huoltokustannukset (erotus A-B)	-		-600	€/a
Kokonaismuutos / säästö	49,0	MWh/a	5 116	€/a

Jotta voidaan arvioida vaihtoehdon B kannattavuutta, lasketaan takaisinmaksuaika, nykyarvo ja sisäinen korkokanta tämän vuotuisen säästön avulla. Taulukkoon 7 on koottu vielä kannattavuuslaskennan lähtöarvot ja taulukkoon 8 tuloksia, kun vaihtoehdon B kannattavuutta lasketaan säästöjen ja lisäinvestoinnin perusteella. Excel-taulukossa löytyvät vastaavat solut; liljat solut ovat käyttäjän muokattavissa ja vihreissä soluissa kaavojen avulla lasketut arvot.

Taulukko 7. Kannattavuuslaskennan lähtöarvot

Lyhenne	Muuttuja	Arvo	Yksikkö
n	Tarkastelu-aika	15	a
r	Reaalikorko	3 %	
a'n	Reaalikoron mukaan laskettu diskonttaustekijä	11,94	-

Taulukosta 8 nähdään, että kun vaihtoehdon B kustannuksia verrataan vuosittaisiin säästöihin, se maksaa itsensä takaisin noin 8 vuodessa, mikä on tarkasteluajan puolella välissä. Nykyarvomenetelmän perusteella järjestelmä on kannattava, koska nykyarvo on suurempi kuin 0. Tämän projektin puitteissa ei verrattu kahta täysin erilaista investointia toisiinsa, joten sisäisen korkokannan laskenta ei olisi ollut välttämätön. Lisäinvestointi I on vaihtoehdon A ja B erotus (60 000 € – 25 000 €). Sisäisen koron laskeminen vaatii iterointia. Excelissä se on toteutettu tavoitteen haku -toiminnon avulla. Exceliin on myös kirjoitettu makro, jonka avulla sisäinen korko voidaan laskea uudelleen, jos lähtötietoja on muutettu.

Taulukko 8. Kannattavuuslaskennan tuloksia säästövertailussa

Lyhenne	Muuttuja	Arvo	Yksikkö
NVT	Vuotuinen nettotuotto	5 116	€/a
I	Lisäinvestoinnit	35 000	€
S	Jäännösarvo	0	€
N	Takaisinmaksuaika	6,8	a
N _r	Korollinen takaisinmaksuaika (reaalikorko)	7,8	a
P' _r	Nykyarvo (reaalikorko)	26 073	€
i _{sis}	Sisäinen korko	12 %	

Vaihtoehdojen kokonaistarkastelulla on haluttu tuoda vielä yksi kannattavuusnäkökulma lisää. Taulukoihin 9 ja 10 on koottu molempien vaihtoehdojen kokonaistarkastelu.

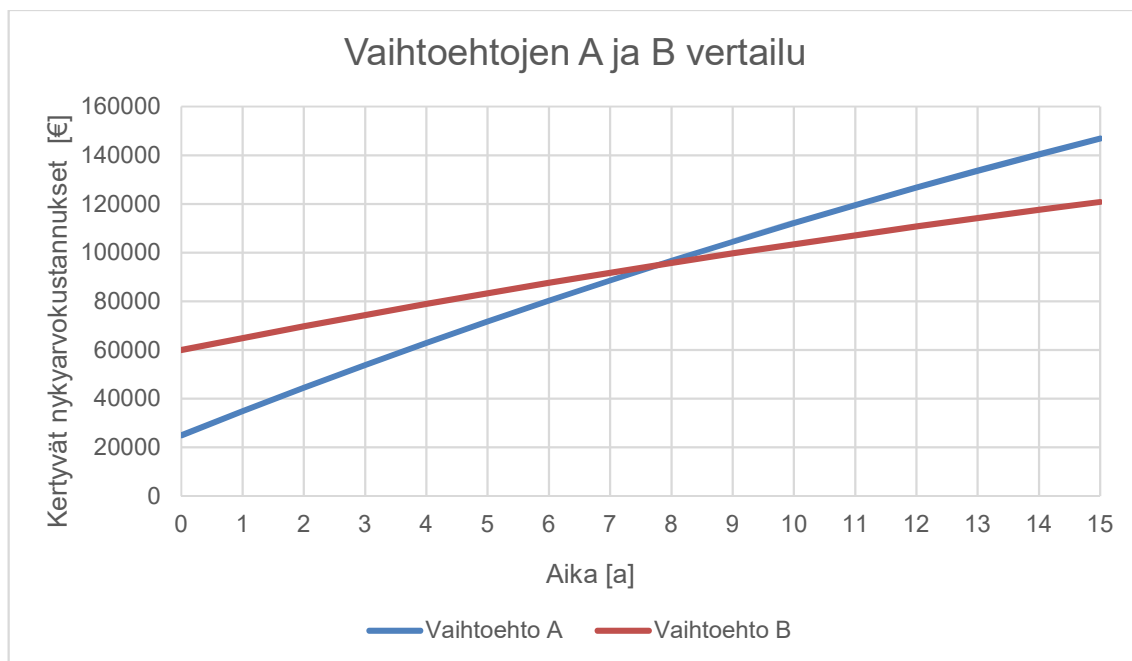
Taulukko 9. Vaihtoehto A, kokonaistarkastelu

Q_{iv}	Lämmitykseen käytetty sähkö	32,9	MWh/a
$W_{jäähditys}$	Jäähdytykseen käytetty sähkö	43,7	MWh/a
W_{iv}	Puhaltimien jne. sähkö	3,5	MWh/a
	Huoltokustannukset	600	€/a
Q_{lto}	Talteenotettu energia	0	MWh/a
I	Investoinnit	25 000	€
T	Tuotot	0	€/a
K	Kulut	10 211	€/a
S	Jäännösarvo	0	€
A	Vuotuinen nettotuotto	-10 211	€/a
P	Nykyarvo (reaalikorko)	-146 902	€

Taulukko 10. Vaihtoehto B, kokonaistarkastelu

Q_{iv}	Lämmitykseen käytetty sähkö	4,1	MWh/a
$W_{jäähditys}$	Jäähdytykseen käytetty sähkö	21,2	MWh/a
W_{iv}	Puhaltimien jne. sähkö	7,2	MWh/a
	Huoltokustannukset	1 200	€/a
Q_{lto}	Talteenotettu energia	59	MWh/a
I	Investoinnit	60 000	€
T	Tuotot	0	€/a
K	Kulut	5 095	€/a
S	Jäännösarvo	0	€
A	Vuotuinen nettotuotto	-5 095	€/a
P	Nykyarvo (reaalikorko)	-120 829	€

Taulukoista käy ilmi, että vaikka investointi- ja huoltokustannukset tuplaantuivat (tai enemmän), pienentyneet kustannukset ja talteen otettu energia riittävät pitämään vaihtoehdon B nykyarvotarkastelun perusteella vaihtoehtoa A kannattavampana. Kuvaan 11 on koottu kustannuslaskelmien tulokset kertyvien nykyarvokustannusten avulla. Vaihtoehdon B takaisinmaksuaikaa edustaa janojen leikkauspiste.



Kuva 11. Vaihtoehtojen vertailu.

8 Pohdinta

Laskelmien valmistuttua tuloksia on mielenkiintoista lähteä pohtimaan erilaisten skenaarioiden avulla. Esimerkiksi mitä tapahtuisi, jos sisäänpuhalluslämpötilaa pudotettaisiin +5 °C:seen? Tähän lukuun on poimittu muutamia tällaisia kysymyksiä, joita heräsi tämän insinööriyöprosessin aikana.

Jos sisäänpuhalluslämpötilaa voitaisiin pudottaa 5 astetta +5 °C:seen, säästöjä syntyisi suoraan 13,9 MWh/a (= 1 668 €/a) vaihtoehdossa A ja vastaavasti 2,3 MWh/a (= 276 €/a) vaihtoehdossa B. Tällä ei ole vaikutusta säästövertailussa eikä vaihtoehtojen välisessä kokonaistarkastelussa, vaikka vaihtoehdon B kannattavuus säästöihin verrattuna heikkenee. Mikäli laitetiloihin voitaisiin johtaa kylmempää ilmaa, toisi se säästöjä sekä lämmityksessä että jäähdytyksessä. Tällainen muutos tekisi vaihtoehdosta B edelleen paremman verrattuna A:han. Jos laitetiloihin puhallettavan ilman lämpötila rajoitettaisiin +5 °C:seen, jäähdytyskustannuksissa voitaisiin säästää (A:han verrattuna) 3 197 €/a. Toisaalta, vaikka jäähdytyskustannuksissa ei säästettäisi mitään ja jäteilma johdettaisi pi-

halle lämmöntalteenoton jälkeen, lämmityksessä säästettävät kustannukset riittävät pitämään vaihtoehdon B parempana kuin A sekä säästövertailussa että kokonaisvertailussa.

On mielenkiintoista nähdä, miten jo muutamien asteiden muutokset lämpötiloissa merkitsevät vuotuiselle sähkökulutukselle ja käyttökustannuksille. Lämpötilojen muutoksia ei kuitenkaan voida tehdä sellaisissa tiloissa, joissa prosessi tai muut tekijät vaativat tiettyjä lämpötiloja.

Tässä insinööriyössä käsitellyssä esimerkikohteessa jäähdytysjärjestelmän lauhduttimet sijaitsevat välikattotilassa, jossa vapautuva lämpö lämmittää tilaa. Tämä lämpö ei mene täysin hukkaan, koska varsinkin kesällä, jolloin muuta jäähdytystä ei ole saatavilla, tilan kalliioseiniin ja kattoon sitoutuu lämpöä, josta on apua talvella. Toinen mahdollisuus tämän lämmön hyödyntämiseen voisi olla järjestelmä, jolla jäähdytyslaitteistojen lauhdelämpöä ohjattaisiin ilmanvaihdon lämmitykseen, jolloin sähköisen lämmityspatterin käyttö vähenisi entisestään.

9 Yhteenveto

Kiinnostus hukkalämmön talteenottoon on kasvamassa, kun vaatimukset energiatehokkuudesta ja ilmastomuutoksen torjunnasta lisääntyvät. Yrityksessä oltiin kiinnostuneita erään kohteen hukkalämmön talteenoton kannattavuudesta. Tavoitteena oli selvittää suunnitellun järjestelmän kannattavuus ja laatia Excel-laskentataulukko, jota voitaisiin hyödyntää myös tulevilla projekteilla.

Tässä insinööriyössä on yhdistetty kirjallisuustutkimus ja laskentametodit. Kaikkiin osaluaisiin on tutustuttu kirjallisuuden avulla. Aiheen rajausta ja yksikertaistuksia on tehty sitä mukaa, kun aiheesta on saatu enemmän tietoa ja on pystytty valitsemaan tälle työlle merkityksellisimmät osakokonaisuudet. Näiden tietojen avulla on pyritty tekemään oikeat yksinkertaistukset laskelmia varten. Kaikki laskelmat tehtiin Excel-taulukkoon, joka pyrittiin tekemään sellaiseksi, että muutamaa lähtötietoa muuttamalla saataisiin tulokset kaikista kannattavuuden mittareina toimivista osaluaisista: energian kulutus, CO₂-päästöt

ja kustannuslaskelmat, takaisinmaksuaika-, nykyarvo- ja sisäisen korkokannan menetelmällä. Sen sijaan, että olisi käytetty Excel-ohjelman omaa sisäinen korkokanta -funktiota, päätettiin sen laskemiseksi luoda makro, koska arvojen muuttuessa makroa on helpompi käyttää.

Laskelmien valmistuttua havaittiin, että hukkalämmön talteenotto on kaikista merkityksellisintä juuri lämmitysenergian ja -kustannusten kannalta. Järjestelmän avulla säästettäisiin 28,8 MWh/a (88 %) lämmitykseen kuluva sähköstä. Tämä säästö riittäisi yksinään tekemään vaihtoehdosta B kannattavamman kuin vaihtoehto A, vaikka vaihtoehto B on yli kaksi kertaa kalliimpi. Kun tähän säästöön lisätään vielä jäähdytyksestä saatavat säästöt, on ilmeistä, että vaihtoehto B on kannattavampi suorassa vertailussa vaihtoehtojen välillä. Vaihtoehdon A nykyarvo reaalikorolla 3 % on -146 902 € ja vaihtoehdon B -120 829 €. Kokonaisuudessa vaihtoehdolla B voitaisiin säästää 5 116 € vuodessa, kun lisäkustannukset ilmastovaihdossa ja huollossa otetaan huomioon. Kun tätä säästöä verrataan 35 000 €:n lisäinvestointiin maksaa järjestelmä itsensä takaisin kahdeksassa vuodessa.

Tulevaisuudessa olisi kiinnostavaa tutkia erilaisia hukkalämmön talteenottojärjestelmiä ja vertailla niitä keskenään. Toinen mielenkiintoinen lähtökohta voisi olla kohde, jossa hukkalämmölle olisi mahdollista löytää useampi kuin yksi vartenotettava käyttökohde ja tehdä vertailu niiden välillä.

On selvää, että erilaisia hukkalämmön talteenoton ratkaisuja on kehitettävä lisää ja tässä vaaditaan useamman tahon yhteistyötä, jotta niistä saataisiin toimivia. Tämä pätee varsinkin silloin, kun järjestelmä on monimutkaisempi ja hukkalämmölle ei löydy sisäisiä käyttökohteita. Uusia ratkaisuja ja ideoita tarvitaan lisää.

Lähteet

- 1 EU 2018/2001. 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi (uudelleen laadittu). Verkkoaineisto. Euroopan unionin virallinen lehti. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2018:328:FULL&from=FI>>. Luettu 14.5.2020.
- 2 Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. 2019. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys - Ylijaamalammon potentiaali teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf)>. Luettu 14.5.2020.
- 3 Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. 2014. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon taloudellinen hyodyntaminen Ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf](https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf)>. Luettu 14.5.2020.
- 4 Väyläviraston ohjeita 5/2019. 2019. Tietunneleiden LVI-suunnitteluohje. Helsinki: Väylävirasto.
- 5 Sähkötilojen ilmanvaihto ja jäähdytys. 2017. ST 56.31. Sähkötieto Oy.
- 6 Energiatehokas konesali. 2011. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas konesali.pdf](https://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf)>. Luettu 6.11.2020.
- 7 Kalliorakentaminen 2000, projekti 7.2.1996. Maanalaisten tilojen ilmastointi ja energiatase. Espoo: RIL, TEKES, Rakennus-EKONO Oy.
- 8 Väätäinen, Anne & Ritola, Jouko. 1989. Suuret kalliotilat, Kalliotilojen lämpöhäviöiden määrittäminen. Espoo: VTT.
- 9 Sandberg, Esa (toim.). 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus, Ilmastointitekniikka osa 2. 2. painos. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 10 Energian hinnat 3. vuosineljännes 2020, liitekuviot 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. 2020. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/til/ehi/2020/03/ehi_2020_03_2020-12-10_kuv_005_fi.html>. Luettu 24.1.2021.
- 11 Sirén, Kai. 2015. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 12 Energiatehokkuus. 2018. Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki: ympäristöministeriö.

- 13 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 14 Hippinen, Ilkka & Suomi, Ulla. 2012. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet. Helsinki: Motiva Oy.
- 15 CO₂-päästökertoimet. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <<https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiansaanti-suomessa/co2-laskentaohje-energiansaamisen-hiilidioksidipäästöjen-laskentaan/co2-paastokertoimet>>. Luettu 12.10.2020.
- 16 Myydyn sähkön alkuperä. Verkkoaineisto. Lahti Energia <<https://www.lahtienergia.fi/fi/sahko/tietoa-sahkon-ostajalle/sahkon-tuoteseloste>>. Luettu 12.10.2020.

Ilmatieteen laitos: lämpötilan esiintyvyys

Lahti Launeen havaintoaseman tasatuntihavaintojen perusteella laskettu lämpötilan esiintyvyys luokittain. Esimerkkinä: lämpötilaluokka '-33' kattaa ajan, jolloin lämpötila on ollut vähintään -33,0 astetta mutta alle -32,0 astetta. Havaintodata ajalta 20.6.1998–14.5.2019, yhteensä 181 968 havaintoa.

Prosenttia (kumulatiivinen)	Lämpötilaluokka	Tuntia	Tuntia (kumulatiivinen)
%	°C	h	h
0,004 %	-33	8	8
0,017 %	-32	23	31
0,037 %	-31	37	68
0,063 %	-30	46	114
0,097 %	-29	62	176
0,151 %	-28	99	275
0,219 %	-27	124	399
0,315 %	-26	175	574
0,430 %	-25	208	782
0,583 %	-24	279	1061
0,780 %	-23	359	1420
0,986 %	-22	375	1795
1,255 %	-21	489	2284
1,544 %	-20	525	2809
1,860 %	-19	576	3385
2,217 %	-18	650	4035
2,616 %	-17	725	4760
3,066 %	-16	820	5580
3,572 %	-15	919	6499
4,158 %	-14	1068	7567
4,796 %	-13	1161	8728
5,559 %	-12	1388	10116
6,478 %	-11	1671	11787
7,527 %	-10	1910	13697
8,712 %	-9	2156	15853
10,159 %	-8	2633	18486
12,001 %	-7	3352	21838
14,084 %	-6	3790	25628
16,375 %	-5	4170	29798
19,023 %	-4	4818	34616

22,095 %	-3	5589	40205
25,698 %	-2	6558	46763
30,099 %	-1	8008	54771
35,917 %	0	10587	65358
40,521 %	1	8377	73735
44,513 %	2	7264	80999
47,958 %	3	6269	87268
51,221 %	4	5937	93205
54,318 %	5	5636	98841
57,413 %	6	5633	104474
60,371 %	7	5381	109855
63,321 %	8	5369	115224
66,422 %	9	5642	120866
69,556 %	10	5704	126570
72,772 %	11	5851	132421
76,050 %	12	5966	138387
79,260 %	13	5841	144228
82,338 %	14	5600	149828
85,239 %	15	5280	155108
87,820 %	16	4696	159804
90,135 %	17	4212	164016
92,111 %	18	3597	167613
93,782 %	19	3041	170654
95,246 %	20	2664	173318
96,395 %	21	2090	175408
97,322 %	22	1686	177094
98,073 %	23	1368	178462
98,645 %	24	1040	179502
99,097 %	25	823	180325
99,454 %	26	649	180974
99,685 %	27	421	181395
99,838 %	28	279	181674
99,931 %	29	168	181842
99,971 %	30	74	181916
99,987 %	31	28	181944
99,995 %	32	15	181959
99,999 %	33	7	181966
100,0000 %	34	2	181968

TEHON JA ENERGIAN LASKENTATAULUKKO

t_d	1	h/24h		$T_{\text{poistoilma}}$	25	°C		$\phi_{\text{jäähdystarve}}$	13000	W				
t_v	1	vrk/7vrk		$T_{\text{sisäänpuhallusilma}}$	10	°C		$T_{\text{rajaus lämpötila}}$	10	°C				
ρ_i	1,2	kg/m ³		$\Delta T_{\text{puhallin}}$	0,5	°C								
c_{pi}	1000	J/(kgK)		$q_{v,tulo}$	0,45	m ³ /s								
η_a	0,8	-		$q_{v,poisto}$	0,45	m ³ /s								
Lämpötilaluokka				$T_{\text{pa-lau-tusilma}}$	$T_{\text{pa-lau-tusilma}}$						$\phi_{\text{jä-teilma-pois-toilma}}$			
T_u	Δt	ϕ_{lto}	T_{lto}	rajattu	θ_2	T_{lto}	ϕ_{lto}	Q_{iv}	Q_{iv}	Q_{lto}	$\phi_{\text{jäähd}}$	Q_{jk}		
(°C)	h	W	°C	°C	°C	°C	W	kWh	kWh	kWh	W	W	kWh	
-33	0,4	25056	13,4	-21,4	10,0	43	-18,0	8100	5,7	9	3	8100	4900	2
-32	1,1	24624	13,6	-20,6	10,0	42	-17,0	8100	15,8	25	9	8100	4900	5
-31	1,8	24192	13,8	-19,8	10,0	41	-16,0	8100	24,5	39	14	8100	4900	9
-30	2,2	23760	14,0	-19,0	10,0	40	-15,0	8100	29,3	47	18	8100	4900	11
-29	3,0	23328	14,2	-18,2	10,0	39	-14,0	8100	37,9	62	24	8100	4900	15
-28	4,8	22896	14,4	-17,4	10,0	38	-13,0	8100	57,9	97	39	8100	4900	23
-27	6,0	22464	14,6	-16,6	10,0	37	-12,0	8100	69,3	118	48	8100	4900	29
-26	8,4	22032	14,8	-15,8	10,0	36	-11,0	8100	93,3	161	68	8100	4900	41
-25	10,0	21600	15,0	-15,0	10,0	35	-10,0	8100	105,4	187	81	8100	4900	49
-24	13,4	21168	15,2	-14,2	10,0	34	-9,0	8100	134,2	243	109	8100	4900	66
-23	17,3	20736	15,4	-13,4	10,0	33	-8,0	8100	163,3	303	140	8100	4900	85
-22	18,1	20304	15,6	-12,6	10,0	32	-7,0	8100	160,8	307	146	8100	4900	88
-21	23,5	19872	15,8	-11,8	10,0	31	-6,0	8100	197,0	388	191	8100	4900	115
-20	25,3	19440	16,0	-11,0	10,0	30	-5,0	8100	197,9	403	205	8100	4900	124
-19	27,7	19008	16,2	-10,2	10,0	29	-4,0	8100	202,1	427	225	8100	4900	136
-18	31,3	18576	16,4	-9,4	10,0	28	-3,0	8100	211,2	465	253	8100	4900	153
-17	34,9	18144	16,6	-8,6	10,0	27	-2,0	8100	216,7	499	283	8100	4900	171
-16	39,5	17712	16,8	-7,8	10,0	26	-1,0	8100	223,8	544	320	8100	4900	193
-15	44,2	17280	17,0	-7,0	10,0	25	0,0	8100	227,0	585	358	8100	4900	217
-14	51,4	16848	17,2	-6,2	10,0	24	1,0	8100	236,0	652	416	8100	4900	252
-13	55,9	16416	17,4	-5,4	10,0	23	2,0	8100	226,4	679	453	8100	4900	274
-12	66,8	15984	17,6	-4,6	10,0	22	3,0	8100	234,5	776	541	8100	4900	327
-11	80,4	15552	17,8	-3,8	10,0	21	4,0	8100	238,9	890	652	8100	4900	394
-10	91,9	15120	18,0	-3,0	10,0	20	5,0	8100	223,4	968	745	8100	4900	451
-9	103,8	14688	18,2	-2,2	10,0	19	6,0	8100	196,2	1037	841	8100	4900	509
-8	126,8	14256	18,4	-1,4	10,0	18	7,0	8100	171,1	1198	1027	8100	4900	621
-7	161,4	13824	18,6	-0,6	10,0	17	8,0	8100	130,7	1438	1307	8100	4900	791
-6	182,5	13392	18,8	0,2	10,0	16	9,0	8100	49,3	1527	1478	8100	4900	894
-5	200,7	12960	19,0	1,0	10,0	15	10,0	8100	0,0	1572	1626	8100	4900	984

-4	231,9	12528	19,2	1,8	10,0	14	11,0	8100	0,0	1691	1879	8100	4900	1137
-3	269,1	12096	19,4	2,6	10,0	13	12,0	8100	0,0	1816	2179	8100	4900	1318
-2	315,7	11664	19,6	3,4	10,0	12	13,0	8100	0,0	1961	2557	8100	4900	1547
-1	385,5	11232	19,8	4,2	10,0	11	14,0	8100	0,0	2186	3123	8100	4900	1889
0	509,7	10800	20,0	5,0	10,0	10	15,0	8100	0,0	2615	4128	8100	4900	2497
1	403,3	10368	20,2	5,8	10,0	9	16,0	8100	0,0	1851	3266	8100	4900	1976
2	349,7	9936	20,4	6,6	10,0	8	17,0	8100	0,0	1416	2833	8100	4900	1713
3	301,8	9504	20,6	7,4	10,0	7	18,0	8100	0,0	1059	2445	8100	4900	1479
4	285,8	9072	20,8	8,2	10,0	6	19,0	8100	0,0	849	2315	8100	4900	1400
5	271,3	8640	21,0	9,0	10,0	5	20,0	8100	0,0	659	2198	8100	4900	1329
6	271,2	8208	21,2	9,8	10,0	4	21,0	8100	0,0	513	2197	8100	4900	1329
7	259,0	7776	21,4	10,6	10,6	4	21,4	7776	0,0	350	2014	7776	5224	1353
8	258,5	7344	21,6	11,4	11,4	3	21,6	7344	0,0	209	1898	7344	5656	1462
9	271,6	6912	21,8	12,2	12,2	3	21,8	6912	0,0	73	1877	6912	6088	1654
10	274,6	6480	22,0	13,0	13,0	3	22,0	6480	0,0	0	1779	6480	6520	1790
11	281,7	6048	22,2	13,8	13,8	3	22,2	6048	0,0	0	1704	6048	6952	1958
12	287,2	5616	22,4	14,6	14,6	3	22,4	5616	0,0	0	1613	5616	7384	2121
13	281,2	5184	22,6	15,4	15,4	2	22,6	5184	0,0	0	1458	5184	7816	2198
14	269,6	4752	22,8	16,2	16,2	2	22,8	4752	0,0	0	1281	4752	8248	2224
15	254,2	4320	23,0	17,0	17,0	2	23,0	4320	0,0	0	1098	4320	8680	2206
16	226,1	3888	23,2	17,8	17,8	2	23,2	3888	0,0	0	879	3888	9112	2060
17	202,8	3456	23,4	18,6	18,6	2	23,4	3456	0,0	0	701	3456	9544	1935
18	173,2	3024	23,6	19,4	19,4	1	23,6	3024	0,0	0	524	3024	9976	1727
19	146,4	2592	23,8	20,2	20,2	1	23,8	2592	0,0	0	379	2592	10408	1524
20	128,2	2160	24,0	21,0	21,0	1	24,0	2160	0,0	0	277	2160	10840	1390
21	100,6	1728	24,2	21,8	21,8	1	24,2	1728	0,0	0	174	1728	11272	1134
22	81,2	1296	24,4	22,6	22,6	1	24,4	1296	0,0	0	105	1296	11704	950
23	65,9	864	24,6	23,4	23,4	0	24,6	864	0,0	0	57	864	12136	799
24	50,1	432	24,8	24,2	24,2	0	24,8	432	0,0	0	22	432	12568	629
25	39,6	0	25,0	25,0	25,0	0	25,0	0	0,0	0	0	0	13000	515
26	31,2	0	26,0	25,0	25,0	-1	26,0	0	0,0	0	0	0	13000	406
27	20,3	0	27,0	25,0	25,0	-2	27,0	0	0,0	0	0	0	13000	263
28	13,4	0	28,0	25,0	25,0	-3	28,0	0	0,0	0	0	0	13000	175
29	8,1	0	29,0	25,0	25,0	-4	29,0	0	0,0	0	0	0	13000	105
30	3,6	0	30,0	25,0	25,0	-5	30,0	0	0,0	0	0	0	13000	46
31	1,3	0	31,0	25,0	25,0	-6	31,0	0	0,0	0	0	0	13000	18
32	0,7	0	32,0	25,0	25,0	-7	32,0	0	0,0	0	0	0	13000	9
33	0,3	0	33,0	25,0	25,0	-8	33,0	0	0,0	0	0	0	13000	4
34	0,1	0	34,0	25,0	25,0	-9	34,0	0	0,0	0	0	0	13000	1

Sinisellä pohjalla oleva Q_{iv} on vaihtoehdon A lämmitysenergian tarvelaskelma.

KANNATTAVUUSLASKELMAT

Takaisinmaksuaika + nykyarvo + sisäinen korkokanta			
h_s	Sähkön hinta	120	€/MWh
k	Tarkastelu-aika	15	a
r	Reaalikorko	3 %	
a'_n	Inflaation huomioon otettava diskonttaustekijä	11,94	-

Vaihtoehto A	Lämmitykseen käytetty sähkö	32,9	MWh/a	Vaihtoehto B	Lämmitykseen käytetty sähkö	4,1	MWh/a
Vaihtoehto A	Jäähdytykseen käytetty sähkö	43,7	MWh/a	Vaihtoehto B	Jäähdytykseen käytetty sähkö	21,2	MWh/a
Vaihtoehto A	Puhaltimien jne. sähkö	3,5	MWh/a	Vaihtoehto B	Puhaltimien jne. sähkö	7,2	MWh/a
Vaihtoehto A	Huoltokustannukset	600	€/a	Vaihtoehto B	Huoltokustannukset	1200	€/a
Vaihtoehto A	Talteenotettu energia	0	MWh/a	Vaihtoehto B	Talteenotettu energia	59	MWh/a
I	Investoinnit	25000	€	I	Investoinnit	60000	€
T	Tuotot	0	€/a	T	Tuotot	0	€/a
K	Kulut	10211	€/a	K	Kulut	5095	€/a
S	Jäännösarvo	0	€	S	Jäännösarvo	0	€
A	Vuotuinen nettotuotto	-10211	€/a	A	Vuotuinen nettotuotto	-5095	€/a
P	Nykyarvo (reaalikorko)	-146902	€	P	Nykyarvo (reaalikorko)	-120829	€

Vaihtoehto B, kun ajatellaan säästettynä A:sta (ei huomioida talteen otettua energiaa)		
A-B	Säästetty sähkö lämmityksessä	28,8 MWh/a
A-B	Säästetty sähkö jäähdytyksessä	22,5 MWh/a
A-B	IV-koneen lisäsähkö	-3,6 MWh/a
	Kokonaismuutos	47,632 MWh/a
	Kustannussäästö lämmityksessä	3458 €/a
	Kustannussäästö jäähdytyksessä	2695 €/a
	IV-koneen lisäsähkö	-436 €/a
	IV-koneen huoltokustannusten kasvu	-600 €/a
	Kokonaismuutos	5116 €/a

Tapaus B, kun ajatellaan vain säästettyä energiaa vuotuisena nettotuottona		
A	Vuotuinen nettotuotto	5116 €/a
I	Lisä-investoinnit	35000 €
S	Jäännösarvo	0 €
N	Takaisinmaksuaika	6,8 a
N	Korollinen takaisinmaksuaika (reaalikorko)	7,8 a
P'	Nykyarvo (reaalikorko)	26073 €
i_{sis}	Sisäinen korko	12 %

f (arvattu)	0,118
f (laskettu)	0,119
erotus	-0,001
i_{sis}	11,86 %

Sisäinen korkokanta laskenta

VERTAILU

A																		
Sähkön hinta	120 €/MWh	Aika, a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tarkeaikaa	15 a	Vuotuiset reaaliset energialkut, l/a	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611	3611
Reaalikorho	0,03	Vuotuiset reaaliset huollokulut ja muut kulut, l/a	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
		Yhteensä, l/a	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211	10211
Hankintahinta	25000	Dekontaustelttä reaalkorolla	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,64
Vuotuiset energialkut	3611 l/a	Kulujen nykyarvo, l	5914	5625	5345	5073	4806	4552	4303	4061	3826	3598	3377	3162	2953	2751	2554	2364
Vuotuiset huollokulut ja muut kulut	600 l/a	DCF	25000	34314	44533	53884	62356	71785	80317	88619	96880	104506	112105	119481	126643	133537	140348	146902
B																		
Sähkön hinta	120 €/MWh	Aika, a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tarkeaikaa	15 a	Vuotuiset reaaliset energialkut, l/a	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835	3835
Reaalikorho	0,03	Vuotuiset reaaliset huollokulut ja muut kulut, l/a	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
		Yhteensä, l/a	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035	5035
Hankintahinta	60000	Dekontaustelttä reaalkorolla	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,64
Vuotuiset energialkut	3835 l/a	Kulujen nykyarvo, l	4947	4803	4663	4527	4395	4267	4143	4022	3905	3791	3681	3574	3470	3369	3271	3176
Vuotuiset huollokulut ja muut kulut	1200 l/a	DCF	60000	64947	69150	74413	78940	83336	87603	91746	95766	99674	103465	107146	110720	114190	117553	120823
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vaihtoehto A			25000	34314	44533	53884	62356	71785	80317	88619	96880	104506	112105	119481	126643	133537	140348	146902
Vaihtoehto B			60000	64947	69150	74413	78940	83336	87603	91746	95766	99674	103465	107146	110720	114190	117553	120823

