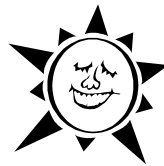


**Kari Sipilä, Miikka Kirjavainen, Jouko Ritola
& Harri Kivikoski**

Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät

Energiatalous ja tekninen toteutus



Kesäkeli-projekti



Liikenne- ja yleisten alueiden sulapitojärjestelmät

Energiatalous ja tekninen toteutus



Kesäkeli-projekti

Kari Sipilä & Miikka Kirjavainen

VTT Energia

Jouko Ritola & Harri Kivikoski

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5916-9 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5917-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1235-0605 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2001

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energiajärjestelmät,
Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT, puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem
Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT, tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT,
Finland, phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

VTT Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät,
Lämpömiehenkuja 2, PL 1800, 02044 VTT, puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 463 251

VTT Bygg och transport, Konstruktioner och husteknik,
Värmemansgränden 2, PB 1800, 02044 VTT, tel. växel (09) 4561, fax (09) 463 251

VTT Building and Transport, Structures and Building Services,
Lämpömiehenkuja 2, P.O.Box 1800, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 463 251

Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeliprojekti [Snow melting systems of traffic and common areas]. Espoo 2001. Espoo 2001. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2113. 75 s. + liitt. 15 s.

Avainsanat heating, smelting, snow, ice, energy economy, costs, calculations, slipperiness, streets, traffic area, pavements, shopping centres, road junctions, traffic safety, bus terminals, bridges, junctions

Tiivistelmä

Lämmityksen käyttö katu- ja liikennealueiden lumen poistossa sekä liukkaudentorjuntakeinona on yleistynyt erityisesti kaupunkikeskustojen kävelykatualueilla ja liikekeskusten piha- ja ulkoalueilla. Yhä useammin myös liikennealueita, mm. bussitermiinaaleja, pysäkkejä, liittymiä sekä siltoja ja rampeja, suunnitellaan lämmitettäväksi tavoitteena liukkaudentorjunta sekä jalankulkijoiden turvallisuus ja käyttömukavuus. Käyttökokemusten mukaan katualueita lämmitetään Suomessa n. 1 000 tuntia vuodessa.

Projektissa tutkittiin katu- ja liikennealueiden sulanapitojärjestelmien energiaratkaisuja ja -taloutta sekä rakenneratkaisuja ja teknistä toteutusta. Lämmitysjärjestelmän lämmönlähteitä voivat olla kaukolämpö, sähkö, lauhdelämpö, jätelämpö sekä maa-, kallio- tai vesistölämpö yhdistettynä lämpöpumppulaitokseen ja muut matalalämpöiset energialähteet. Tievalueen lämmittämistä liukkaudentorjuntakeinona vaihtoehtona suolaukselle ja luiskasuojauksille pohjavesialueella tutkittiin virtuaalipilotilla, jossa laskettiin nykyarvokustannukset useille lämmitysvaihtoehdoille sekä tiealueen suolaukselle ja luiskasuojauksille. Yhtenä lämmönlähteenä tutkittiin pohjavesilämpöä lämpöpumppulaitoksen avulla.

Rakenneratkaisuista tutkittiin mm. yhdeksän erilaista lämmitettyä katurakennetta, joille on tehty jännitystila- ja muodonmuutoslaskelmat, ja verrattiin eri rakenneratkaisujen toimivuutta. Samoja rakenneratkaisuja käytettiin mallinnettaessa katurakenteen lämpökäyttäytymistä ja tarvittavaa lämmitystehoa ja lämpöeristystä. Laskelmien perusteella lämmitetyssä katurakenteessa lämmöneristeellä ei ole kovin suurta merkitystä lämmitystehomitoitukseen eikä energiakulutukseen, koska vain pieni osa lämmitystehosta suuntautuu alaspäin. Katurakenteissa lämmitysteho 300 W/m^2 on useimmissa tapauksissa riittävä, mutta kadun reunakiven alueella tulee käyttää suurempaa lämmitystehoa. Betonisissa silta- ja kansirakenteissa toimiva lämmitys edellyttää $300\text{--}400 \text{ W/m}^2$ lämmitystehoa ja lisäksi vähintään 60 mm alapuolista lämmöneristystä, koska rakenteet jäähtyvät myös alapuolelta. Lumen sulatukseen tarvittava lämmitysteho on noin 300 W/m^2 , mikä riittää sulattamaan 30 mm/h uutta lunta ja pitämään tien pinnan sulana $-13 \text{ }^\circ\text{C}$:n ulkolämpötilaan saakka. Nestekiertoisen sulanapitolämmitysjärjestelmän mitoittamiseen kehitettiin laskentamalli, jolla on mahdollista mitoittaa lämmitysjärjestelmän putkitukset sekä laskea lämmitysjärjestelmän kustannukset. Lisäksi projektissa kuvattiin katulämmitysjärjestelmän ohjaus- ja säätöjärjestelmän toteutusta.

Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti [Snow melting systems of traffic and common areas]. Espoo 2001. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2113. 75 p. + app. 15 p.

Keywords heating, smelting, snow, ice, energy economy, costs, calculations, slipperiness, streets, traffic area, pavements, shopping centres, road junctions, traffic safety, bus terminals, bridges, junctions

Abstract

Snow smelting is used to prevent slipperiness in streets and traffic areas of towns especially in pedestrian streets and also in courtyards and outdoor recreation areas of shopping centres. Also traffic areas e.g. bus terminals, bus stops, road junctions, bridges and ramps are planned to be heated for slipperiness prevention as well to improve security and comfort of pedestrians. The total operating time of the outdoor street heating systems are about 1000 hours a year in Finland.

Energy choice and economy as well technical details of ice smelting systems in streets and traffic areas are investigated in this project. The ice smelting system can be heated by district heat, electricity, condensing heat, waste heat of processes and by low heat cells as ground, rock mass or lake water etc. connected to heat pumps. Heating of street areas was investigated in a virtual pilot as an alternative solution for salting the roads in ground water areas. The discounted value cost was calculated for several heating alternatives comparing to salting method including water protection on road sides. The ground water heat connected to a heat pump was investigated as one alternative among others.

Nine different street structures were investigated and compared by stress and deformation analyses. Calculations were done to evaluate thermal behaving, needed thermal effect and insulation under heating system. The insulation under the ice smelting system has not very important role for designed heat effect and thermal energy consumption. Thermal effect of 300 W/m^2 for ice smelting system of the road is used, but near the edge stone higher thermal effect is needed. Concrete structures of bridges and decks need thermal effect of $300\text{--}400 \text{ W/m}^2$ and at least 60 mm of insulation under the heated layer, because the bridge is cooled also underneath.

Thermal effect of 300 W/m^2 is enough to smelt snow rain of 30 mm/h and to keep the surface of the road snow free to outdoor temperature of $-13 \text{ }^\circ\text{C}$. For design of thermal snow free system with a liquid circulation was developed a calculation model, which can design the pipeline system and evaluated the investment and driving cost of heating system. Also alarm, control and regulation system of snow smelting system is described in the report.

Alkusanat

Piha- ja katualueiden sulanapitojärjestelmien teknistaloudellinen tutkimus toteutettiin LT-Konsultit OY:n, SITO-Konsultit Oy:n, VTT Energian, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan, LVI-Lindroos Oy:n ja Uponor Pexep Oy:n yhteistyönä. Tutkimus liittyy osana laajempaan Tekesin ja teollisuuden yhteisrahoitteiseen Kesäkeli-projektiin, jossa on tutkittu piha- ja katualueiden sulanapitojärjestelmien käyttömahdollisuuksia ja tuotestamista Suomen olosuhteissa. Kesäkeli-projektin vastuullisena organisaationa on toiminut LT-Konsultit Oy ja 1.8.2001 alkaen SITO-Konsultit Oy.

Kesäkeli-projektissa toteutettiin seuraavat kolme osatutkimusta: 1) Sulanapitojärjestelmien energia- ja rakenneratkaisut sekä talous, 2) Kyselytutkimus, taloudelliset arviot ja pilottikohteet, 3) Sulanapitojärjestelmien rakennuttamisohje. Osatutkimuksen 1) tulokset julkaistaan tässä raportissa. Osatutkimuksista 2) ja 3) on julkaistu erilliset raportit.

Tutkimusta ohjaavaan ja valvovaan johtoryhmään nimettiin edustaja kustakin rahoittaja-organisaatiosta. Johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Reijo Kangas, Teknologian kehittämiskeskus, Tekes
Kari Lehtonen, Tiehallinto, tie- ja liikennetekniikkayksikkö
Pekka Kontiala, Tiehallinto, Uudenmaan tiepiiri
Jyrki Meronen, Helsingin kaupunki/Rakennusvirasto
Veikko Hokkanen, Helsingin Energia
Markus Rönty, Espoon kaupunki/Tekninen keskus
Erkki Uusitalo, Espoon kaupunki/Tekninen keskus
Tauno Pirttimaa, Espoon Sähkö Oyj
Tuula Smolander, Jyväskylän kaupunki
Petri Flyktman, Jyväskylän Energia Oy
Reijo Lindroos, LVI-Lindroos Oy
Pekka Jalonen, Uponor Pexep Oy
Jyrki Paavilainen, LT-Konsultit Oy
Jouko Ritola, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Kari Sipilä, VTT Energia
Kimmo Anttalainen, SITO-Konsultit Oy, projektipäällikkö

Julkaisun laatimiseen ovat osallistuneet erikoistutkija Kari Sipilä ja tutkija Miikka Kirjavainen VTT Energiasta sekä erikoistutkija Jouko Ritola ja tutkija Harri Kivikoski VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Tutkimusjulkaisu on laadittu yhteistyössä seuraavien Kesäkeli-projektin tutkimusryhmän henkilöiden kanssa: Kimmo Anttalainen, SITO-Konsultit Oy, Jyrki Paavilainen, LT-Konsultit Oy, Reijo Lindroos, LVI-Lindroos Oy ja Pekka Jalonen, Uponor Pexep Oy.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	8
1.1 Yleistä.....	8
1.2 Lämmityskohteita.....	8
1.3 Katulämmityksen hyödyt ja haitat.....	9
2. Katulämmityksen rakennerratkaisut ja tekninen toteutus.....	11
2.1 Katulämmityksen mitoituserusteet.....	11
2.2 Rakennerratkaisut ja tekninen toteutus.....	12
2.2.1 Rakennerratkaisut.....	12
2.2.2 Katulämmitysjärjestelmän tekninen toteutus.....	13
3. Lämmitysjärjestelmät.....	17
3.1 Kaukolämmitys.....	17
3.1.1 CHP-tuotanto.....	17
3.1.2 Paluulämpötilan vaikutus CHP-tuotantoon.....	18
3.2 Kylmäkoneiden lauhdelämpö.....	22
3.3 Sähkölämmitys.....	26
3.3.1 Kaapelilämmitys.....	26
3.3.2 Vakiovastuskaapeli.....	26
3.3.3 Vakiotehokaapeli.....	27
3.3.4 Vakiolämpötilakaapeli.....	27
3.3.5 Grafiittilämmitys.....	28
3.4 Maa- ja pohjavesilämmitys.....	29
3.4.1 Maa- ja kallioperää hyödyntävät energiaratkaisut.....	29
3.4.2 Pohjavesilämpöä hyödyntävät energiaratkaisut.....	30
4. Esimerkkitarjotukset.....	32
4.1 Vesikiertolämmitys.....	32
4.2 Vakiovastuskaapeli.....	33
4.3 Vakiolämpötilakaapeli.....	34
4.4 Grafiittilämmitys.....	34
4.5 Tielueen lämmitystapatarjotus.....	35
4.5.1 Yleistä.....	35
4.5.2 Lämmitystapatarjotus.....	36
4.5.3 Tielämmitysjärjestelmän investointikustannukset.....	39

4.5.4	Tielämmityksen kokonaiskustannukset	40
4.5.5	Tielämmityksen lämmitystapavertailu.....	41
4.6	Piha- ja katualueiden rakentamiskustannuksia.....	42
5.	Katulämmityksen mitoitus	45
5.1	Lumen sulatus pinnalta.....	45
5.2	Katulämmityksen lämmitystehomitoitus.....	48
5.2.1	Lämmönsiirtokertoimet	49
5.2.2	Lämpötila- ja materiaalitiedot.....	49
5.2.3	Lämmitysteholaskenta ilman lumensulatusta	50
5.3	Nestekiertoisen lämmönjakojärjestelmän mitoitus	55
5.4	Laskentamallin kuvaus	60
5.4.1	Yleistä	60
5.4.2	Lämmöntarpeen laskenta	60
5.4.3	Putkiston mitoitus	61
5.4.4	Laskentaesimerkkejä.....	63
6.	Lumen sulatuksen säätö- ja valvontajärjestelmä.....	67
6.1	Säätö- ja valvontajärjestelmän toteutus.....	67
6.2	Säätöjärjestelmän kehitys	70
7.	Yhteenveto	72
	Lähdeluettelo	75
Liitteet		
	Liite A: Lämmitettävien katurakenteiden jännitystilalaskelmat	
	Liite B: Lämmitettyjen katurakenteiden jännitystilalaskelmat	
	Liite C: Jyväskylän vapaudenkatu – katurakenteen jännitystilalaskelmat	

1. Johdanto

1.1 Yleistä

Elintason kasvun ja liikkumisen lisääntymisen sekä väestön ikääntymisen myötä ulkoalueiden laatuvaatimukset ovat kasvaneet etenkin pinnoitteiden laadun ja kunnan sekä yleensä kunnossapidon suhteen.

Katujen ja pihojen kunnossapito talvella edellyttää asianmukaista kalustoa ja henkilöresursseja niiden käyttöön. Kaupunkien keskusta-alueilla lumen poistosta ja kuljetuksesta sekä hiekoituksesta aiheutuu suuret vuotuiset kustannukset. Liukkauden torjuntaan käytetty hiekka joudutaan myös keväällä nopeasti poistamaan pölyhaittojen takia. Liukkauden torjuntaa suolalla on pyritty vähentämään ympäristöhaittojen takia.

Lumen poistoa talvella katuja lämmittämällä on kokeiltu ensimmäisenä Jyväskylän keskustan kävelykadulla (5 000 m²) ja Helsingissä Etelä-Esplanadin jalkakäytävällä (4 300 m²). Lämmittäminen perustuu kaukolämmön paluukierrosta saatavaan energiaan, jolla lumi ja jää sulatetaan katualueelta. Kokemukset ovat olleet hyviä, ja niinpä Jyväskylässä ja Helsingissä suunnitellaan katulämmityksen laajentamista. Jyväskylässä Vapaudenkatu ja Helsingissä Aleksanterinkatu varustetaan katulämmitysjärjestelmällä. Portaiden ja ajoluiskien sulatusta esim. sähkölämmityksellä on Suomessa tehty jo vuosikymmeniä.

Katujen lumen sulatusjärjestelmiä käytetään laajasti myös muualla, mm. muissa Pohjoismaissa, USA:ssa ja Kanadassa sekä Japanissa, jossa on jo useiden vuosikymmenien kokemus lumen sulatusjärjestelmistä. Esimerkiksi Sapporossa vanhimmat sähkölämmitteiset katulämmitysjärjestelmät ovat olleet käytössä jo yli 40 vuotta (kuvat 1 ja 2).

1.2 Lämmityskohteita

Lämmityksen käyttö katu- ja liikennealueiden lumen poistossa sekä liukkaudentorjuntakeinona on yleistymässä erityisesti kaupunkikeskustojen kävelykatualueilla ja myös liikekeskusten piha- ja ulkoalueilla. Yhä useammin myös liikennealueita, mm. bussterminaaleja, pysäkkejä, liittymiä sekä siltoja ja rampeja, suunnitellaan lämmitettäväksi tavoitteena liukkaudentorjunta sekä jalankulkijoiden turvallisuus ja käyttömukavuus. Lämmitys toteutetaan pääsääntöisesti kaukolämmön paluukierrolla tai sähkölämmityksellä. Myös jäte- ja lauhdelämpöä hyödynnetään silloin kun sitä on saatavilla. Maa- ja kallioperästä sekä pohjavedestä tai vesistöistä saatavaa lämpöenergiaa on mahdollista myös hyödyntää erilaisten ulkoalueiden lämmityksessä silloin kun paikalliset olosuhteet antavat siihen mahdollisuuden.

Lämmitettävät piha- ja liikennealueet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin, joilla on hie-
man vaihtelevat mitoituskohdat esimerkiksi kantavuus- ja lämmitystehomitoituk-
sen osalta:

- kiinteistöjen piha- ja lähialueet, liikekiinteistöjen ulkoalueet
- katu- ja tieliikennealueet
- molemmilta puolilta jäätyvät kansirakenteet.

Lämmitysjärjestelmän valinta riippuu käytettävissä olevista energialähteistä sekä ra-
kenteellisista rajoituksista. Lämmönlähteitä voivat olla kaukolämpö, sähkö, lauhdeläm-
pö, jätelämpö sekä maa-, kallio- tai vesistölämpö yhdistettynä lämpöpumppulaitokseen.

1.3 Katulämmityksen hyödyt ja haitat

Kävelykatualueiden lämmityksellä saavutetaan mm. seuraavia hyötyjä, mutta niihin
liittyy myös joitakin haittoja:

Hyödyt

- kadun talvikunnossapito helpottuu, ei lunta eikä lumen aurausta tal-
vella eikä hiekanpoistoa keväällä
- liukkaudentorjunta helpottuu, ei hiekoitusta tai suolaa
- hiekka ja suola eivät kulkeudu kiinteistöihin, jolloin kiinteistöjen
kunnossapitokustannukset alenevat
- jalankulkijoiden liukastumis- ja tapaturmariskit vähenevät
- kadun käyttömukavuus ja miellyttävyys jalankulkijalle paranevat
- lämmitettyjen katualueiden liikekiinteistöt hyötyvät katulämmityk-
sestä myös asiakas- ja liiketoiminnassaan.

Haitat

- mahdollinen lumi ja sohjo, jos lunta tulee kerralla paljon
- mahdolliset vuodot ja käyttöhäiriöt epämiellyttäviä kadun käyttäjälle
- mahdollinen sulamisveden lammikoituminen ja jalkojen kastuminen
pakkasella
- liukastumis- ja kaatumisriskit vaihtumisvyöhykkeellä siirryttäessä
lämmitetyltä katualueelta lämmittämättömälle jäätyneelle alueelle
- kadun aukaisu ja käyttö esim. kaapeli- ja putkilinjavetoihin ja kor-
jauksiin vaikeutuu.



Kuva 1. Katulämmitys on tehokas liukkaudentorjuntamenetelmä, kuva Sapporosta.



Kuva 2. Lämmitetty jalkakäytävä, jossa lämmittämättömän suojatien kohdalle on asennettu liukastumista estävä laatoitus, kuva Sapporosta.

2. Katulämmityksen rakennerratkaisut ja tekninen toteutus

2.1 Katulämmityksen mitoitusperusteet

Katulämmitys suunnitellaan sillä periaatteella, että kadun pintalämpötila pysyy noin $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa ja tarvittava glykoli/vesiseoksen menolämpötila on $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, max $+39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tämä mahdollistaa hyvin erilaisten lämmönlähteiden, kuten kaukolämmön paluuveden eri prosessien jätelämmön, maalämpöpumpun, lauhdellämmön ym. ns. matalaenergiälähteen käytön järjestelmän lämmönlähteenä. Kadun pintalämpötila saavutetaan, kun n. 150–200 mm kadunpinnan alapuolella kulkevien putkistojen pintalämpötila on n. $+35\text{--}39\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Lindroos 2000). Lumen sulatukseen tarvittava lämmitysteho on n. 300 W/m^2 , ks. tarkemmin luku 5.1.

Energialähteenä voidaan käyttää suoraa sähköä (kaapelit) tai varaavaa järjestelmää. Suoran sähkölämmityksen käyttö on todettu epätaloudelliseksi ja usein kiinteistöjen sähköliittymistä ei saada sähkötehoa riittämään katulämmitykseen, esim. 300 m^2 :n lämmitys vaatii n. 90 kW :n tehon (Lindroos 2000).

Yli 300 m^2 :n suuruisen katulämmitysjärjestelmän järkevä toteutusvaihtoehto on rakentaa putkisto kadun alle ja käyttää lämmön siirto-aineena vesi-glykoliseosta. Käytettävän glykolin tulee olla propyleeniglykolia (myrkytön) tai vaihtoehtoisesti tulee käyttää Kemira Chemicals Oy:n Freezium-nestettä. Käytettävän lämmönsiirtonesteen hinta kannattaa aina vertailla, koska järjestelmien täyttömäärät ovat aina suuria n. $2,5\text{ dm}^3/\text{m}^2$. Esimerkiksi Jyväskylän järjestelmän nestetilavuus on n. 12 m^3 (Lindroos 2000).

Energialähteenä voidaan käyttää kaukolämmön paluuvettä, eri prosessien ja jäähdytyslaitteiden lauhdellämpöä, maalämpöä tai merivedestä pumpattua lämpöä. Merivedestä lämpöpumpulla otettua lämpöä on tutkittu esim. Hangon kaupungin kävelykadun lämmityksen energialähteenä. Lämmitysjärjestelmää ei ole vielä toteutettu (Lindroos 2000).

Jos katualue päätetään varustaa katulämmityksellä, on ehdottoman tärkeää kartoittaa alueelle jäävien putkistojen sekä kaapeleiden kunto ja uusimistarve, jotta vältyttäisiin kadun aukaisulta ja korjauksilta. Tulee myös harkita ylimääräisten kaapeliputkien asentamista tulevia tarpeita varten.

Lämmitysjärjestelmä toteutetaan yleisimmin kadun pintarakenteeseen päällystekerroksen alapuolelle joko nestekiertoisella lämmitysputkistolla tai sähkölämmityskaapeleilla. Tällöin kadun rakennerratkaisut tulee suunnitella ja toteuttaa siten, etteivät lämmitysputkistot tai lämmityskaapelit vaurioidu esimerkiksi liikenteestä aiheutuvien kuormien tai katurakenteen muodonmuutosten seurauksena. Toisaalta tulee varmistaa, ettei katura-

kenteen tekninen toiminta, mm. päällystekerroksen kantavuus, heikkene lämmitysjärjestelmän asennuksen ja lämmityksen seurauksena. Tämä voi tulla kysymykseen esimerkiksi asfalttipäällysteisissä katurakenteissa ja sellaisissa rakenteissa, joissa käytetään asennushiekkakerrosta päällysrakenteen alla. Mahdollisimman suuren pintalämmitystehon saavuttamiseksi lämmitysputkisto tai lämmityskaapelit tulisi sijoittaa heti päällystekerroksen alapuolelle. Tällöin voi syntyä ongelmia päällysteen kantavuuden ja muodonmuutosten kanssa.

Ajoneuvojen, nostureiden yms. paino aiheuttaa jalkakäytävän ja ajoradan pintaan kuormituksen, joka vaikuttaa myös lähellä pintaa olevaan lämmitysputkistoon. Kun päällysrakenne on jäykkä, putkistoon aiheutuu pieniä muodonmuutoksia mutta suuria jännityksiä. Kun päällysrakenne on taipuisa, putkistoon aiheutuu suuria muodonmuutoksia mutta pienempiä jännityksiä (ks. jännitystilalaskelmat, liitteet A, B ja C).

2.2 Rakenneratkaisut ja tekninen toteutus

2.2.1 Rakenneratkaisut

Taulukossa 1 on esitetty yhteensä 9 erilaista lämmitettyä katurakennetta, joille on tehty jännitystila- ja muodonmuutoslaskelmat ja verrattu eri rakenneratkaisujen toimivuutta lämmitettyinä katurakenteina. Rakenteet ovat kevyen liikenteen väyliä, mutta niitä voivat kuormittaa satunnaiset ajoneuvo- ja nosturikuormat. Tästä syystä kuormitukset on laskettu raskaille erikoiskuormille. Laskelmat on tehty LT-Konsultit Oy:ssä LVI-Lindroos Oy:n toimeksiannosta, ja laskentojen tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteissä A, B ja C.

Taulukko 1. Katulämmityksen rakennetyyppejä.

kerrosmateriaali	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	kerroksen paksuus (mm)								
betonikivi	80	80	80	80	-	-	-	-	-
asfalttibetoni	-	-	-	-	50	50	50	50	50
asennushiekka	80	-	80	-	80	80	-	-	-
maabetoni	-	80	-	80	-	-	80	100	100
lämpöeriste	-	-	50	50	-	50	-	-	50
asfalttibetoni	50	50	-	-	50	-	50	50	-
murske	150	150	150	150	150	150	150	150	150
s sora	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>	<u>600</u>

Taulukossa 1 esitetyistä rakennetyypeistä tyyppi 1 on toteutettu Jyväskylän kävelykeskustaan, tyyppi 4 Pohjois-Esplanadille ja suunniteltu Kluuviin. Rakennetyyppi 5 on suunniteltu pilottikohteeksi Jyväskylän paikallisterminaaliin. Liitteessä C on tarkasteltu lähemmin rakennetyypin 5 eli asfalttibetonipäällysteen ja lämmitetyn katurakenteen käyttäytymistä raskaan ajoneuvoliikenteen alaisessa bussiterminaalissa.

Samoja rakenneratkaisuja, mm. rakennetyyppejä 4 on käytetty mallinnettaessa katurakenteen lämpötekniistä käyttäytymistä ja tarvittavaa lämpötehomitoitusta. Katurakenteen lämmitysteholaskelmat esitetään luvussa 5.2. Laskelmissa on tarkasteltu mm. lämmityspotkiston tai -kaapelien alle sijoitettavan lämpöeristeen vaikutusta lämmitystehon mitoituksessa katu- ja siltarakenteisiin. Laskelmien perusteella lämmitetyssä katurakenteessa lämmöneristeellä ei ole kovin suurta merkitystä lämmitystehon mitoitukseen eikä energian kulutukseen, koska lämmitystehosta vain pieni osa suuntautuu alaspäin. Lämmitetyissä silta- ja kansirakenteissa, joissa rakenne jäähtyy myös alapuolelta, on järkevää käyttää myös lämmöneristettä lämmityskerroksen alapuolella.

2.2.2 Katulämmitysjärjestelmän tekninen toteutus

Katulämmitysjärjestelmän tekninen toteutus kuvataan yksityiskohtaisesti Katu 2000 -julkaisussa osassa Katulämmitys/lumen sulatus. Seuraavassa kuvataan katulämmityksen teknisen toteutuksen pääkohdat em. tarkastelun mukaisesti (Lindroos 2000).

Katulämmitysjärjestelmään kuuluvat yleensä seuraavat osat;

- pintaputkisto
- jakoputket, säätö-/sulkuventtiileineen
- runkoputket
- lämmönjakokeskus, vaihtimet, pumput, paisunta-/paineenpitojärjestelmä, säätöjärjestelmä.

Putkistot

Lämmitettävä alue jaetaan jakoputkialueisiin, jotka liitetään runkoputkilla lämmönjakokeskukseen. Kukin alue muodostaa ryhmänsä, jolla on erikseen meno- ja paluupuolen jakoputki sekä tarvittava sulku- ja säätöventtiilit vesimäärien mittausta varten. Kaikista jakoputkista lähtevät pintaputkistolenkit kahteen suuntaan. Pintaputkisto jaetaan ryhmiin siten, että yhdessä ryhmässä on aina kolme kiertolenkkiä. Kolmen kiertolenkin putket leikkaavat toisensa aina lenkin käänkökohdassa. Tällä tavalla jaotellut putkilenkit antavat tasaisen lämpöjakauman alueelle, koska meno- ja paluujohto ovat aina rinnakkain ja jokainen lenkeistä on kiertänyt saman matkan.

Kaikki yhdestä jakoputkesta lähtevät pintaputkilenkit ovat saman pituisia. Näin saadaan lämmönjako optimaaliseksi ilman kuristusventtiileitä. Vesivirtojen tasapainotus tehdään huomioon ottaen painehäviöt piireissä, jakotukissa ja syöttöputkissa. Lämmitystehon mitoitusravona käytetään 300 W/m² ja liuoksen jäähtymänä verkostossa 15 °C:ta.

Pintaputkiston ja jakoputkien jaottelun tarkoituksena on varmistaa, että:

- lämpötila jakautuu tasaisesti alueella
- putkilenkkien pituudet eivät tule tavattoman pitkiksi, mikä taas vaatisi suuria pumppuja ja pumppaustehoja
- huolto-, korjaus- ym. toimenpiteet onnistuvat helposti.

Kun putkilenkit ovat kolmen ryhmissä, voidaan putkiryhmä kerrallaan (leveys n. 1,2–1,5 m) nostaa sivuun mahdollisten korjaustöiden ajaksi. Putkirikon sattuessa voidaan vuotokohta paikallistaa ja periaatteessa vaihtaa koko lenkki, eikä tarvitse kaivaa putkia esiin kuin kapealta alueelta. Tämä kaikki voidaan toteuttaa ilman, että tarvitsee sulkea koko lämmitettävää aluetta, muut jakoputkialueet voivat toimia normaalisti korjaustyön ajan. Kadun lämmitysjärjestelmä voidaan toteuttaa vaiheittain rakentaen, esim. jakoputkialueittain.

Pintaputket

Putkimateriaalina putkilenkeissä käytetään ristosilloitettua muoviputkea, esim. PEXEP PE-Xa -putkea, joka on valmistettu korkeamolekyylipainoisesta HD-polyeteenistä. PE-Xa -putkea voidaan asentaa järjestelmään, joka suurin jatkuva käyttöpaine on 6 baaria käyttölämpötilan ollessa 70 °C. Katulämmityksessä käytetyllä suurimmalla nesteen lämpötilalla (+35 °C, max +39 °C) voidaan putkien painetta nostaa suuremmaksikin.

Katulämmitysverkostossa käytettävä putkikoko on 25 x 2,3 mm (tai 20 x 20), putkien ulkohalkaisija x seinämäpaksuus. Käytettävä putkimateriaali ei estä hapen imeytymistä putken seinämän lävitse, koska se on normaalia ristosilloitettua (HDPE) PEX-putkea. Hapen imeytyminen kontrolloidaan putkissa virtaan inhibiitin avulla, joka niin sanotusti ”syö” hapen järjestelmästä.

Pintaputket asennetaan pääosiltaan pintarakennelaattojen alle tehtävään salaojahiekka- ja/tai maabetonikerrokseen (K10).

Jakoputket

Jakoputket tehdään haponkestävästä teräksestä DN 100 (114 x 3,6), ja niihin hitsataan DN 25 -sisäkierremuhvit putkilenkkien lähtöjä ja tuloja varten. Muhvien materiaali on myös haponkestävää terästä.

Jakoputket pintakäsitellään epoksimassalla kahteen kertaan ennen paikoilleen asentamista. Epoksipiki antaa varmuussuojaa korroosiota vastaan. Jakoputkikokonaisuuteen kuuluu myös sulk- ja säätöventtiilit. Jakoputkiin kuuluvat myös liittimet, joilla putki- lenkit liitetään jakoputkiin. Messinkiset liittimet korroosiosuojataan, koska ne ovat kosketuksissa veden ja muiden maasta erkanevien yhdisteiden kanssa.

Runkoputket

Runkoputket kulkevat jalkakäytävän alla noin 800–1 200 mm kadunpinnan (jalkakäytävän) alapuolella.

Runkoputket tehdään eristämättömistä muoviputkista, PE-HD -putki tai vastaava, paineluokka DN 10 bar/20 °C (otettava huomioon paineluokan aleneminen lämpötilan funktiona siten, että min. paineluokka +40°:ssa on 40 % ilmoitetusta paineluokasta). Jyväskylässä ja Helsingissä (Pohjois-Esplanadi - Kluuvikatu) runkoputket on tehty yksiputkisista kaukolämpöputkielementeistä (Lindroos 2000).

Lämpökeskukset

Katulämmityksen vaihdin kytketään kaukolämpöverkoston paluujohtoon siten, että ensisijaisesti jäähdytetään energialaitokselle palaavaa kaukolämpövettä.

Paluueden saanti pääverkostosta varmistetaan pumpulla. Järjestelmään on kuitenkin otettava kaukolämmön tulojohdosta syöttöjohto sellaisia tilanteita varten, missä kiinteistön kaukolämmön paluueden vesivirta tai lämpö ei ole riittävä katulämmityksen tehon tarpeeseen. Katulämmityksen kuluttama energia mitataan erillismittauksella.

Katulämmitysverkoston täyttö- ja paisuntajärjestelmä toteutetaan useimmiten nk. pumppupaisuntajärjestelmällä, jolla verkoston paine pidetään n. 5–5,5 bar:n paineisena tai 3,0–3,5 bar, verkostopaine valitaan sijoituspaikan liikennekuormituksen mukaan.

Katulämmityksen lämmönsiirtonesteinä käytetään Kemira Chemicals Oy:n Freezium-nestettä tai propyleeniglykolipohjaista nesteseosta.

Propyleeniglykoli on tuoteselosteen mukaan ympäristölleen vaaraton jäädytinneste. Se soveltuu näin ollen mainiosti katulämmitykseen. Katulämmitysjärjestelmässä kiertää 40 prosenttinen seos, jonka pakkasen kestävyys on noin -30 °C.

Propyleeniglykolin ohella katulämmityspotkistossa kiertää inhibointiaine, joka estää korroosion järjestelmässä ja suojaa metallipinnat ohuella passivointikalvolla. Inhibiitti pitää myös pH-arvon korroosion estämisen kannalta optimitasolla (pH 7).

Kaivot

Jakoputkien haaroitus- ja sulkuventtiileiden kohdalle asennetaan elementtirakenteiset teräsbetoniaivot valurautakansineen.

Kaivojen kaivu- ja asennustyöt ja kansien asennustyöt korotusrenkaineen (vesitiiviisti) suorittaa katurakennusurakoitsija. Runkoputkistolävistyksen kuten myös jakoputkireiät tekee kaivoihin kaivojen toimittaja. Putkistolävistyksen tiivistää putken asentanut urakoitsija ja vastaa sen vesitiivyydestä.

Jakoputkille varataan kaivoseinämiin suorakaiteen muotoiset asennusaukot, jotka täytetään jälkivaluna putkistoasennusten jälkeen.

Tuloputkistoille varataan kaivoseinään pyöreät aukot, joista putket asennetaan, ja runkoputkiurakoitsija huolehtii välin tukkimisesta vesitiiviisti.

3. Lämmitysjärjestelmät

3.1 Kaukolämmitys

Kaukolämpöveden lämpötila on kesällä 80 °C ja kohoaa talvella 115 °C:seen. Paluuveden lämpötila vaihtelee 40–60 °C. Paluulämpötilainen vesi on usein sopivaa piha- ja katualueiden lämmittämiseen (maks. 39 °C). Menovedestä voidaan ottaa tarvittaessa lisätehoa, jos paluulämpötila ei riitä kovemmissa pakkasilla. Kaukolämmityksen kanssa käytetään aina lämmönsiirrintä, jolloin piha- tai katulämmityslenkki edustaa järjestelmän toisiopuolta. Jos piha- tai luiska-alueita lämmitetään rakennuksen lämmitysjärjestelmästä palaavalla vedellä, voidaan se tehdä suoralla kytkennällä. Silloin sulatusjärjestelmän toimivuus kannattanee kuitenkin varmistaa myös talon patteripiiriin syöttävän puolen kytkennällä.

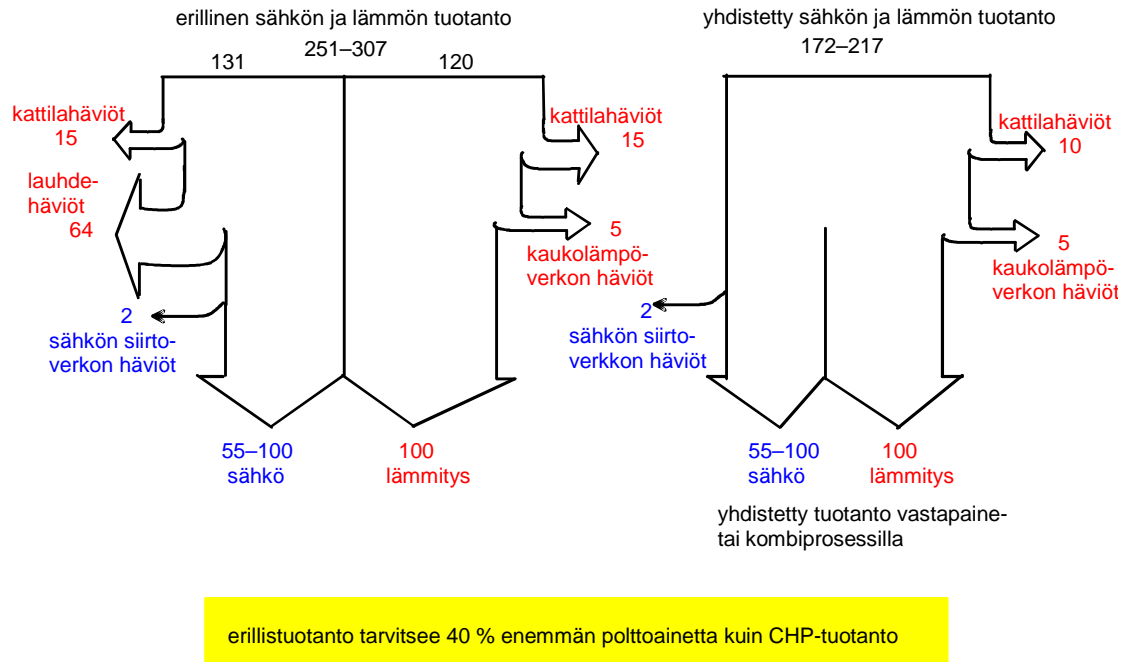
3.1.1 CHP-tuotanto

Suomessa kaukolämpöenergiasta 3/4 tuotetaan yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (CHP), mutta lukumääräisesti pelkkää lämpöä tuottavia kattiloita on enemmän.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla tarkoitetaan sähkön ja lämmön yhtäaikaista tuotantoa eikä esim. sellaista tuotantoa, jossa tuotetaan kuumaa vettä tai höyryä sähkön tuotannosta riippumatta.

Vastapainelaitoksessa kaukolämpö tuotetaan vastapaineturpiinin höyryllä, joka otetaan turpiinin alimmasta paineesta. Lisäksi on yleensä vähintään yksi väliotto turpiinista kaukolämpöveden lämpötilan korottamiseksi. Kattilahöyryä voidaan käyttää myös suoraan paineenalennusventtiilin kautta erillisessä lämmönsiirtimessä kaukolämmön tuottamiseen. Paineenalennusventtiilivaihtoehtoa käytetään joissakin tilanteissa kaukolämpöveden lämpötilan nostamiseen, kattilan alajossa ja jos turpiiniin ei voida jostain syystä ajaa koko tuotettua höyrymäärää. Kaukolämmön menoveden vuotuinen keskilämpötila on n. 80 °C, joka saadaan toisen lämmönsiirtimen jälkeen. Välioton lämmönsiirtimellä voidaan lämpötila nostaa 115 °C:seen. Sähkön priimaamiseen käytetään lämpövarastoa, apulauhdutinta tai kaukolämpöverkon apujäähdytintä. Hiilivastapainelaitoksen sähkön/lämmön tuottosuhte eli rakennusaste on noin 0,45–0,55 ja maakaasukombilaitoksella (kaasuturpiini- ja höyryturpiiniprosessin yhdistelmä) noin 1,0. CHP-tuotannon kokonaisyötösuhde on 85–90 % polttoaine-energiasta laskettuna. CHP-tuotannolla säästetään noin 40 % polttoainetta verrattuna vastaavaan määrään erillistuotannolla (lauhdesähkö + lämmityskattila) tuotettua energiaa, kuten kuvassa 3 esitetään.

1 000 MW kaasukäyttöinen CHP-laitos pienentää kasvihuonekaasupäästöjä noin 1 milj. tonnia vuodessa verrattuna vastaavaan erillistuotantoon hiilellä ja noin 0,5 milj. tonnia verrattuna erillistuotantoon kaasulla.



Kuva 3. Samaa hyötyenergiaa kohden sähkön ja lämmön erillistuotanto kuluttaa 40 % enemmän polttoainetta kuin yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto.

3.1.2 Paluulämpötilan vaikutus CHP-tuotantoon

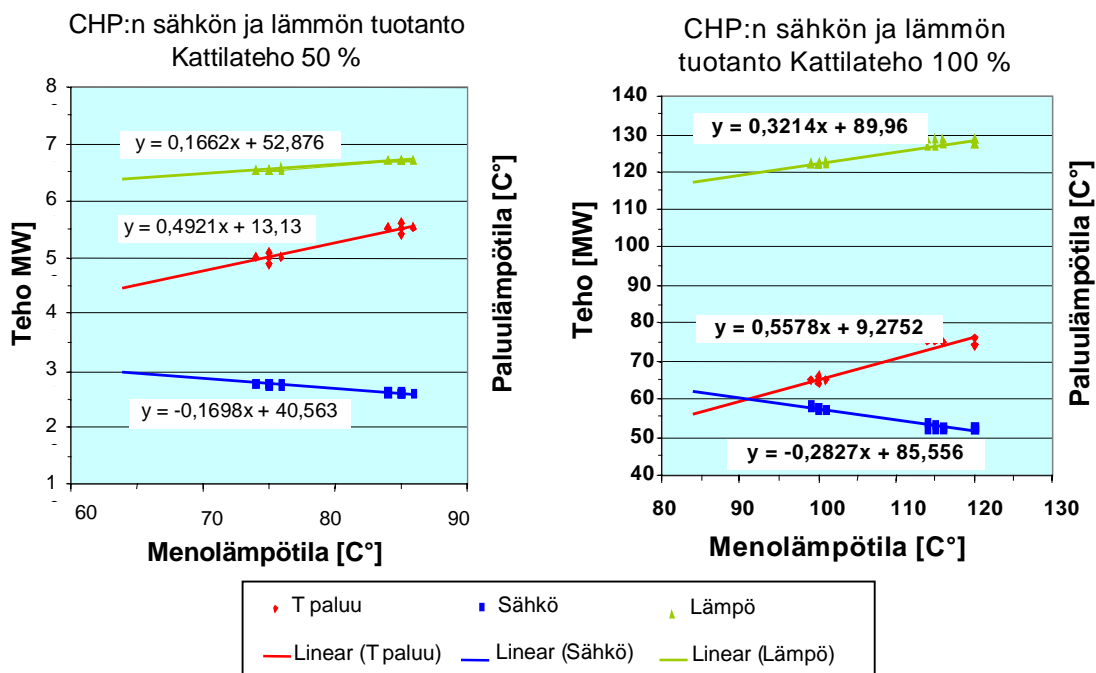
CHP-tuotannossa kaukolämmön ja sähkön tuotanto on sidottu rakennusasteella. Rakennusaste muuttuu kaukolämpöveden lämpötilan mukaan. Kaukolämpöveden menolämpötilan muutos vaikuttaa enemmän sähkön saantoon kuin paluulämpötilan muutos.

Yleensä menoveden lämpötilan nosto kohottaa myös paluueden lämpötilaa, koska kuluttajien lämpötehon tarpeen kasvaessa säädetään myös kaukolämpöveden virtausta suuremmaksi. Kuvassa 4 esitetään erään CHP-laitoksen sähkö- ja kaukolämpöteho sekä kaukolämpöveden paluulämpötila menoveden lämpötilan mukaan. Kaukolämmön menoveden 1 °C:n lämpötilan muutos 100 %:n kattilakuormituksella muuttaa sähkötehoa 0,28 MW, lämpötehoa 0,32 MW sekä paluulämpötilaa 0,56 °C. Kattilakuormituksen oletetaan pysyvän vakiona. Vastaavasti 50 %:n kattilakuormituksella kaukolämmön menoveden 1 °C:n muutos vaikuttaa sähkötehoon 0,17 MW, lämpötehoon 0,17 MW ja paluulämpötilaan 0,49 °C.

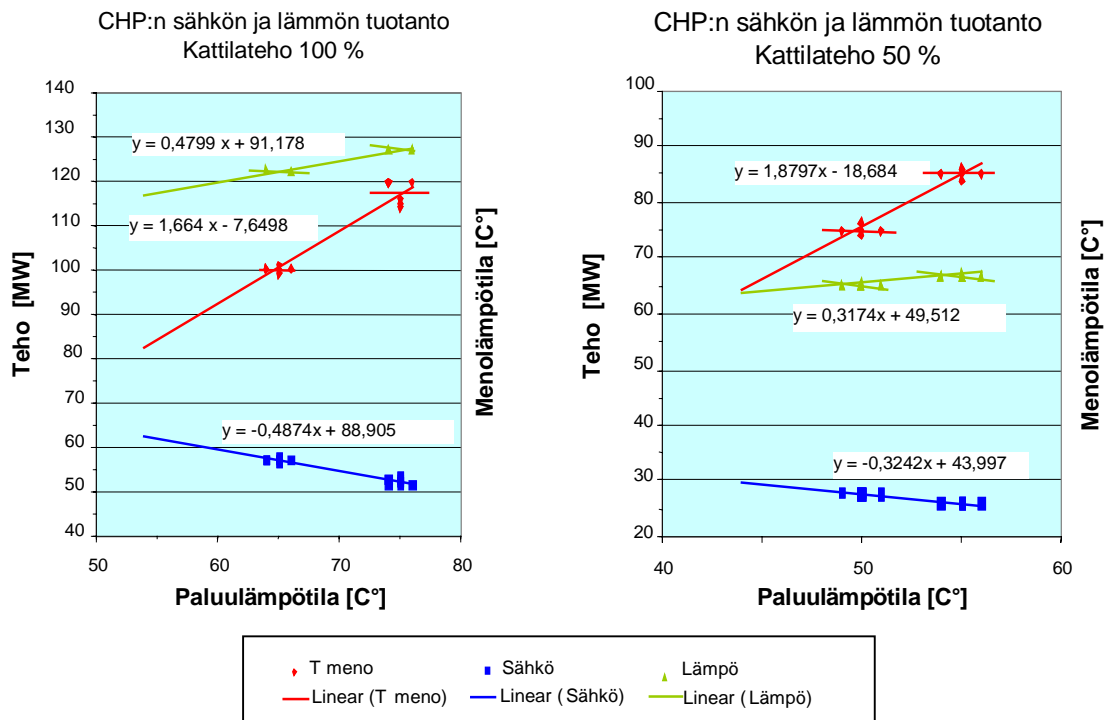
Kuvassa 5 esitetään kaukolämpöveden paluulämpötilan vaikutus CHP-laitoksen tuotantoon 100 %:n ja 50 %:n kattilakuormituksella. Täydellä kattilakuormalla sähkötehon muutos on 0,49 MW, lämpötehon 0,49 MW ja menoveden lämpötilan muutos 1,66 °C

yhtä paluulämpötilan astetta kohden. Kattilateho pysyy muutoksessa vakiona. Kattilakuormituksella 50 % vastaavasti sähkötehon muutos on 0,32 MW, lämpötehon 0,32 MW ja menoveden lämpötilan 1,88 °C yhtä paluuveden astetta kohden.

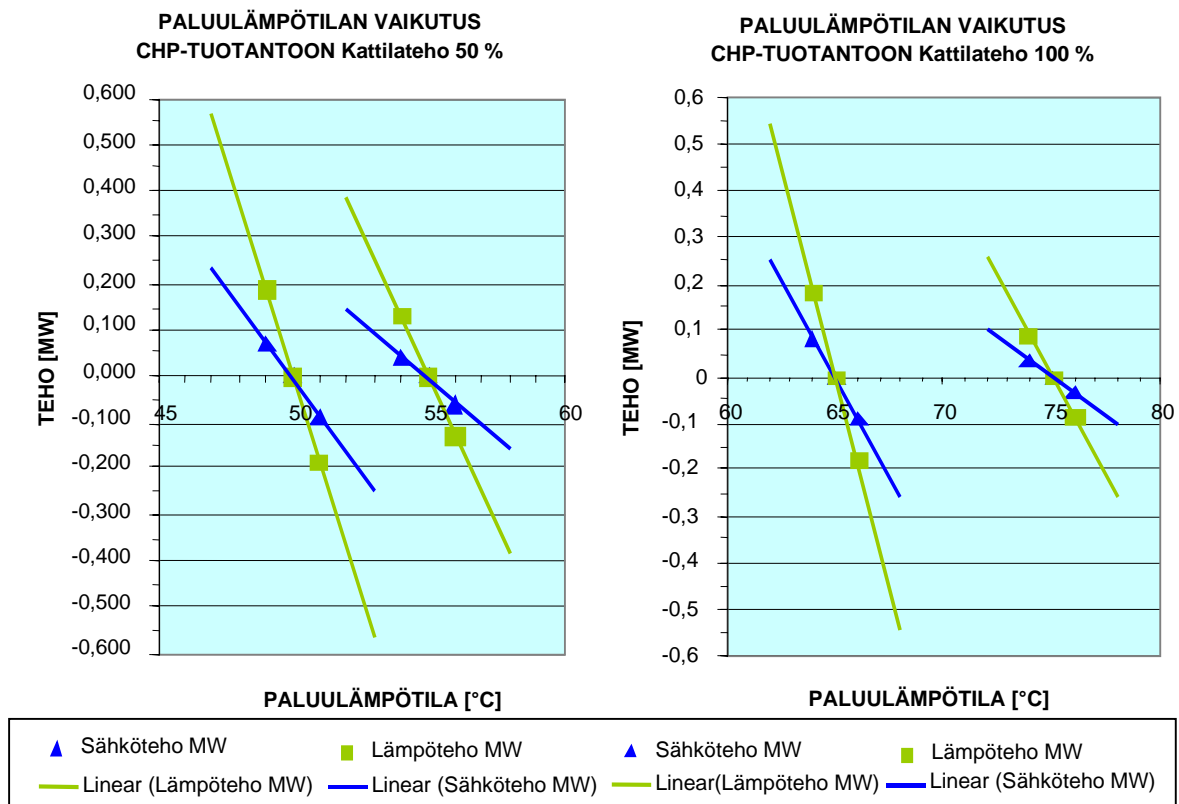
Seuraavassa tarkastellaan kaukolämmön paluulämpötilan vaikutusta CHP-laitoksen sähkön ja lämmön tuotantoon, kun kattilakuorma ja menolämpötila (kuvassa 5) pidetään vakiona. Kuvassa 6 esitetään kaukolämmön paluulämpötilan vaikutus CHP-laitoksen sähkön ja lämmön tuotantoon em. toimintapisteissä. Kattilakuormitus on 100 % ja 50 %. Kuvan 6 käyrät esittävät lämpötilan vaikutusta kahdessa laitoksen kuormitustilanteessa, joissa 0-taso vastaa ko. kaukolämmön kuormitustilanteen mukaista paluulämpötilaa.



Kuva 4. CHP-laitoksen sähkö- ja lämpöteho sekä kaukolämmön paluulämpötila menolämpötilan funktiona.



Kuva 5. CHP-laitoksen sähkö- ja lämpöteho sekä kaukolämmön menolämpötila paluulämpötilan funktiona.



Kuva 6. Kaukolämmön paluulämpötilan vaikutus CHP-laitoksen tuotantoon, kun kattilateho ja menolämpötila pidetään vakiona.

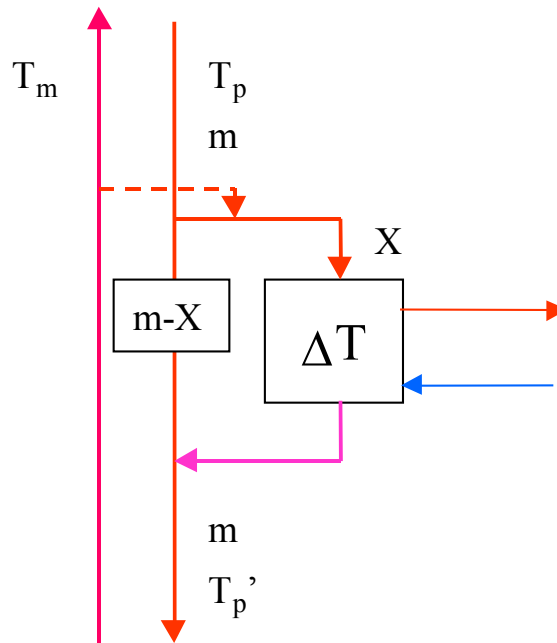
Paluulämpötilan muutoksen vaikutus CHP-laitoksen sähkön ja lämmön tuotantoon tietää kuormitustilannetta vastaavan kaukolämpökuorman paluulämpötilan arvon läheisyydessä esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Kaukolämmön paluulämpötilan muutoksen vaikutus CHP-voimalan tuotantoon. Sovellutusalue on $T_p \pm 2 \dots 3$ °C.

Kattilakuorma	KI-paluu lämpötila	Sähkötehon muutos	Lämpötehon muutos
100 %	T_p (75 °C)	$-0,035 \cdot T_p + 2,625$	$-0,086 \cdot T_p + 6,450$
	T_p (70 °C)	$-0,058 \cdot T_p + 4,060$	$-0,130 \cdot T_p + 9,100$
	T_p (65 °C)	$-0,085 \cdot T_p + 5,522$	$-0,181 \cdot T_p + 11,765$
50 %	T_p (55 °C)	$-0,050 \cdot T_p + 2,743$	$-0,129 \cdot T_p + 7,095$
	T_p (50 °C)	$-0,0798 \cdot T_p + 3,993$	$-0,1886 \cdot T_p + 9,430$

Taulukon 2 mukaan kattilan 100 %:n kuormituksella ja kaukolämmön 2 °C:n paluulämpötilan (65 → 63 °C) laskulla saadaan lisäsähkötehoa 0,17 MW ja lämpötehoa 0,36 MW. CHP-laitoksen teho on 65 °C:n paluulämpötilalla 57/122 MW, joten suhteellinen tehon lisäys on 0,3/0,3 %. Kattilateholla 50 % saadaan vastaavasti kaukolämmön 2 °C:n paluulämpötilan laskulla (50 → 48 °C) lisäsähköä 0,16 MW ja kaukolämpötehoa 0,38 MW. CHP-laitoksen tehot ovat ennen paluulämpötilan laskua 28/65 MW, joten suhteellinen lisäys on 0,58/0,58 %.

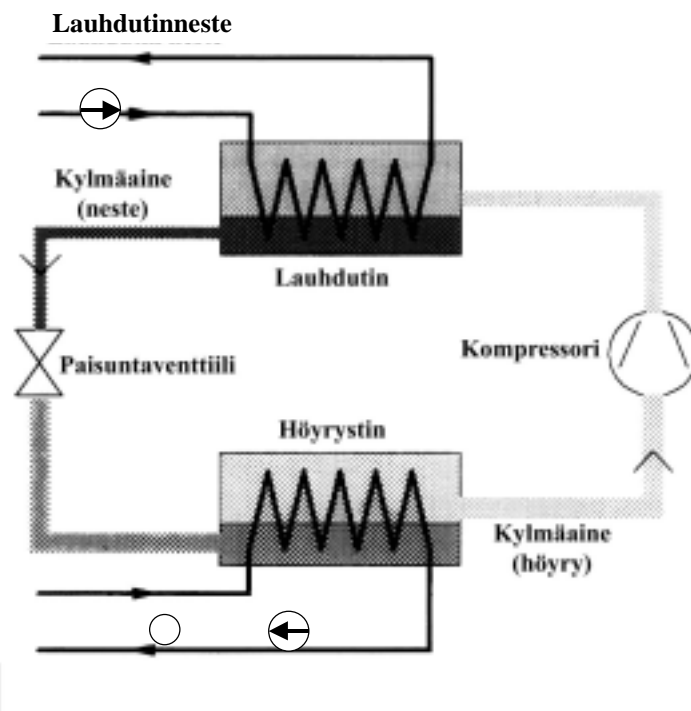
Esimerkki (kuva 7): Jos ulkolämpötila on -5 °C, CHP-laitoksen lämpöteho on silloin 122 MW ja jäähditys kaukolämpöverkossa 45 °C. Kaukolämpöveden massavirta on 648 kg/s. Lämmitettävien katualueiden jäähditys on 15 °C ja tarvittava veden massavirta 86,4 kg/s. Katulämmityksen mitoitustehona käytetään 300 W/m². Kaukolämmön paluueden 2 °C:n lämpötilan pudotukseen tarvitaan noin 5,4 MW:n lämmitysteho ja 18 100 m² lämmitettävää katuosuutta, joka merkitsee noin 1 000 m 18 m levyistä katua. Katulämmityksen huipun käyttöaikana pidetään 1 000 h vuodessa. Taulukon 2 mukaan lisäsähköä saadaan 170 MWh ja lämpöä 362 MWh. Katulämmityksen lämmön tarpeesta täytyy tuottaa tässä tapauksessa muista lähteistä 5,04 MW eli 5 038 MWh. Jos CHP-laitoksen sähkön nettotuotoksi saadaan 15 p/kWh ja lisälämmön 7 p/kWh sekä muulla tavalla tuotettavalle lämmölle 5 p/kWh, niin em. alueen tuotoksi saadaan noin 300 kmk vuodessa, josta CHP-laitoksen osuus on 50 kmk (25 000 mk/1 °C) ja muun tuotannon osuus 250 kmk. Jos CHP-laitoksella voidaan tuottaa koko katulämmitystarve, kasvaa tuotto saadun lisäsähkön ja lämmön osalta n. 700 kmk:aan.



Kuva 7. Paluuvirtausjäähdytin.

3.2 Kylmäkoneiden lauhdelämpö

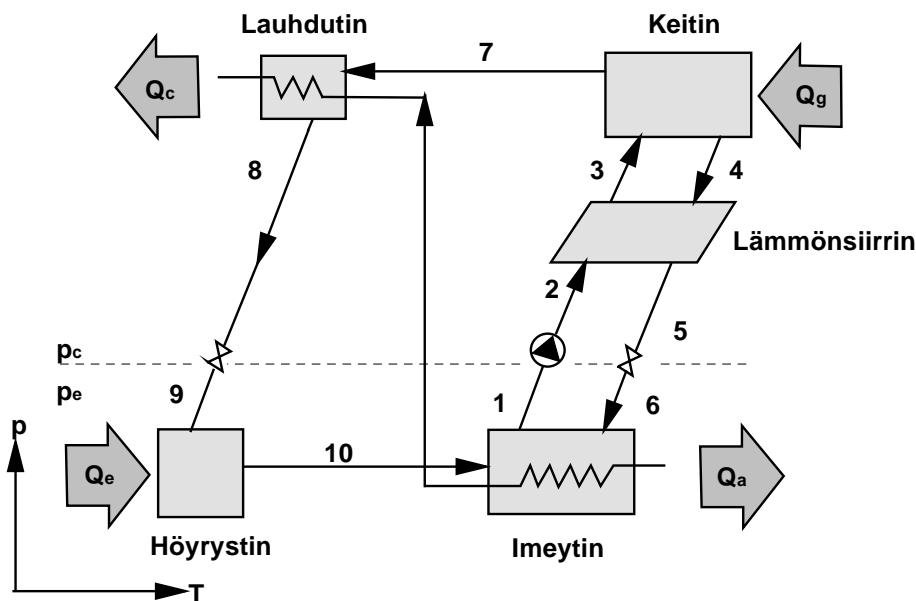
Kompressorikylmäkoneessa (kuva 8) kylmäaine höyrystyy matalapaineisessa höyrystimessä. Lämpö tuodaan höyrystimeen jäähdytettävästä kohteesta. Kompressorinostaa höyryn painetta ja höyry lauhtuu ja luovuttaa lämpöä lauhduttimen väliaineeseen. Lauhtuneen nesteen painetta lasketaan venttiilissä ja neste virtaa uudelleen höyrystimeen. Prosessin käyttövoima saadaan usein sähkötoimisesta kompressorista. Kompressorikylmäkoneen työaineena käytetään HFC-aineita (esim. R-134a, R-404, R-407c).



Kuva 8. Kompressorikylmäkoneen toimintaperiaate.

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu tietyn liuenneen aineen – liuottimen tai kylmäaineen – absorbenttien ominaisuuksiin ja erityisesti kyseisen aineparin käyttäytymiseen liuoksena. Tietyissä paineissa ja lämpötilassa vallitsee tasapaino kaasun (tai höyryn) ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Muutettaessa lämpötilaa tai painetta tasapaino muuttuu, jolloin kaasua (tai höyryä) vapautuu tai sitoutuu.

Absorptiojäähdytysprosessissa lämpöpumpun korvaa höyrystin ja lauhdutin. Kuvassa 9 esitetään absorptiokylmäkoneen toimintaperiaate. Kylmäaine virtaa lauhduttimelta paisuntaventtiilin kautta höyrystimelle. Osa kylmäaineesta höyrystyy jo paisuntaventtiilissä ja loput höyrystimellä. Höyry imeytetään (absorboidaan) imeyttimessä liuottimeen (eli absorbenttiin) ja liuoksen painetta nostetaan pumpulla. Tämä prosessiossa vastaa lämpövoimakoneen suorittamaa työtä ja korvaa mekaanisen kaasun puristamisen eli komppimoinnin korkeampaan paineeseen. Lauhdutinta ja imeytintä joudutaan jäähdyttämään lauhtumis- ja liukenemisprosessin ylläpitämiseksi. Keittimessä kylmäaine vapautetaan lämmittämällä liuosta ja jäljelle jäänyt väkevöity liuos palautetaan imeyttimeen lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin kautta.



Kuva 9. Absorptiokylmäkoneen toimintaperiaate.

Absorptiojäähdytysprosessissa höyrystimen lämpö (Q_e) saadaan jäähdytettävästä neste-
virrasta. Prosessin käyttöenergia saadaan keittimelle tuodusta lämmöstä (Q_g), esim.
kaukolämmöstä. Imeytintä ja lauhdutinta jäähdytetään jäähdytysvedellä, joka yleensä
kiertää ulos sijoitetun jäähdytystornin kautta luovuttaen lämpönsä ulkoilmaan. Liuos-
lämmönsiirtimessä kuuman, väkevän liuoksen lämpöä siirretään imeyttimestä keitti-
meen pumpattavaan laimentuneeseen liuokseen ($T_4-T_5 \rightarrow T_3-T_2$), jolloin absorptio-
lämpöpumpun hyötysuhde eli kylmäkerroin kasvaa. Höyrystin koostuu höyrystin-
putkista, joissa jäähdytettävä vesi virtaa, jäähdytysaineen suihkuputkista ja jäähdy-
tysaineen kokooma-altaasta. Imeyttimessä liuospumppu suihkuttaa absorptioaineen jääh-
dyttävän veden putkille, ja laimentunut liuos kerätään kokooma-altaaseen. Keittimessä
höyrystyslämmön luovuttava primäärilämpöputkisto ja imeyttimeltä syötettävän lai-
mean liuoksen suihkutusputkisto on sijoitettu kiehutusaltaaseen. Lauhdutin koostuu
putkista, joissa virtaa jäähdytysvesi, sekä välilevyistä. Absorptiokoneistossa työaine-
parina käytetään litiumbromidi-vesiliuosta ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) tai ammoniakki-vesiliuosta
($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$).

Kylmäkoneet tuottavat lauhdelämpöä toimisto- ja liikekiinteistöissä ympäri vuoden.
Kylmäkoneiden lauhdelämpö on yleensä 35–45 °C lämpötilassa ja sopii hyvin myös
piha- ja katualueiden lämmittämiseen. Kylmäkoneen COP (Coefficient of Performance)
on

$$COP = \frac{\Phi}{P}, \quad (1)$$

jossa Φ on kylmäteho ja P tarvittava käyttöteho (sähkö, kaukolämpö tai kaasu).

Kylmäkoneen jäähdytyspiirillä siirretään koneen tuottama lämpöenergia jäähdytetävästä tilasta pois, yleensä ulkoilmaan. Kylmäkoneen lauhdutuspiirin jäähdytystehoksi saadaan

$$\Phi_j = \frac{(1 + COP) \cdot \Phi}{COP}, \quad (2)$$

jossa Φ on jäähdytyskoneen kylmäteho.

Valmistajat ilmoittavat suunnitteluarvoista poikkeaville arvoille korjauskertoimia, joilla jäähdytyspiirin mitoitus voidaan korjata vastaamaan paikallisia olosuhteita. Tulevan jäähdytettävän nesteen lämpötilan nousu 5 °C vaikuttaa mitoitukseen noin +50 % ja lasku noin 25 %. Tulevan ulkoilman lämpötilan muutos ±5 °C vaikuttaa mitoitukseen noin ±2 %. Ilman suhteellisen kosteuden ±20 % muutos ja maastokorkeuden ± 1 000 m:n muutos vaikuttaa mitoitukseen noin ±10 %.

Kompressori- ja absorptiokoneiden lauhdutuspiirin jäähdytin sijoitetaan yleensä talon katolle, pysäköintihalliin tai sopivaan kohtaan talon pihalle. Lauhdutuspiiri voidaan jakaa käyttötavan mukaan karkeasti kolmeen tyyppiin: ilma-, haihdutus- ja ruiskutusjäähdytykseen. Pienet jäähdyttimet ovat lähes poikkeuksetta ilmajäähdytteisiä, joissa puhallin ajaa ulkoilmaa jäähdytinpatterin läpi. Haihdutusjäähdytyksessä jäähdytuspintojen päälle ruiskutetaan koko ajan vettä ja käytetään veden höyrystymislämpö hyväksi jäähdyttimen tehon parantamiseksi. Haihdutusjäähdytin voidaan mitoittaa noin puolta pienemmäksi kuin vastaava kuiva jäähdytyspatteri. Ruiskutusjäähdytintä käytetään, kun halutaan kylmän tarpeen huippukulutuksen aikana nostaa ilmajäähdytyspatterin jäähdytystehoa. Käytetty vesimäärä on 2–3 l/h,kW_j ja jäähdytystehon lisäys on 15–20 % tai huippukulutuksen mitoitus voidaan tehdä vastaavasti pienemmäksi. Kylmäkoneiden puhaltimien ja pumppauksen tarve lasketaan kylmäkoneen huipun käyttöajan mukaan. Suomessa huoneilman jäähdyttämiseen käytettyjen kylmäkoneiden huipunkäyttöajat ovat 500–800 tuntia vuodessa. Jäähdytysvaraston käytöllä voidaan pienentää kylmäkoneen mitoitustehoa, ja koneiston vuotuinen huipunkäyttöaika kasvaa n. 30 %.

Kompressorikoneisto (cop 3,0–4,5) tuottaa yhtä kylmä-MW kohden lämpöä 1,33–1,22 kertaa eli 1,32–1,22 MW. Absorptiokoneisto (cop 0,6–0,75) tuottaa lauhdelämpöä enemmän kuin kompressorikone eli yhtä kylmä-MW kohden 2,67–2,33 MW lauhdetta. Jos piha- tai katualueen lämmitystarve on 300 W/m², niin kompressorikoneen kylmä-MW kohden tuottamalla lauhdelämmöllä voidaan sulattaa maksimissaan 4 000–4 400 m² ja absorptiokoneen lauhteella vastaavasti 7 700–8 900 m² piha- tai katualuetta.

3.3 Sähkölämmitys

3.3.1 Kaapelilämmitys

Lämmityskaapeli asennetaan samoin kuin vesiputkijärjestelmä kivetyksen tai kulutusasfalttikerroksen alle kevytasfaltti- tai hiekkakerrokseen. Kaapelilenkkien asettelussa on käytettävä vähintään valmistajan suosittellemaa minimitaivutussädettä ja asennusväliä. Kaapelin asennusväli vaihtelee 5–30 cm:iin. Kaapeli asennetaan ajoradan tai kävelytien poikittaissuuntaan siten, että ajoradan suuntainen matka on mahdollisimman lyhyt. Asennettavia kaapeleita on kolme eri tyyppiä: vakiovastus-, vakioehto- ja vakiolämpötilakaapeleita. Kaapelit eivät saa mennä ristiin asennuskohteessa. Kaapeli asennetaan asennusnauhan avulla tai sidotaan esim. betonissa rauditusverkkoon, jotta kaapelin asennusvälit säilyvät eivätkä kaapelit pääse koskettamaan toisiaan asennuskerrosta valtaessa.

Vakioehtokaapelin hinta on noin 5–10-kertainen ja vakiolämpötilakaapelin 10–20-kertainen vakiovastuskaapeliin verrattuna.

3.3.2 Vakiovastuskaapeli

Vakiovastuskaapelissa on kaapelin vastus vakio pituusyksikköä kohden. Vakiovastuskaapeleita asennetaan yleensä lyhyinä lenkkeinä ja varustetaan ylikuumentumissuojalla. Kaapelin teoreettinen pintalämpötila T_p saadaan yhtälöstä

$$T_p = T_u + \frac{P_m}{\pi \cdot d \cdot \alpha_u}, \quad (3)$$

jossa T_u on ympäristön lämpötila (°C)

P_m on kaapelin kuormitus pituusyksikköä kohden (W/m)

d on kaapelin halkaisija (m)

α_u on lämmönsiirtymiskerroin kaapelista ympäristöön (W/m², °C).

Jos kaapelin teho on 20 W/m, lämmönsiirtymiskerroin 33 W/m², °C, kaapelin halkaisija 6 mm ja ympäröivän maan lämpötila +6 °C, niin kaapelin pintalämpötilaksi saadaan 59 °C. Ympäröivän maan lämmön johtuvuuden takia pintalämpötila on käytännössä kuitenkin alempi.

Kaapelin asennusväliksi saadaan

$$l = \frac{q}{\Phi}, \quad (4)$$

jossa q on kaapelin ominaislämmitysteho [W/m]

Φ on alueelle syötettävä lämmitystiheys [W/m²].

Kaapelin pituudeksi saadaan

$$L = \sqrt{\frac{U^2}{q \cdot r}}, \quad (5)$$

jossa U on syöttöjännite

r on kaapelin ominaisvastus [Ω /m].

3.3.3 Vakiotehokaapeli

Vakiotehokaapelin sydämenä on kaksi eristettyä kuparijohdinta, joiden ympärille on spiraalimaisesti kiedottu vastuslanka. Vastuslanka oikosuljetaan vuorotellen noin metrin välein em. johtimiin, jolloin kaapelin lämmitysteho muodostuu vakioksi. Kaapelin maksimipituus eri tehomitoituksilla esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Lämmityskaapelien tehot ja maksimipituus.

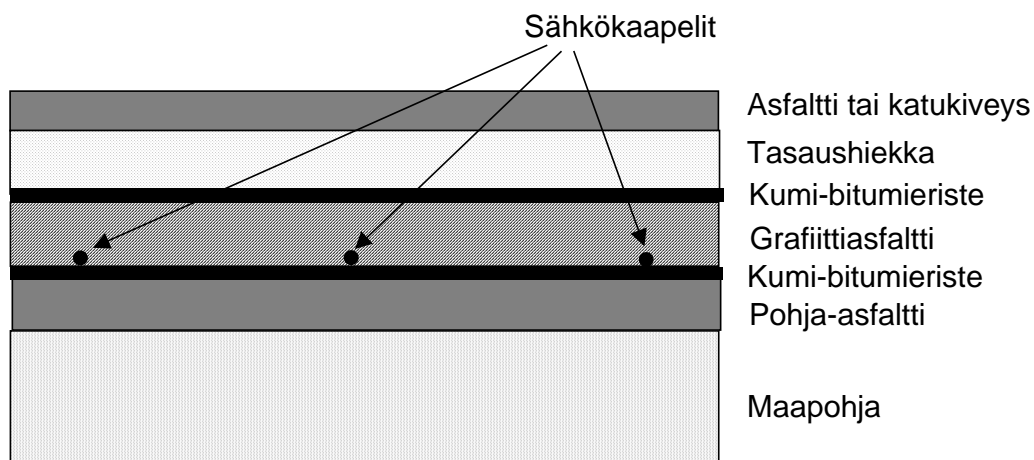
Teho/pituus [W/m]	Maks. kaapelipituus [m]
10	120
20	90
30	75

3.3.4 Vakiolämpötilakaapeli

Itsesäätyvä lämmityskaapeli pyrkii pitämään johdinlämpötilansa vakiona erilaisissa lämmön luovutusolosuhteissa tai ympäristön lämpötilan vaihdellessa. Kaapeli säätää omaa tehoa lämpötilan mukaan. Kaapelin sydämen muodostaa kaksi tai useampia puolijohtavalla eristemateriaalilla eristettyä kuparijohdinta. Johtimien välisen puolijohteen ominaisvastus muuttuu lämpötilan mukaan. Lämpötilan laskiessa vastus pienenee ja antaa lisätehoa sekä lämpötilan noustessa vastus kasvaa ja pienentää tehoa. Itsesäätyvää kaapelia voidaan myös haaroittaa. Asennuspituus määräytyy mitoitustehon ja sulakekoon mukaan. Suuren alkutehon takia kannattaa käyttää hitaita sulakkeita.

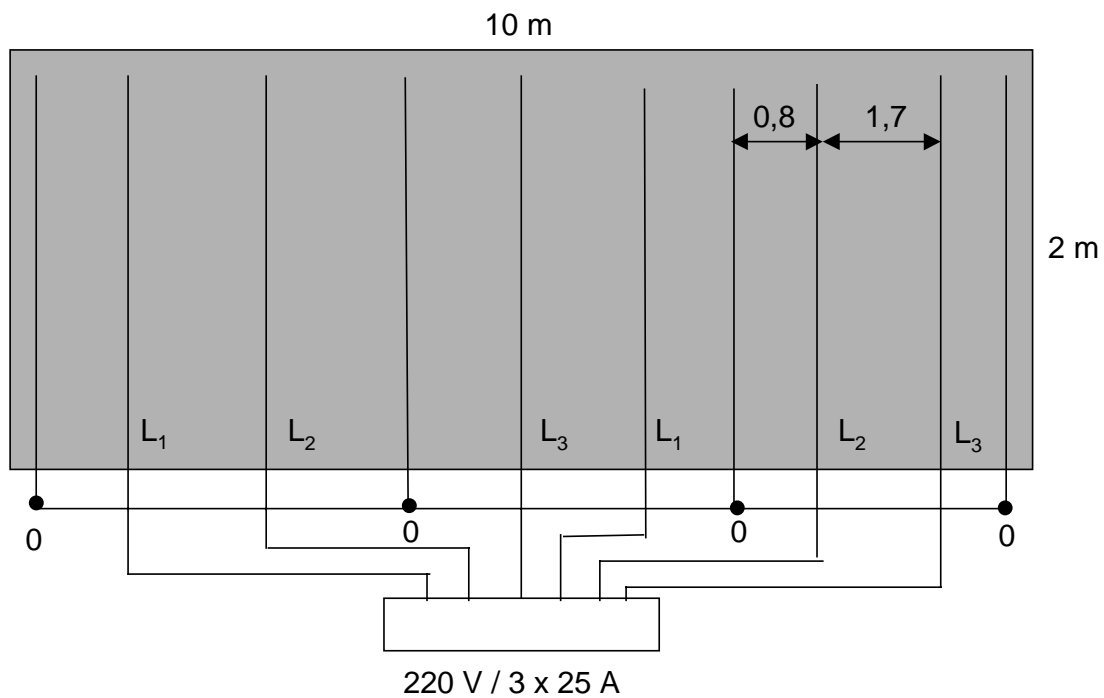
3.3.5 Grafiittilämmitys

Grafiittilämmitys koostuu sähkökaapeleista ja asfalttiin sekoitetusta sähköä johtavasta grafiitista. Sähkökaapeleihin johdetaan sähkövirta, joka aiheuttaa sähkökentän vaihejohtimen ja 0-johtimen välille. Grafiitti toimii johtimena, joka lämpiää ja lämmittää smalla ympärillä olevan asfalttikerroksen. Lämmitettävä n. 5 cm:n kerros rakennetaan asfaltin tai betonin ja päällyskerroksen väliin. Grafiittiasfalttikerros eristetään molemmin puolin kumi-bitumikerroksella, jolloin grafiittiasfalttikerros on täysin irtoton eristetty laatta. Kuvassa 10 esitetään grafiittilämmityksen rakenteellinen poikkileikkaus.



Kuva 10. Grafiittilämmityksen rakennekerrosten periaatteellinen poikkileikkaus.

Sähköä johtavan asfalttikerroksen hienoaines on korvattu synteettisellä grafiitilla. Kerroksen grafiittipitoisuus on 15–25 %, josta osa on käsitelty termisesti paremmin sähköä johtavaksi ja kuormitusta kestäväksi. Käyttöjännitettä voidaan muuttaa käyttökohteen mukaan (48–120 V). Lämpö siirtyy johtumalla pinnoitekerrokseen ja pinnalla oleva lumi sulaa. Kuvassa 11 esitetään grafiittilämmityksen periaatteellinen kytkentä. Mitoitusteho on katu- ja pihapinnoille 200–400 W/m² ja siltakansille 300–500 W/m².



Kuva 11. Grafiittilämmityksen toimintaperiaate.

3.4 Maa- ja pohjavesilämmitys

3.4.1 Maa- ja kallioperää hyödyntävät energiaratkaisut

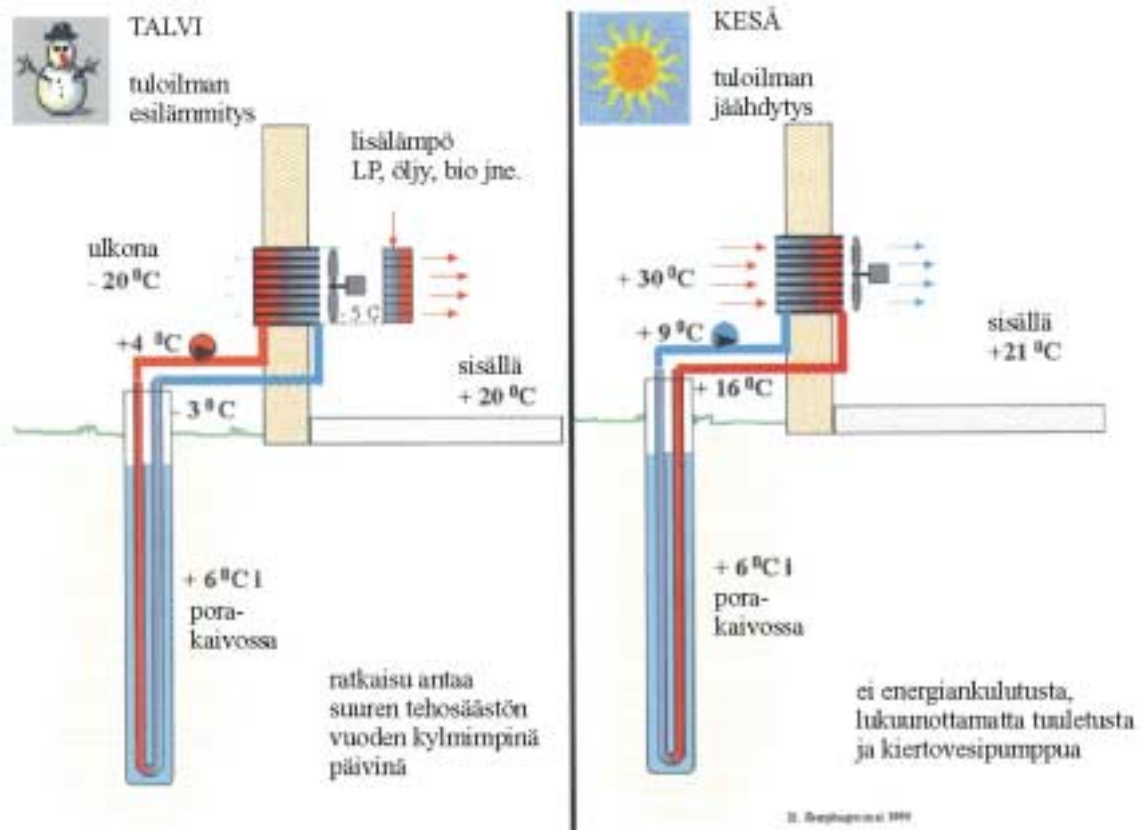
Potentiaalisia sovelluskohteita ovat mm:

- kiinteistöjen piha- ja ulkoalueet
- jalankulkualueet
- sillat, rampit, risteysalueet
- urheilualueet jne.

Lämmitettävästä kohteesta tulee tuntea:

- lämmitettävän alueen pinta-ala, joka määrittelee vaadittavan lämmitystehon
- lämmityksen kesto, lämpötilatasot, lämmönjakomahdollisuus ja -tapa
- maa-, kallioperätiedot sekä pohjavesiesiintymää koskevat ominaisuustiedot.

Kuvassa 12 on esitetty periaateratkaisu kallio- tai maaperän hyödyntämisestä rakennusten lämmityksessä/jäähdytyksessä. Samaa tekniikkaa voidaan käyttää myös ulkoalueiden lämmityksessä, jopa helpomminkin, koska ulkoalueiden lämmitys sallii enemmän teho- ja lämpötilavaihtelua kuin sisätilojen lämmitys.



Kuva 12. Lämmitys/jäädytysenergiaa kalliosta (NGU 1998).

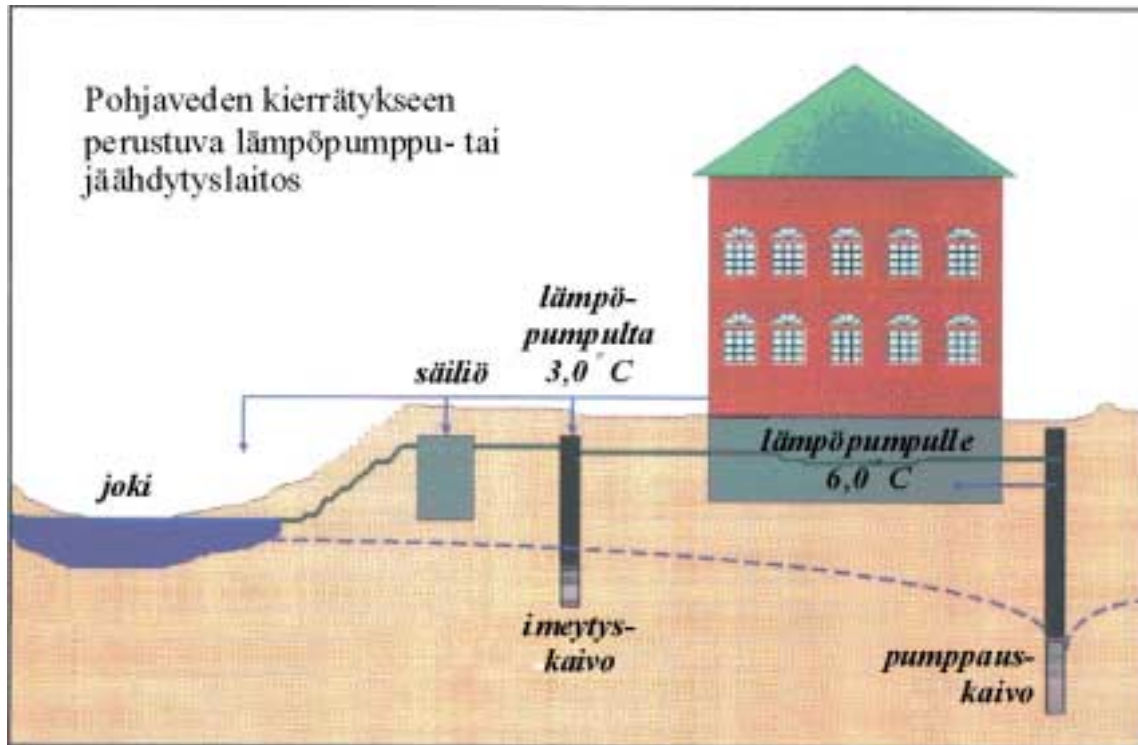
3.4.2 Pohjavesilämpöä hyödyntävät energiaratkaisut

Pohjavesilämpöä hyödyntävän lämmitysratkaisun periaate on esitetty kuvassa 13.

Lämmitysratkaisun potentiaalisia sovelluskohteita ovat mm:

- urheilualueet
- sillat, liittymät, rampit
- lentokenttien terminaalialueet
- luiskasuojamattomat tiealueet pohjavesialueilla jne.

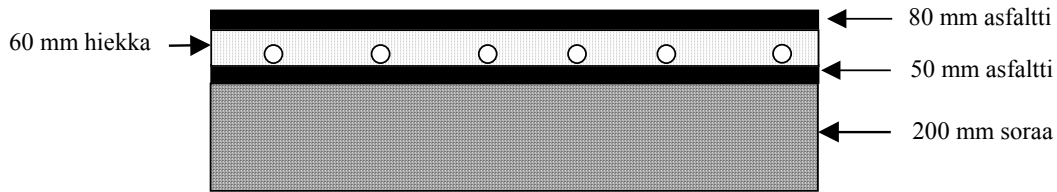
Pohjavesilämmön käyttöä tiealueen mahdolliseen lämmitykseen tarkastellaan laskentaesimerkin avulla tarkemmin luvussa 4.5.



Kuva 13. Pohjaveden käyttö lämmitys/jäähdytysratkaisuissa (NGU 1998).

4. Esimerkkitarjastelut

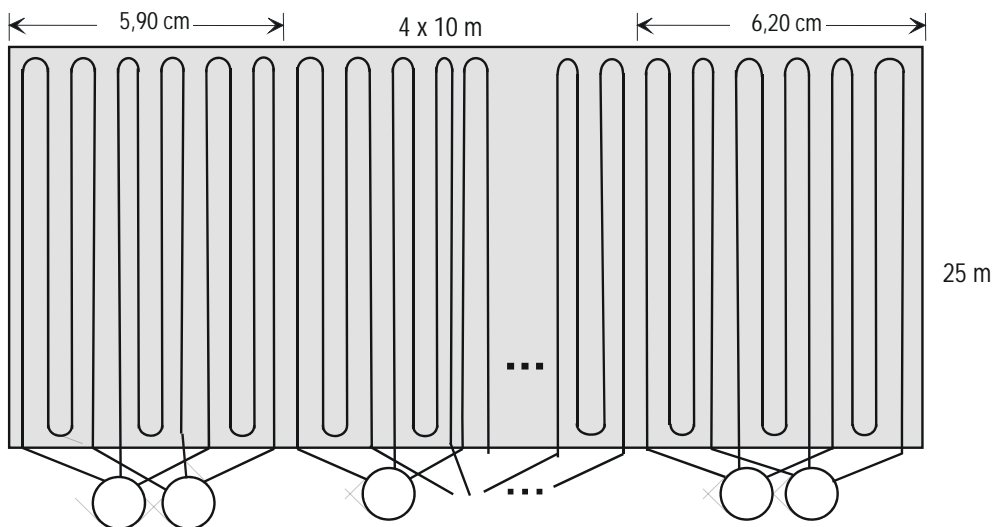
Lasketaan 1 000 m²:n (40 m x 25 m) kokoisen asfalttialueen lämmitysjärjestelmä, kun mitoitus lämpöteho on 300 W/m². Asfaltin alle on sijoitettu vesiputkisto tai sähkökaapeli 6 cm asennushiekkakerroksessa ja asennuskerroksen alla on 5 cm asfaltti sekä 20 cm karkeampaa alustasoraa kuten kuvassa 14 esitetään. Koko alueen tehon tarve on siten 300 kW.



Kuva 14. Katualueen rakenne.

4.1 Vesikiertolämmitys

Alueen lämmitys laskettiin PEXEP Oy:n *Lumikki*-mallilla. Putkeksi valittiin 25/20,4 mm muoviputki. Koko alue jaetaan 4 x 250 m²:n alueeseen eli lämmitysteho on 4 x 75 kW. Malli laskee 250 m²:n alueelle 6 putkilenkkiä à 208 m/lenkki, eli putkimääräksi saadaan 1 248 m ja putkiväliksi 200 mm. Koko 1 000 m²:n alueelle tarvitaan siten 5 000 m muoviputkea. Asennussyvyydeksi valittiin 120 mm. Putkiston mitoituslämpötila on 39 °C ja jäähdytys 15 °C. Ulkoilman mitoitusolosuhteet ovat taulukossa 4. *Lumikin* laskemat arvot ovat taulukossa 5. Putkilenkkien periaatteellinen sijoittelu on kuvassa 15.



Kuva 15. Katulämmitys kaukolämmöllä.

Taulukko 4. Lasekennan ulkoiset olosuhteet.

TILTUN	Ilman lämpö °C	Lumen lämpö °C	Lumen sul.nop. mm/h	Tuulennop. m/s	Ilman suht. kosteus
Lumi	-10	-5	30	5	80

Taulukko 5. Katupinnan sulatus kaukolämmityksellä.

TILTUN	LATPA m ²	PUTLENLKMPINTAMAT kpl	ALAPMAT	ERISMAT	ErisAlMaa	ALAPL C°	KIERNEST	KIENESTL C°	NESTJAAH C°	
lumi	250,0	6	Asfaltti	Asfaltti	-	sora	6	vesi-glykoli	39	15

ASSYV mm	TEHO kW	Putki Du/Di mm	Putkijako mm	AsfPinTI C°	Putkilenkki m	VIRTNOP m/s	TILAVIR l/s	PLPAINH kPa	Kok.putkim. m	PumpTeho kW
120	75,00	25,0	200	2	208	0,25	0,42	10,0	1248	52

4.2 Vakiovastuskaapeli

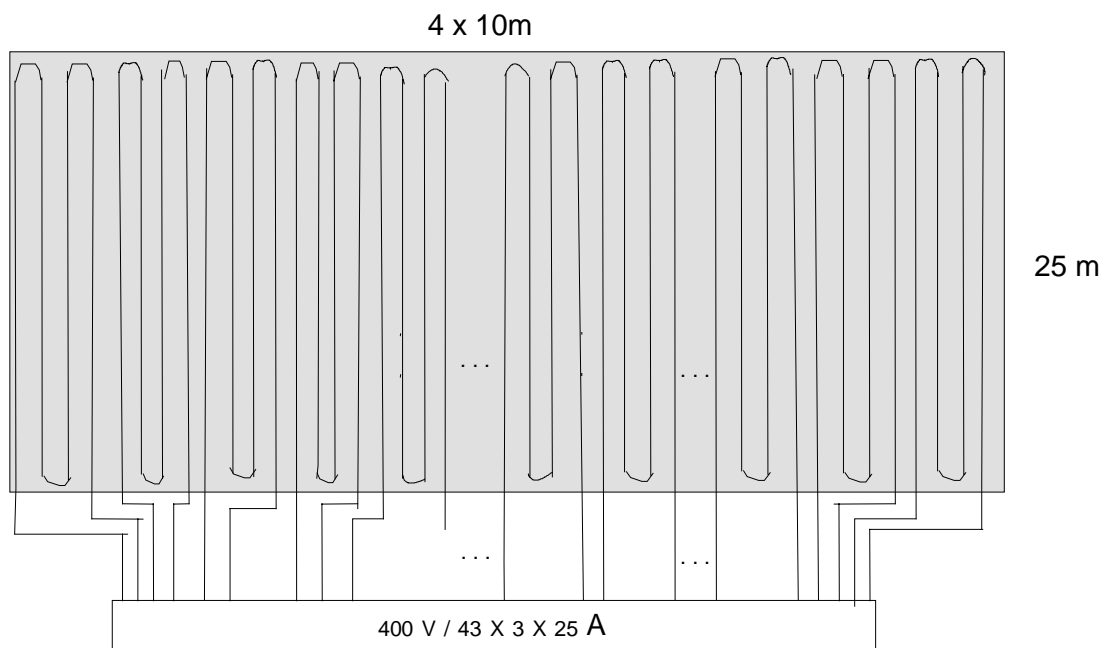
Jaetaan lämmitysteho kolmeentoista $300/43 = 7$ kW:n osaan, jotka liitetään kukin omaan 3 x 25 A:n sulakeryhmään. Kaapelilenkin lämmitettäväksi alaksi saadaan 10 m^2 . Valitaan $0,82 \text{ } \Omega/\text{m}$ ja 25 W/m lämmitystehon kaapeli. Kaapelin asennusväliksi saadaan

$$l = 25 \text{ W/m} / 300 \text{ W/m}^2 = 0,083 \text{ m}$$

eli kaapelilenkin pituudeksi saadaan

$$L = 1,05 \sqrt{400^2 / (25 \times 0,82)} = 93 \text{ m.}$$

Kaapelin kokonaispituus on $12\,000 \text{ m}$, jos asennusvaraksi otetaan 5% lasketusta kaapelipituudesta. Kuvassa 16 esitetään sähkökaapelin periaatteellinen asennus.



Kuva 16. Sähkölämmityskaapelin asennus lämmitettävään pintaan.

4.3 Vakiolämpötilakaapeli

Asennusväliksi saadaan 0,22 m.

Kaapelin pituudeksi saadaan

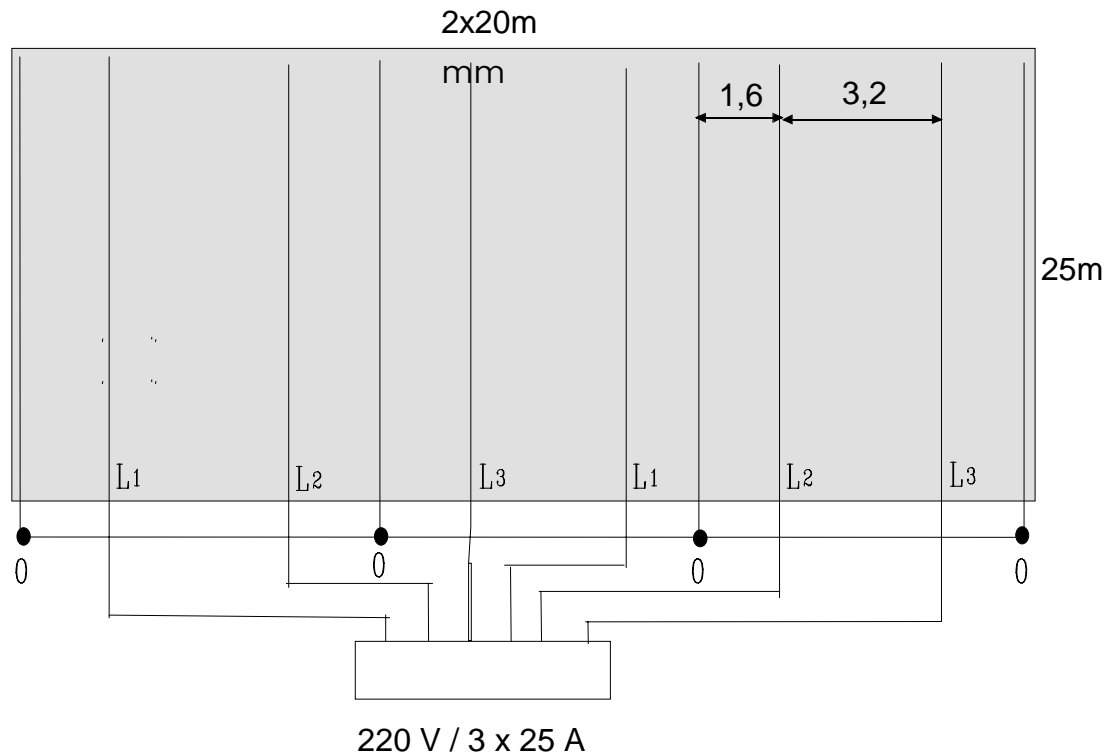
$$L = 1,05 \times 1\,000 \text{ m}^2 / 0,22 \text{ m} = 4\,600 \text{ m},$$

joka jaetaan 25 A:n sulakkeilla 3 x 6 kW:n ryhmiin 50 m:n lenkiksi. Kytkeä ja asennus samalla periaatteella kuin kuvassa 16 on esitetty.

4.4 Grafiittilämmitys

Asfalttikerros, johon on sekoitettu grafiittia, on 4–5 cm paksu. Vaihe- ja nollajohdin sijoitetaan grafiittikerrokseen oheisen kuvan 17 mukaisesti kolmen kaapelin ryhmiin. Vaihe- ja nollajohtimen väli on 1,6 m ja kahden vaihejohtimen väli 3,2 m. Lämmön mitoitusteho on 300 W/m². Kaapelijännite on 48 V ja pääsulakkeet 220 V / 3 x 25 A.

Jaetaan alue 2 x 2 x 20 m:n alueisiin. Kaapelin määräksi saadaan 500 m 5 %:n työllisillä.



Kuva 17. Grafiittilämmitys bitumikerroksessa.

4.5 Tiealueen lämmitystapatarkastelu

4.5.1 Yleistä

Tarkastellaan hypoteettista tiealuetta pohjavesialueella, jossa on mahdollista käyttää erilaisia energialähteitä tiealueen lämmitykseen. Valitaan tarkastelun kohteeksi kaksikaistainen valtatie, jonka ajokaistojen yhteisleveys on 7,5 m ja tien kummassakin reunassa on metrin levyinen piennar, eli sulana pidettävän päällysteen kokonaisleveys on 9,5 m. Lämmitettävän tieosuuden pituudeksi valitaan 500 m ja oletetaan tarkasteltavan tieosuuden sijaitsevan 1-luokan pohjavesialueella, jolloin tieosuudelle on rakennettava luiskasuojaukset. Pohjaveden muodostumisalueella lämmitykseen voidaan käyttää myös pohjavesilämpöä lämpöpumppulaitoksen avulla. Tiealueen lämmitystä tarkastellaan tässä tapauksessa vaihtoehtona tien suolaukselle ja luiskasuojauksille. Lähtökohdana kustannusvertailussa on, että luiskasuojauksia ei rakenneta lämmitettävälle tieosuudelle.

4.5.2 Lämmitystapatarkastelu

Vaadittava lämmitysteho

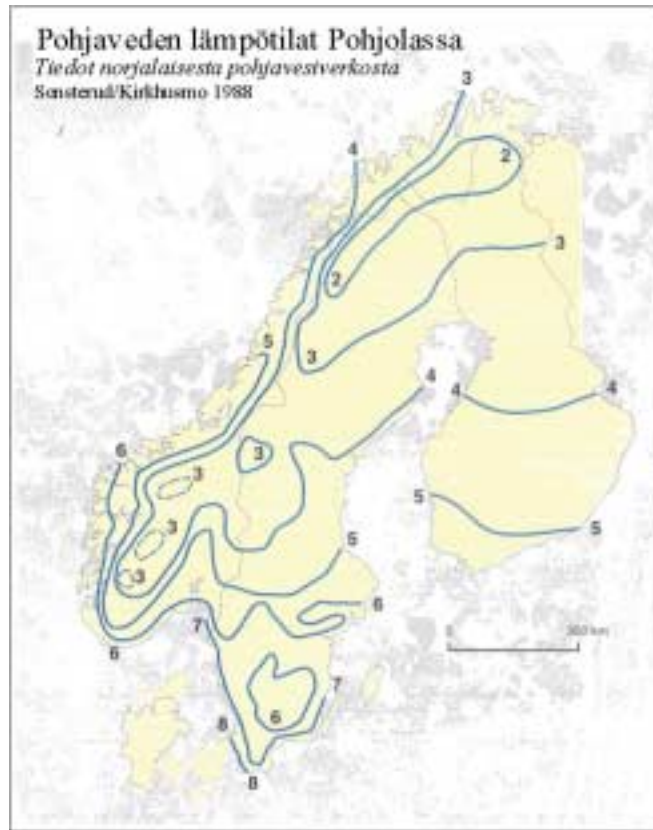
Lämmitettävän alueen pinta-ala on $4\,750\text{ m}^2$. Valitaan tiealueen lämmitystekoksi 300 W/m^2 , mikä riittää sulattamaan 30 mm uutta lunta/h ja kykenee pitämään tienpinnan sulana -13 °C :n lämpötilaan. Nämä tehot on todettu riittäviksi katulämmityksen lämmitystekomallinnuksissa (Vrt. luku 5).

Lämmitettävän tiealueen kokonaistehontarve on siten $300\text{ W/m}^2 \times 4\,750\text{ m}^2 = 1\,425\text{ kW}$. Lämmitysratkaisuna tarkastellaan pohjavesilämmitystä lämpöpumppulaitoksen avulla. Lämmitysratkaisua verrataan kaukolämmitykseen ja suoraan sähkökaapeli-lämmitykseen. Lisäksi lämmitysratkaisuja verrataan kustannuksiltaan pohjavesisuo-jausten (tien luiskasuojausten) rakentamiskustannuksiin lisättynä tien suolaus- ja talvi-kunnossapitokustannuksilla.

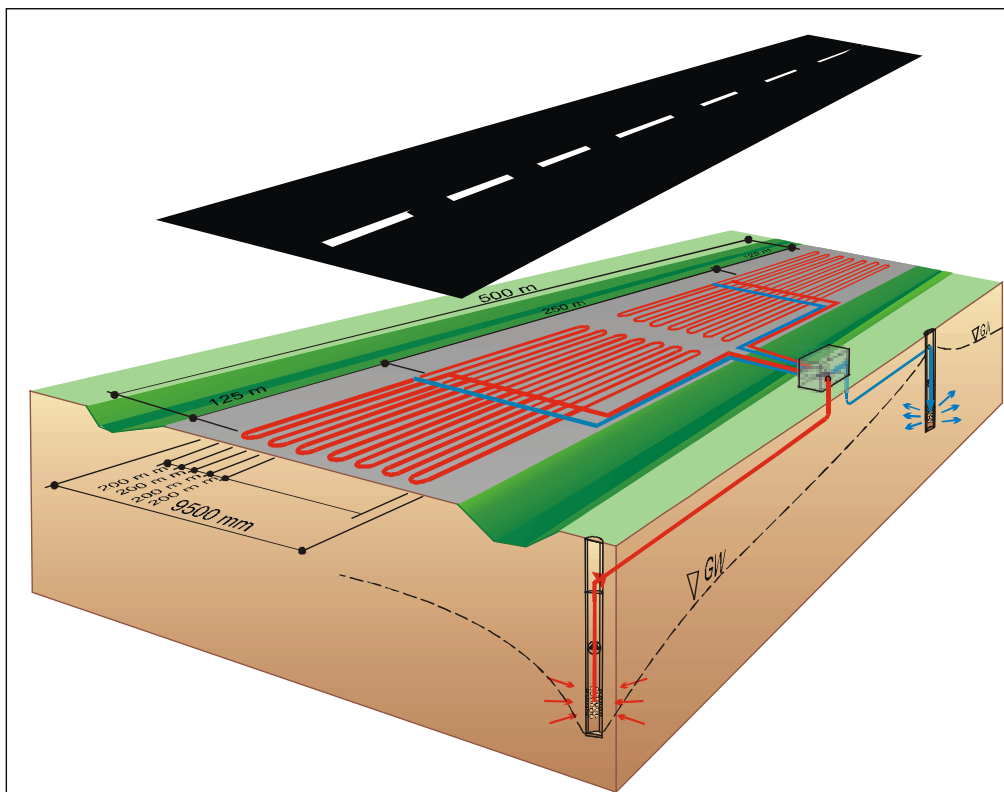
Pohjavesilämmitysjärjestelmä

Pohjavettä hyödyntävä lämpöpumppulaitos voi toimia pienellä lämpötila-alueella ($+5\text{--}30\text{ °C}$). Tällöin sen voidaan olettaa toimivan suhteellisen hyvällä hyötysuhteella, noin lämpökertoimella 4, jolloin $\frac{3}{4}$ lämmitysenergiasta saadaan pohjavedestä ja $\frac{1}{4}$ käyttö-sähköstä. Tällä oletuksella lämpöpumpun sähköliittymäteho on 356 kW ja pohjavedestä otettava lämpöteho $1\,068\text{ kW}$ kokonaistehon ollessa $1\,424\text{ kW}$.

Lämpöpumppu hyödyntää pohjavesikiertoa, jolloin pohjavesiesiintymästä pumpataan lämpöpumpun kautta $+4\text{--}6$ -asteista pohjavettä, joka palautetaan $0\text{--}+1$ -asteisena imeytyskaivojen kautta takaisin pohjavesiesiintymään. Pohjavesi kiertää omassa piirissään, joten vesi voidaan palauttaa lämmön luovutuksen jälkeen takaisin pohjavesiesiintymään, jossa se lämpenee uudelleen. Kuvassa 18 on esitetty pohjaveden yleispiirteinen lämpötilajakauma Pohjolassa. Lämmitysratkaisun periaate on esitetty kuvassa 19.



Kuva 18. Pohjaveden lämpötilat Pohjolassa (NGU 1998).



Kuva 19. Tiealueen lämmitys pohjavesilämpöpumpulla, periaateratkaisu.

Lämpöpumpun vaatima pohjaveden virtaama voidaan laskea kaavasta

$$Q = m \times c \times \Delta, \quad (6)$$

jossa

m = pohjaveden virtaama m^3/h

$Q = 1068 \text{ kW}$

c = veden ominaislämpö = $1,16 \text{ kWh}/m^3, K$

$\Delta T = 4 \text{ K}$.

Vaadittava virtaama $m = 230 \text{ m}^3/h = 64 \text{ l/s}$.

Lämmitysjärjestelmän toteutus

Lämmitysjärjestelmän/lämpöpumpun mitoitustehoksi valitaan $1,5 \text{ MW}$. Lämpöpumppulaitos sijoitetaan kuvan mukaisesti lämmitettävän tiealueen keskikohdalle tiealueen reunalle. Lämpöpumpulta johdetaan lämmitysnesteen meno- ja paluurunkolinjat tien reunassa 125 m lämpöpumpun molempiin suuntiin ja edelleen jakotukit poikittain tien rakennekerrokseen. Runkolinjan yhteispituus on noin 500 m ja putkituksena käytetään eristettyä PE-putkea. Tierakenteeseen asfaltin alle asennetaan lämmitysputkiksi polyeteeniputket, PE 25 mm , 200 mm :n välein eli $5 \text{ m}/m^2$, ts. käytetään vastaavaa toteutusta kuin katulämmityksessä. Tiepäällysteen alle lämmitysputket sijoitetaan tien pituussuunnassa, jolloin putkitusta tulee liitospituuksineen noin $50 \text{ m}/\text{tiemetri}$ ja lämmitysputkituksen kokonaispituudeksi $25\,000 \text{ m}$. Lämpöpumppulaitoksen lämmönsiirtonesteinä voidaan käyttää esim. kylmäainetta, jolloin lämmityskierto voidaan tarvittaessa pysäyttää liian kylmänä kautena

Lämpöpumpun vaatima pohjavesikierto toteutetaan pohjavesipumppaamosta routarajan alapuolelle sijoitettavaa vesijohtoa pitkin. Vesi pumpataan pohjavesikaivojen kautta pohjavesiesiintymästä ja palautetaan imeytyskaivojen kautta takaisin esiintymään riittävän etäälle pumppauskaivoista. Lämmitysjärjestelmään menevän kiertonesteen lämpötila kohotetaan lämpöpumpulla noin $30\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$:seen, jolloin lämmitysputkisto voidaan toteuttaa samalla tavalla kuin kaukolämmityksen paluukierrolla toimivassa lämmitysjärjestelmässä. Lämpöpumpulle tulevan pohjaveden lämpötila on noin $+4\text{...}+6 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lämpöpumpulta lähtevän veden lämpötila $0 \text{...}+1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lämpöpumppulaitos voidaan toteuttaa konttiin valmiiksi asennettuna moduuliratkaisuna, jolloin kontti tuodaan tielämmityskohteeseen ja kytketään asennettuun tielämmityspiiriin ja rakennettuun pohjavesikiertopiiriin. Kiinteistölämmitykseen suunniteltuja valmiiksi asennettuja lämpöpumppulaitosmoduuleita on saatavana tiettävästi ainakin 1 MW :n tehoisina. Tielämmityksessä tällainen moduuliratkaisu on erittäin käyttökelpoinen, koska sen asentaminen valmiiksi putkitettuun järjestelmään on nopeaa ja moduulin

siirtäminen esimerkiksi huoltoon tai toiseen kohteeseen onnistuu suhteellisen vaivattomasti.

4.5.3 Tielämmitysjärjestelmän investointikustannukset

Seuraavassa esitetään yhteenveto tarkasteltavien lämmitysjärjestelmien investointikustannuksista sekä tien luiskasuojauksen investointikustannuksista.

Lämpöpumppulaitos

Lämpöpumppulaitosmoduuli 1 500 kW, 1 000 mk/MW	1 500 000
Pohjavesijärjestelmän pumppaus- ja imeytyskaivot sekä pumput	200 000
Pumppaus- ja imeytyskaivojen runkolinjat (200 m, 200 mk/m)	40 000
Tielämmityksen runkolinjat (250 m, rinnakkaisputket, 1 000 mk/m)	250 000
Jakotukit (2 kpl à 10 m/kpl)	30 000
Tieputkitus (25 000 m, 20 mk/m)	500 000
Sähköliittymä 360 kW, perusmaksu	55 000
Suurjännitetehtotariffi 240 mk/kW	85 000

Yhteensä **2 660 000 mk**

Kaukolämmitys

Kaukolämmön siirtolinja 500 m, à 1 300 mk/m	650 000
Lämmönsiirrin + laitesuoja	200 000
Tielämmityksen runkolinjat (250 m, rinnakkaisputket, 1000 mk/m)	250 000
Jakotukit (2 kpl, pituus 10 m)	30 000
Tieputkitus (25 000 m, 20 mk/m)	500 000

Yhteensä **1 550 000 mk**

Sähkölämmitys

Sähköliittymä 1 500 kW, perusmaksu	55 000
Suurjännitetehtotariffi 240 mk/kW	360 000
Muuntoasema	100 000
Kaapelointi 25 000 m, à 20 mk/m	500 000

Yhteensä **1 015 000 mk**

Yhdistetyn tiesuolauksen ja luiskasuojauksen kustannukset

Tiealueen pohjavesisuojaus toteutetaan rakentamalla luiskasuojaukset sekä ohjaamalla tiealueen vedet hallitusti puhdistamoon tai pohjavesialueen ulkopuolelle. Luiskasuojauksen rakentamiskustannukset arvioidaan keskimäärin seuraavasti: $550 \times 20 \times 100 \text{ mk/m}^2 = 1\,100\,000 \text{ mk}$

Käyttökustannuksina tien talvikunnossapidosta tulevat tien aeraus- ja suolauskustannukset, jotka ovat suunnilleen 6 000 mk/km vuodessa.

4.5.4 Tielämmityksen kokonaiskustannukset

Oletetaan, että sähköliittymässä käytetään kaksiaikatariffia, puolet arkipäivä- ja puolet yöaikaenergiaa, jolloin sähkönkulutus voidaan hinnoitella päivä- ja yösähkön keskiarvolla. Jos päiväenergian hinnaksi otetaan 0,45 mk/kWh ja yöenergian hinnaksi 0,27 mk/kWh, saadaan käytettävän sähköenergian keskihinnaksi 0,36 mk/kWh.

Lämmitystapavertailussa eri energiamuodoille käytetään seuraavia kuluttajahintoja:

- sähkö 0,36 mk/kWh
- kaukolämpö 0,20 mk/kWh.

Näillä yksikköhintoilla saadaan eri lämmitysmenetelmille seuraavat energiakustannukset ilman investointikustannuksia:

- lämpöpumppulaitos, 1500 kW 135 mk/h (lämpökerroin 4, sähköteho on 375 kW)
- sähkölämmitys, 1500 kW 540 mk/h
- kaukolämmitys, 1500 kW 300 mk/h.

Käyttökokemusten mukaan katualueita lämmitetään Suomen sääoloissa noin 1 000–1 100 h/v. Oletetaan, että tiealueella riittää samansuuruinen lämmityksen käyttötuntimäärä. Lämmityksen käyttötuntimäärällä 1 000 h/v saadaan taulukossa 6 esitetyt vuotuiset energiakustannukset. Energiakustannusten valossa lämpöpumppulaitos on edullisin, mutta energiakustannuksiin tulee lisää myös investoinnin vuosikustannukset, jotka lämpöpumppulaitoksella ovat lämmitysvaihtoehdoista suurimmat.

Taulukko 6. Tiealueen (4 750 m²) lämmityksen sekä liukkaudentorjunnan investointi- ja käyttökustannukset.

Lämmitystapa	Investointi- kustannus	Energia- kustannus mk/v (käyttö 1000 h/v)	20 vuoden käyttö - Energia kustannusten nykyarvo (12 x vuosi kustannus)	Investointi + 20 v:n käyt- tö nykyarvo
	mk	mk	mk ¹⁾	mk
Kaukolämpö	1 550 000	300 000	3 600 000	5 150 000
Pohjavesilämpö- pumppulaitos	2 660 000	135 000	1 620 000	5 000 000
Käyttö- ja huol- tokustannus		60 000 ²⁾	720 000	
Sähkölämmitys	1 015 000	540 000	6 480 000	7 495 000
Liukkauden torjunta	Investointi- kustannus mk	Vuosikustannus mk	20 v:n käyttö nykyarvo mk	
Luiskasuojaus Suolaus + auraus	1 100 000	6000	72 000	1 172 000

¹⁾ Energiakustannusten nykyarvoon on diskontattu 20 vuoden vuotuiset samansuuruiset energiakustannukset 5 %:n korkokannalla. Nykyarvo saadaan tällöin kertomalla vuosikustannus luvulla 12, joka saadaan siis em. lähtöarvoilla nykyarvon diskonttauskaavasta.

²⁾ Helsingin Energia

4.5.5 Tielämmityksen lämmitystapavertailu

Tiealueen eri lämmitystapojen investointi-, energia- ja käyttökustannusvertailu osoittaa, että pohjavesilämmitys ja kaukolämmitys ovat nykyarvotarkastelun perusteella kustannuksiltaan lähes samanhintaiset. Investoijan kannalta pohjavesilämmitykseen liittyy enemmän kustannusepävarmuuksia kuin kaukolämmitykseen, jossa muuttuvia kustannuksia ovat vain tariffi- ja energiakustannukset. Lämpöpumppulaitoksessa tulee lisäksi käyttö- ja huoltokustannukset, joita on ennalta vaikea arvioida. Energiakustannuksiltaan lämpöpumppulaitos on edullisin, mutta sillä on korkeimmat investointikustannukset.

Sähkölämmitys on tässä tapauksessa selvästi kallein lämmitystapa, mikä johtuu suuresta energiakustannuksesta ja suuren liittymätehon aiheuttamasta tariffikustannuksesta.

Tienpitäjän kannalta pohjaveden suojauksessa tien luiskasuojaukset ovat lämmitystä selkeästi edullisempi vaihtoehto.

4.6 Piha- ja katualueiden rakentamiskustannuksia

Suomessa kaukolämmöllä lämmitettävistä katulämmityskohteista vanhimmat ovat Jyväskylän kävelykatu (rak.v. 1995) ja Pohjois-Esplanadi (rak.v. 1998) Helsingissä. Lämmitykseen käytetään kaukolämmön paluuveden lämpöä (n. 40–50 °C). Taulukossa 7 esitetään em. kohteiden rakentamiskustannukset jaettuna pääkustannuseriin sekä kohteiden käyttökustannuksia.

Taulukko 7. Katulämmityksen rakentamis- ja käyttökustannuksia.

Investointikustannukset				Investointikustannukset				Investointikustannukset						
Kävelykatu, Jyväskylä				Kävelykatu, Pohjois-Esplanadi, Helsinki				Kävelykatu, Jorvas						
Pinta-ala 4 000 m ²		MAARA		Pinta-ala 4 300 m ²		MAARA		Pinta-ala 6 800 m ²		MAARA				
TYÖTILOTEOSSIS	MÄÄRÄ	KUSTANNUUS + alv [mil]	HUSTI m ² [ml/m ²]	Jakausta osa [%]	TYÖTILOTEOSSIS	MÄÄRÄ	KUSTANNUUS + alv [mil]	HUSTI m ² [ml/m ²]	Jakausta osa [%]	TYÖTILOTEOSSIS	MÄÄRÄ	KUSTANNUUS + alv [mil]	HUSTI m ² [ml/m ²]	Jakausta osa [%]
Energia					Energia					Energia				
- kaukolämpöytymä					- kaukolämpöytymä					- kaukolämpöytymä				
- sähkötytymä					- sähkötytymä					- sähkötytymä				
Lämmityskeskus					Lämmityskeskus					Lämmityskeskus				
- laite					- laite					- laite				
- asennus- ja putkivaihtykset					- asennus- ja putkivaihtykset					- asennus- ja putkivaihtykset				
Runkoputki					Runkoputki					Runkoputki				
- laite					- laite					- laite				
- asennustyö					- asennustyö					- asennustyö				
Jakotukit-käsitellyt					Jakotukit-käsitellyt					Jakotukit-käsitellyt				
- jakotukit					- jakotukit					- jakotukit				
- laite					- laite					- laite				
- asennus- ja vaihtotyö					- asennus- ja vaihtotyö					- asennus- ja vaihtotyö				
Pintaputkisto [ml]					Pintaputkisto					Pintaputkisto				
- putket+laitteet					- putket+laitteet					- putket+laitteet				
- työt					- työt					- työt				
Katunostot [m ²]					Katunostot					Katunostot				
- glykolivaihtotyö					- glykolivaihtotyö					- glykolivaihtotyö				
Muut työt					Muut työt					Muut työt				
- laite					- laite					- laite				
- työt					- työt					- työt				
Suunnittelu					Suunnittelu					Suunnittelu				
- suunnittelu					- suunnittelu					- suunnittelu				
- valvonta					- valvonta					- valvonta				
- muut työt					- muut työt					- muut työt				
summa	1 320 000	24	130,0		summa	2 000 000	670	160,0		summa	0	0	0,00	

Käyttökustannukset					Käyttökustannukset					Käyttökustannukset				
Käyttöenergia vuodessa [MWh]					Käyttöenergia vuodessa [MWh]					Käyttöenergia vuodessa [MWh]				
Vuosi	1996	1997	1998	1999	Vuosi	1997	1998	1999	2000	Vuosi	2000	2001		
Sähkö					Sähkö					Sähkö				
- sähkö [kWh]					- sähkö [kWh]					- sähkö [kWh]				
Lämpö	1 280	1 030	1 050	1 480	Lämpö					Lämpö	307 300	1 140 000		
- lämpö [kWh]	270	307	370	280	- lämpö [kWh]					- lämpö [kWh]	47 300	170 300		
- lämpö [ml]	272 300	309 000	390 000	280 400	- lämpö [ml]	190 000	190 000			- lämpö [ml]	55000	192 300		
- lämpö [ml]	54,47	71,60	58,00	56,00	- lämpö [ml]	45,49	47,21			- lämpö [ml]	6,20	30,00		
Säätöenergia [kWh]					Säätöenergia [kWh]					Säätöenergia [kWh]				
Aaltoenergia [°C d]					Aaltoenergia [°C d]					Aaltoenergia [°C d]				
Huom!					Huom!					Huom!				

Kuten taulukosta 7 nähdään, kustannusvaihtelu on 264–670 mk/m². Rakentamiskustannuksista runko- ja pintaputkisto aiheuttaa yli puolet kokonaiskustannuksista. Rakentamiskustannusvaihtelu on suuri, joten kahden kohteen perusteella on mahdoton päätellä yleispätevää investointikustannusta. Vuosittaiset käyttökustannukset ovat luokkaa 40–60 mk/m².

Taulukossa 8 esitetään erään kaukolämmön paluulämmöllä lämmitettävän 215 m²:n piha-alueen ja 3 100 m²:n torialueen rakentamiskustannukset ja vuotuiset käyttökustannukset.

Piha- ja torialueen rakentamiskustannus on samaa luokkaa kuin katualueen rakentamiskustannus riippuen pohjatöiden vaatimustasosta. Tori- ja katualueen neliöhinta nykyisellä kustannustasolla on 200–400 mk/m².

Taulukko 8. Piha- ja torialueen lämmityksen rakentamis- ja käyttökustannuksia.

Investointikustannukset					Investointikustannukset					
Torialue, Kuusankoski					Piha-alue, Hyvinkää					
rak.vuosi 2000					rak.vuosi 1994, 1996					
Pinta-ala					Pinta-ala					
3 100 m ²					215 m ²					
TYÖ-/TUOTEOSUUS	MÄÄRÄ	KUSTANNUS + alv [mk]	KUST./m ² [mk/m ²]	Jakautu- ma [%]	TYÖ-/TUOTEOSUUS	MÄÄRÄ	KUSTANNUS + alv [mk]	KUST./m ² [mk/m ²]	Jakautu- ma [%]	
Energia					Energia					
- kaukolämpöliittymä		50 000	16,13	4,93	- kaukolämpöliittymä					
- sähköliittymä					- sähköliittymä					
Lämmönjakokeskus		210 000	67,74	20,69	Lämmönjakokeskus					
- keskus					- keskus					
- asennus- ja purku					- asennus- ja purku					
- eristykset					- eristykset					
Runkoputki		80 000	25,81	7,88	Runkoputki					
- tarvikkeet					- tarvikkeet					
- asennustyö					- asennustyö					
Jakotukki+kaivot,työt		275 000	88,71	27,09	Jakotukki+kaivot,työt					
- jakotukit					- jakotukit					
- kaivot					- kaivot					
- sulku- ja säätövent					- sulku- ja säätövent					
Pintaputkisto		300 000	96,77	29,56	Pintaputkisto		22 360	104,00		
- putket+liittimet					- putket+liittimet					
- työt					- työt					
Kiertoneste					Kiertoneste		2 800	13,02		
- glykoli+inhibiitti					- glykoli+inhibiitti					
Maatyöt					Maatyöt					
- kaivuu					- kaivuu					
- täyttö					- täyttö					
Suunnittelu		100 000	32,26	9,85	Suunnittelu					
- suunnittelu					- suunnittelu					
- valvonta					- valvonta					
Muut kulut					Muut kulut					
summa		1 015 000	327	100,00	summa		25 160	117	0,00	
Käyttökustannukset					Käyttökustannukset					
Kulutettu energia vuodessa [MWh]					Kulutettu energia vuodessa [MWh]					
Vuosi					Vuosi					
		2000	2001				1996	1997	1999	2000
Sähkö					Sähkö					
- sähkö/m ²					- sähkö/m ²					
Lämpö			950,00		Lämpö	16,7	43,4			5,4
- lämpö/m ² [kWh/m2]			306,45		- lämpö/m ² [kWh/m2]	77,67	201,66			25,24
- ylläpitokust.[mk/a]			127 395		- ylläpitokust.[mk/a]	2 422	6 287			787
-ylläpitokust [mk/m2]			41,10		-ylläpitokust [mk/m2]	11,26	29,24			3,66
Sademäärä [mm]					Sademäärä [mm]					
Aste-päivä [°C d]					Aste-päivä [°C d]					
Huom !			marraskuu- huhtikuu		Huom !	marras-joulu	tamm- maal- is			helmikuu

Espoon Sampotorilla on toteutettu sähköllä lämmitettävä 400 m²:n grafiittiasfalttialue. Järjestelmän rakentamiskustannus on n. 750 mk/m² sisältäen grafiittiasfaltin laitteistoinneen (pohja-asfaltti, grafiittiasfalttikerros, eriste molemmin puolin grafiittiasfalttikerrosta, kaapelit asfaltissa, muuntajat ja syöttöjohdot). Järjestelmä voidaan tämän jälkeen

päällystää suoraan kulutuspinna-asfalttikerroksella, tai siihen voidaan asentaa tasaushiekka (maakosteaa betoni) ja pintalaatat. Pilottikohteena rakennettu alue otettiin käyttöön tammikuun puolessavälissä 2001, joten kulutuksen seurantatietojen perusteella on tässä vaiheessa mahdoton tehdä mitään johtopäätöksiä.

Piha- tai katualueen rakentamiskustannus sähkökaapelilämmityksellä on pohjatöiden osalta samaa luokkaa kuin vesilämmityksen, mutta kaapelointi tulee yleensä halvemmaksi kuin vesilämmityksen kokonaisinvestointikustannus, johon sisältyvät muoviputkisto, jakotukit, runkojohdot ja lämmönsiirrin sekä lämmönsiirtoneste. Sähköenergia on puolestaan kalliimpaa kuin kaukolämpö tai kylmäkoneiden lauhdelämpö.

5. Katulämmityksen mitoitus

5.1 Lumen sulatus pinnalta

Lämpöä siirtyy pinnalta lumeen johtumalla, joka kulutetaan lumen lämmittämiseen, sulattamiseen, vesifilmikerroksen haihduttamiseen ja lämpösäteilyyn pinnasta ilmaan. Periaatteena lumen sulattamisessa on, että vedeksi muuttunut lumi johdetaan valumavesinä sadevesikaivoihin. Jäljelle jäänyt kosteus haihdutetaan ilmaan, jotta katu- tai pihapinta saadaan kuivaksi uudelleen jäätymisen estämiseksi.

Lämmön tarve koostuu neljästä komponentista:

$$\begin{aligned} q &= q_s + q_h + q_m \text{ lumisateella} \\ q &= q_s + q_h + q_e \text{ lumisateen jälkeen} \end{aligned} \quad (7)$$

jossa q_s on lumen lämpötilan nostoon kuluva lämmitys

q_m on lumen sulattamiseen kuluva lämmitys

q_h on lämmön siirto pinnasta ilmaan

q_e on veden höyrystämiseen kuluva lämmitys.

Lumen lämpötilan nostoon tarvittava lämpö saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$q_s = 0,2778 \cdot 10^{-6} \cdot v_l \cdot (\rho_l c_{p,l} (T_s - T_y) + \rho_v c_{p,v} (T_f - T_s)), \quad (8)$$

jossa v_l on lumisateen määrä [mm/h]

ρ_l ja ρ_v ovat lumen ja veden tiheydet [kg/m³]

$c_{p,l}$ ja $c_{p,v}$ ovat lumen ja veden ominaislämpökapasiteetit [kJ/kg, °C]

T_s on lumen lämpötila [°C]

T_f on vesifilmikerroksen lämpötila [°C]

T_y on ympäristön lämpötila [°C].

Lumen sulattamiseen tarvittava lämpö saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$q_m = 0,2778 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_l v_l r_l, \quad (9)$$

jossa r_l on lumen sulatuslämpö [kJ/kg, °C].

Lämmönsiirto pinnasta ilmaan koostuu konvektio- ja säteilyosasta, jota kuvataan yhtälöllä:

$$q_h = \alpha_c (T_f - T_y) + \sigma \varepsilon_e (T_f^4 - T_{ym}^4), \quad (10)$$

jossa α_c on konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{kJ}/\text{m}^2, ^\circ\text{C}$]
 σ on Stefan-Boltzmanin vakio ($5,670 \text{ W}/\text{m}^2(100\text{K})^4$)
 ε on pinnan emissiokerroin (0,5–1,0)
 T_f on vesifilmikerroksen absoluuttinen lämpötila [K]
 T_{ym} on ympäröivän ilman absoluuttinen keskilämpötila [K].

Konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle voidaan esittää mm. seuraava riippuvuus

$$\alpha_h = 0,037 \left(\frac{\lambda_i}{L} \right) \text{Re}_L^{0,8} \text{Pr}^{0,33}, \quad (11)$$

jossa λ_i on ilman lämmönjohtavuus
 Re on Reynoldsin luku ($= \text{Re}_L = vL/\nu$)
 v on tuulen nopeus
 ν on ilman kinemaattinen viskositeetti
 L on pinnan karakteristinen mitta poikittain tuulen suuntaan (käytännössä pinnan lyhyempi sivu)
 Pr on Prantlin luku ($=\nu/\alpha \sim 0,7$).

Ympäristön keskilämpötilaan vaikuttaa pilvisyysaste ja ilman suhteellinen kosteus. Ympäristön keskilämpötila voidaan määrittää seuraavasti

$$T_{ym} = (T_{yp}^4 \psi + T_{yk}^4 (1 - \psi))^{1/4}, \quad (12)$$

jossa T_{yp} on pilvisen ilman lämpötila [K]
 T_{yk} on kirkkaan ilman lämpötila [K]
 ψ on pilvisyysaste (0–1,0).

Kirkkaalle (pilvettömälle) ilmalle lämpötila määritellään seuraavasti

$$T_{yk} = T_y - (1,1058 \cdot 10^3 - 7,562 \cdot T_y + 1,333 \cdot 10^{-2} \cdot T_y^2 - 31,292 \cdot f + 14,58 \cdot f^2), \quad (13)$$

jossa T_y on ympäristön ilman absoluuttinen lämpötila [K]
 f on ilman suhteellinen kosteus (0,00–1,00).

Pilviselle taivaalle määritellään lämpötila

$$T_{yp} = T_y - 19,4, \quad (14)$$

jossa lämpötilat ovat absoluuttisia lämpötiloja [K].

Veden höyrystyminen pinnalta määritellään

$$q_e = \rho_{ki} \alpha_m (x_{if} - x_{iy}) \cdot r_v, \quad (15)$$

jossa ρ_{ki} on kuivan ilman tiheys

α_m on aineen siirtymisvakio vedestä ilmaan

x_{if} on ilman kosteus vesifilmikerroksen lämpötilassa

x_{iy} on ympäröivän ilman kosteus ympäristön lämpötilassa

r_v on veden höyrystymislämpö [kJ/kg].

Aineen siirtymisvakio voidaan ilmaista lämmön siirtymisvakion avulla

$$\alpha_m = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\alpha_k}{\rho_{ki} c_{pi}}, \quad (16)$$

jossa Pr on Prantlin luku

Sc on Schmidtin luku ($\eta/D_x M$; M = moolimassa

D_x = mooliosuuteen perustuva diffuusiokerroin)

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg, °C].

Ilman vesipitoisuus saadaan yhtälöstä

$$x_i = 0,62197 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right), \quad (17)$$

jossa p_v on vesihöyryn osapaine ilmassa

p on ilmanpaine.

Lumensulatustehon laskentaesimerkki

Tarkastelun lähtöarvot:

Uuden lumen tiheys 100 kg/ m³

Sulatettavan lumikerroksen paksuus 150 mm = 15 kg/ m²

Sulatusaika 5 h

Sulatusnopeus = 30 mm/ m² h = 3 kg/ m² h

Vaadittava lumensulatusteho

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (18)$$

jossa Q_1 = lumen tilavuuslämpökapasiteetti

Q_2 = lumen sulatuksen vaatima lämpö

$$Q_1 = \Delta T \times V \times q_1$$

$$\Delta T = 5 \text{ K } (-5-0)$$

$$V = 0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$q_1 = 0,209 \text{ MJ}/\text{m}^3$$

$$K = 58 \text{ Wh}/\text{m}^3 \text{ K}$$

$$Q_1 = 5 \text{ K} \times 0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 58 \text{ Wh}/\text{m}^3 \text{ K} = 43,5 \text{ Wh}/\text{m}^2/5\text{h} = 8,7 \text{ W}/\text{m}^2$$

(lumen lämmitys $-5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 0$)

$$\begin{aligned} \text{Lumen sulamislämpö} \quad q_2 &= 80 \text{ kcal}/\text{kg} \\ &= 93 \text{ Wh}/\text{kg} \end{aligned}$$

$$Q_2 = 93 \text{ Wh}/\text{kg} \times 3\text{kg}/\text{m}^2, h = 279 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$Q_1 + Q_2 = 287 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (\text{sulatusnopeus } 30 \text{ mm}/\text{h})$$

Lumen sulatusnopeus $30 \text{ mm}/\text{h}/\text{m}^2$ edellyttää lämmitystehoa $287 \text{ W}/\text{m}^2$. Katulämmityksen mitoitustehona on käytetty yleisesti $300 \text{ W}/\text{m}^2$. Käytetty lämmitysteho riittää siis sulattamaan noin 30 mm lunta tunnissa, koska sulatustilanteessa lämmönsiirto pinnasta ilmaan on vähäistä ja lähes kaikki lämmitysteho voidaan käyttää lumen sulatukseen.

5.2 Katulämmityksen lämmitystehomitoitus

Katulämmityksen lämmitystehomitoitukseen vaikuttavat katurakenteen ja maaperän lämpötekniset ominaisuudet sekä paikalliset ilmasto-olosuhteet. Näiden lisäksi lämmitystehomitoituksessa tulee ottaa huomioon vaadittava lumensulatusnopeus. Rakennetuissa katulämmityskohteissa on käytetty lämmityksen mitoitustehona $300 \text{ W}/\text{m}^2$, mikä on todettu riittävän pitämään kadun pinnan sulana noin $-13 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaan. Tätä alemmissa lämpötiloissa lämmitysteho yleensä alennetaan nimellisteholle, jolla estetään nestekiertoisissa järjestelmissä kiertonesteen jäätyminen. Näissä lämpötiloissa myös lumisateet ovat harvinaisia.

5.2.1 Lämmönsiirtokertoimet

Lämmitystehotarkasteluissa on eri yhteyksissä käytetty lämmönsiirtokertoimille mm. seuraavia arvoja:

(Sipilä 2000, ei kirjallinen lähde):

maasta lumeen	$400 + 20 (T_m - 2) \text{ W/ m}^2, \text{ K}$ ($T_m =$ maaperän keskilämpötila)
lumesta ilmaan	$8 + 4 w^{0,6} \text{ W/ m}^2, \text{ K}$ ($w =$ tuulen nopeus)
maasta ilmaan	$9 + 6 w \text{ W/ m}^2, \text{ K}$.

(Lindroos 2000, ei kirjallinen lähde):

kadusta ilmaan	$15\text{--}20 \text{ W/ m}^2, \text{ K}$ (käytettävillä laskenta-arvoilla maksimiarvo on $20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)
kadusta lumeen	$500 \text{ W/ m}^2, \text{ K}$ (arvio).

5.2.2 Lämpötila- ja materiaalitiedot

Lämpötekniisten laskelmien ilman lämpötilat olivat katurakenteissa tarkastelutilanteessa $-13 \text{ }^\circ\text{C}$ ja siltarakenteessa -13 ja $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. Pohjamaan lämpötilaksi annettiin lähtötilanteessa $+3 \text{ }^\circ\text{C}$. Katurakenteissa oletettiin kadun pinnan ja ilman väliseksi lämmönsiirtokertoimeksi $16,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Reunakiven kohdalla laskelmat tehtiin kiven ja ilman välisillä lämmönsiirtokertoimilla $16, 7, 100, 500$ ja $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Taulukossa 9 on esitetty lämpötekniisten laskelmien materiaaliikohtaiset parametrit.

Taulukko 9. Lämpötekniisissä laskelmissa käytetyt materiaaliikohtaiset parametrit.

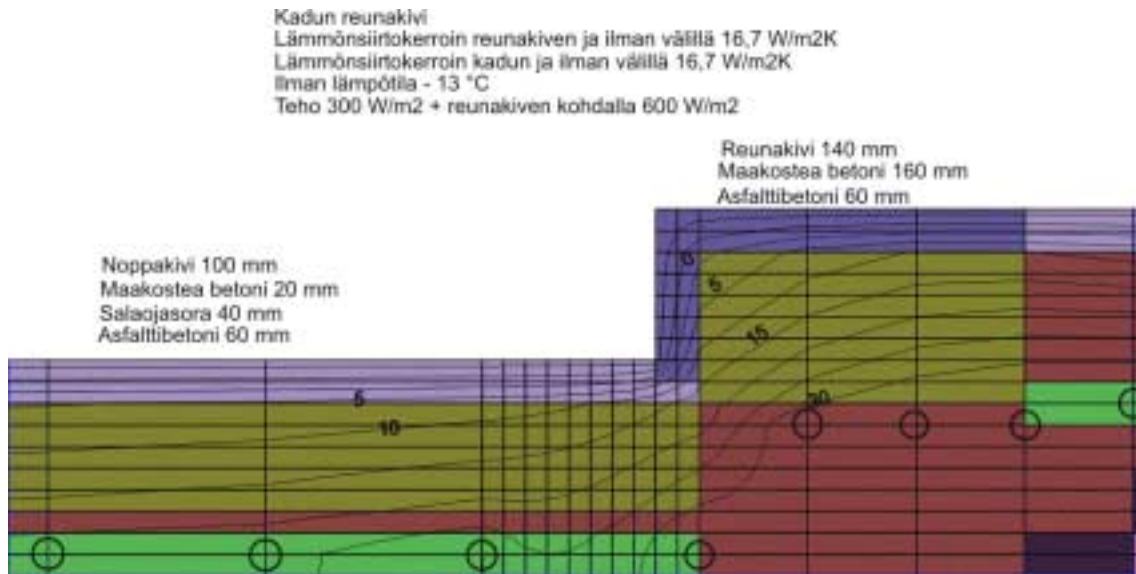
Parametri	Yks.	Pohjamaa	Sora	Murske	Asfaltti	Asennushiekka	Betoni kivi	XPS-eriste
Kuivatilavuuspaino	kg/m^3	1350	1800	1800	2200	1900	2300	30
Vesipitoisuus	til.-%	45,0	7,2	5,4	2,2	22,8	2,0	2,0
Jäätymislämpö	Wh/m^3	41 808	6 696	5 022	2 046	21 204	2 139	1 860
Lämmönjohtavuus	W/Km							
–sula		1,50	1,58	1,40	1,1	2,56	1,7	0,037
–jäätynyt		2,50	1,12	0,92	1,5	3,34	1,7	0,037
Tilavuuslämpökapasiteetti sulana	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	2 900	1 658	1 583	2 050	2 387	2 180	60
Tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	1 960	1 507	1 545	2 050	1 909	2 180	60

5.2.3 Lämmitysteholaskenta ilman lumensulatusta

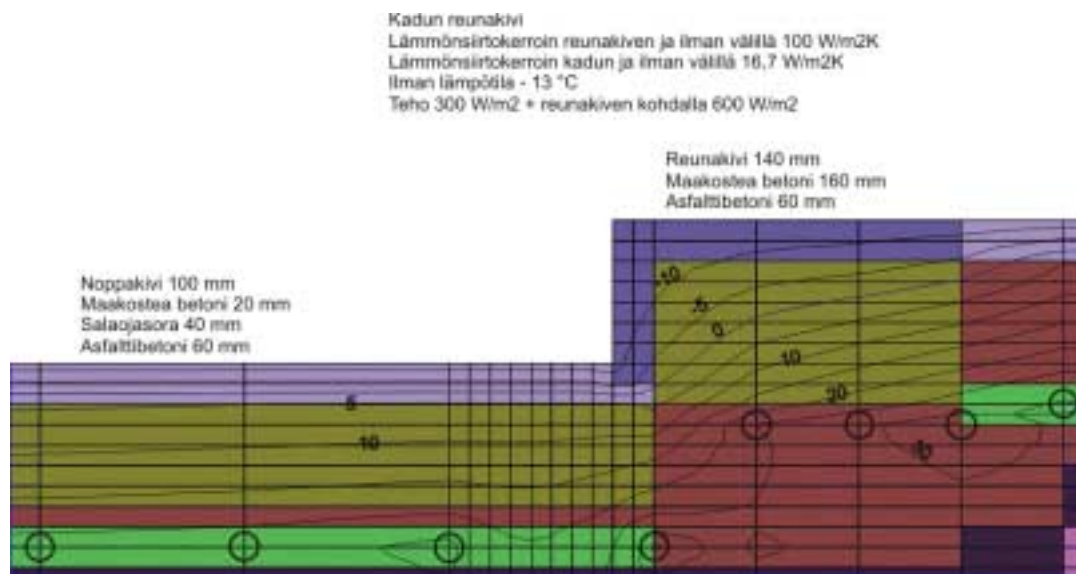
Lämmitysteholaskennat tehtiin 2-ulotteisella TEMP/W-elementtiohjelmistolla. Seuraavassa esitetään graafisessa muodossa katulämmityksen lämmitysteholaskennan tuloksia. Laskentaan valittiin erilaisia toteutettuja ja suunnitteilla olevia lämmitettävän katurakenteen rakenneratkaisuja sekä erikoisrakenneratkaisuja, kuten kadun reunakiven lämmitystehotarkastelu sekä lämpöeristämättömän ja lämpöeristetyn sillan kannen päällysrakenteen lämmitystehotarkastelu.

Lasketut katurakenneratkaisut ja laskennan lähtöparametrivalinnat tehtiin yhteistyössä LVI-Insinööritoimisto Lindroos Oy:n kanssa, joka on suunnitellut useita katulämmityskohteita eri puolilla Suomea. Toteutetuissa kohteissa on normaalitapauksissa käytetty lämmitystehoa 300 W/m^2 , jonka on todettu riittävän noin -13 °C :n lämpötilaan saakka. Katujen pintalämpötilatavoite oli $+3 \text{ °C}$. Lämmitysteholaskennalla haluttiin tarkistaa lämmitystehon riittävyys sekä tarkentaa lämmitystehomitoitusta erikoisrakenteissa, kuten kadun reunakiven alueella. Lisäksi haluttiin tutkia laskennallisesti lämmöneristeen vaikutusta ja tarpeellisuutta erilaisissa katu- ja siltarakenneratkaisuissa.

Lämmitysteholaskennan tuloksia on esitetty kuvissa 20–25 sekä taulukossa 10. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty lämpötilojen tasa-arvokäyriä kadun reunakiven lähiympäristössä. Kadun yhteydessä lämmitysteho oli 300 W/m^2 ja reunakiven alla 600 W/m^2 . Kuvissa 20 ja 21 ylin materiaalikerros ei ole todellista rakennekerrosta, vaan se on kerros, jolla mallille voidaan antaa kadulle ja reunakivelle erilaisia lämmönsiirtokerroin ko. materiaalin ja ilman välille. Kuvista 20 ja 21 voidaan havaita, että mikäli lämmönsiirtokerroin reunakiven ja ilman välillä on alle $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, riittää lämmitysteho mitoitusilmasto-olosuhteissa pitämään reunakiven sulana. Jos lämmönsiirtokerroin reunakiven ja ilman välillä on $100 \text{ W/m}^2\text{K}$, sijaitsee 0 °C -lämpötilaisotermi selvästi syvemmillä reunakivessä.



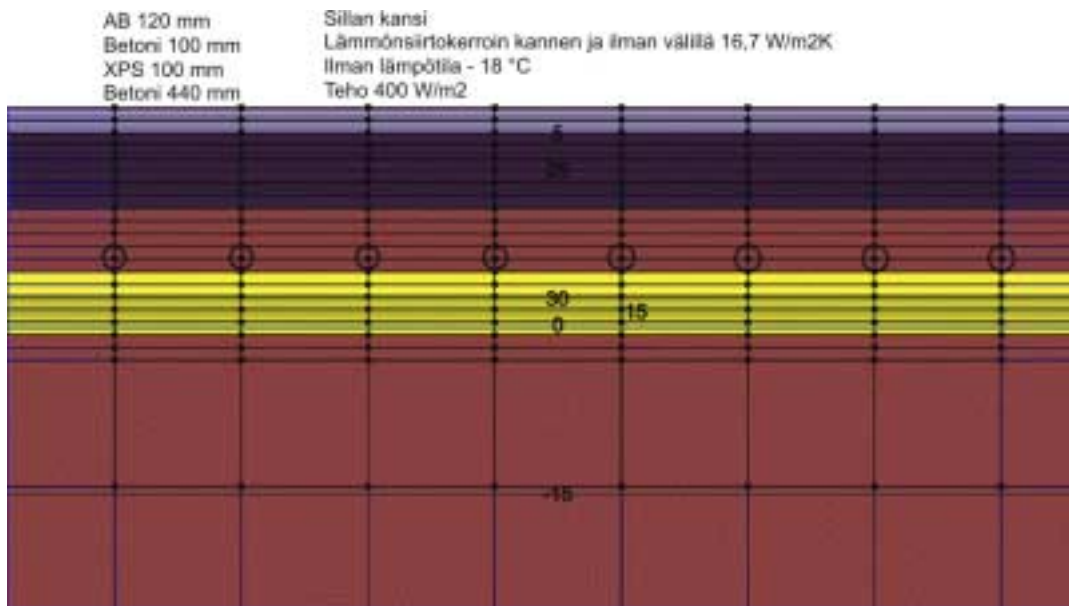
Kuva 20. Kadun reunakiven lämmitystarkastelu, lämmönsiirtokerroin 16,7 W/m²K.



Kuva 21. Kadun reunakiven lämmitystarkastelu, lämmönsiirtokerroin katukivestä ilmaan 100 W/m²K, reunakivestä ilmaan 16,7 W/m²K.

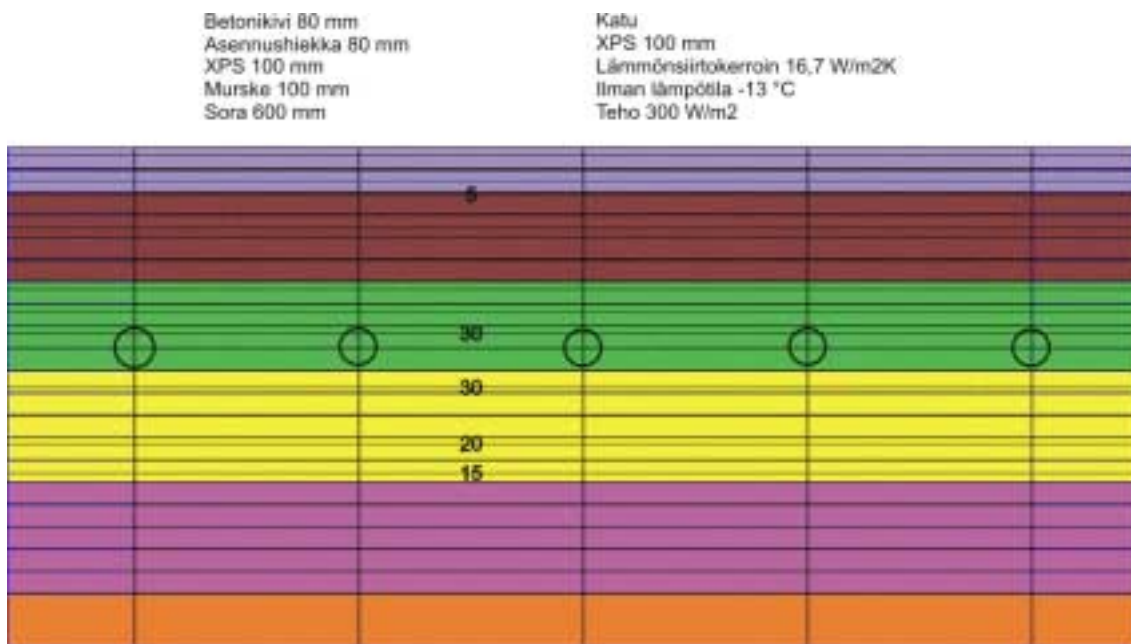
Kuvassa 22 on esitetty lämpötilojen tasa-arvokäyrät sillan kansirakenteen yhteydessä, jossa lämmöneristeenä on XPS 100 mm ja lämmitysteho 400 W/m². Mitoitusilmasto-olosuhteissa (-18 °C) sillan pintalämpötila oli laskemien mukaan +4,3 °C. Lämmitystehosta suuntautui 93 % pintaan päin ja 7 % lämmöneristeen alapuolelle. Mitoituslämpötilaolosuhteissa (-13 °C) lämmitysteho 300 W/m² ja XPS 60 mm:n lämmöneristys on riittävä. Laskelmissa päällysteen pintalämpötilaksi saatiin + 3,2 °C (kadun pinnan mitoituslämpötilaksi on asetettu +3 °C). Ilman alapuolista lämpöeristystä mitoituslämpötila-

lassa (-13 °C) toimivaa sillan kansirakenteen lämmitystä lasketuilla tehoilla 300–400 W/m² ei voida toteuttaa, ks. laskelmat taulukko 10.

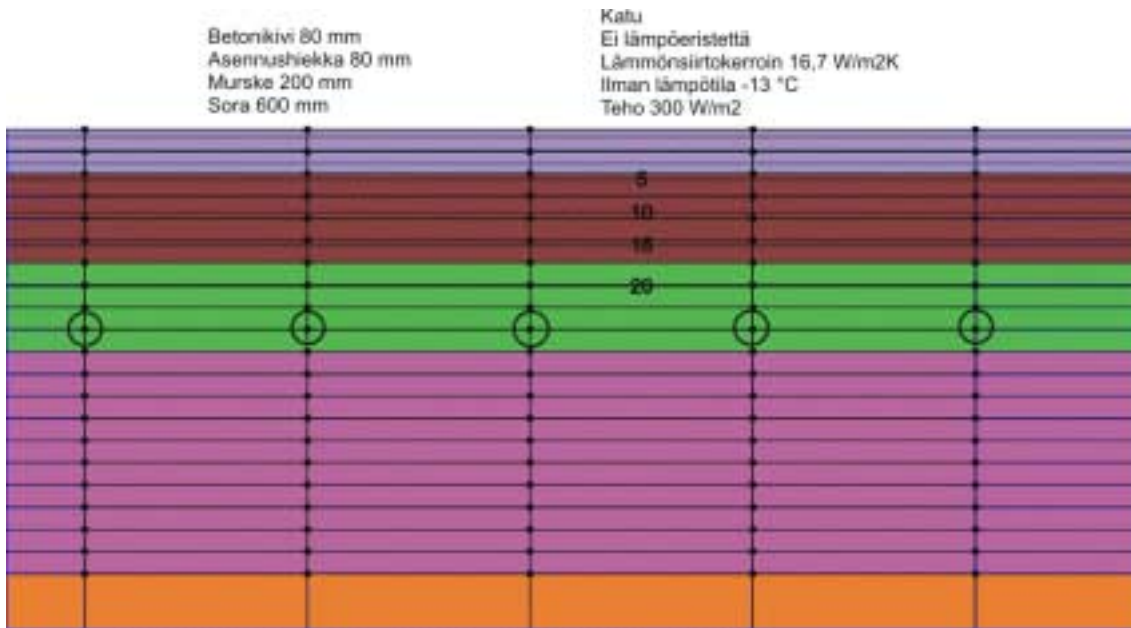


Kuva 22. Sillan kansirakenteen lämmitystehotarkastelu, lämmitysteho 400 W/m², lämmöneristys alaspäin XPS 100 mm.

Kuvissa 23 ja 24 on esitetty lämpötilojen tasa-arvokäyriä eristetyssä (XPS 100 mm) ja eristämättömässä katurakenteessa. Kuvassa 25 on esitetty vertailu kokonaistehon prosenttiosuudesta, joka siirtyy putkistotasolta alaspäin, kun putkiston alla on eristettä 100 mm tai 60 mm tai rakenne on eristämätön.

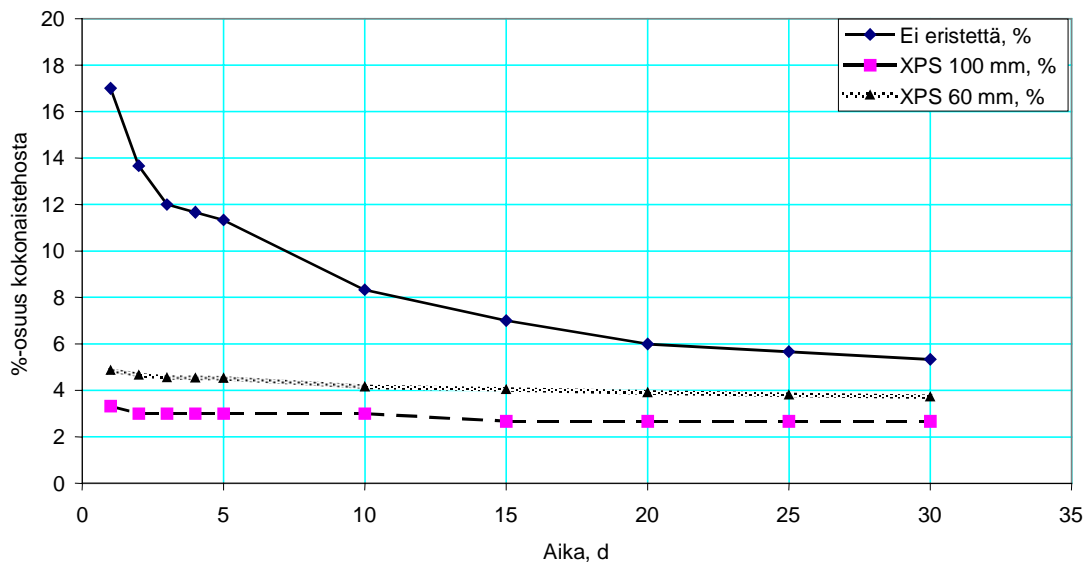


Kuva 23. Katurakenteen lämmitystehotarkastelu, XPS 100 mm, teho 300 W/m².



Kuva 24. Katurakenteen lämmitystehotarkastelu, ei lämpöeristystä, teho 300 W/m².

Vertailu eristämättömän ja eristetyin katurakenteen lämmön siirtymisestä putkistotasolta alaspäin. Teho on 300 W/m².



Kuva 25. Vertailu eristämättömän ja eristetyin katurakenteen lämmönsiirtymisestä putkistotasolta alaspäin. Eristeenä 100 mm ja 60 mm suulakepuristettua polystyreeniä (XPS). Lämmitysteho on 300 W/m².

Taulukossa 10 on esitetty lämpöteknisillä laskelmilla tarkastellut rakenteet, rakennekerrokset, käytetyt lämmitystekot, saavutetut pintalämpötilat sekä laskelmissa käytetyt mitoituslämpötilat.

Taulukko 10. Laskentojen tulokset.

Rakenne	Rakennekerrokset	Eristepaksuus, mm	Teho	Pintalämpötila, °C	Mitoituslämpötila, °C
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 100 Betoni 440	100	400	+4,3	-18
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 100 Betoni 440	100	400	+9,3	-13
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 60 Betoni 480	60	400	+3,6	-18
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 60 Betoni 480	60	400	+8,5	-13
Silta	AB 120 Betoni 100 Betoni 540	ei eristettä	400	-3,4	-18
Silta	AB 120 Betoni 100 Betoni 540	ei eristettä	400	+1,5	-13
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 60 Betoni 480	60	300	-1,8	-18
Silta	AB 120 Betoni 100 XPS 60 Betoni 480	60	300	+3,2	-13
Silta	AB 120 Betoni 100 Betoni 540	ei eristettä	300	-6,9	-18
Silta	AB 120 Betoni 100 Betoni 540	ei eristettä	300	-2,1	-13
Katu	Betonikivi 80 Asennushk 80 XPS 100 Murske 100 Sora 600		300	+4,5	-13

Katu	Betonikivi 80 Asennushk 80 XPS 60 Murske 100 Sora 600		300	+4,2	-13
Katu	Betonikivi 80 Asennushk 80 Murske 200 Sora 600		300	+3,8	-13

5.3 Nestekiertoisen lämmönjakojärjestelmän mitoitus

Lämmitysteho koko pinnalle saadaan yhtälöstä

$$\Phi = q \cdot A = \left(\frac{T_o - T_{ap}}{R} \right) \cdot A, \quad (19)$$

jossa A on lämmitettävä pinta-ala [m²]

T_o on putken pintalämpötila [°C]

T_{ap} on alustan pintalämpötila [°C]

R on lämpövastus putken pinnalta lämmitettävään pintaan.

Kiertonesteen keskilämpötila on

$$T_k = (T_t + (T_t - \Delta T_j)) / 2 = T_t - \frac{1}{2} \Delta T_j, \quad (20)$$

jossa T_t on kiertonesteen tulolämpötila

ΔT_j on kiertonesteen jäähtytys putkistossa (= Φ/(c_pm')).

Lämmönsiirtokerroin maasta lumeen on

$$\alpha_{ml} = a + b \cdot (T_{ap} - c), \quad (21)$$

jossa a, b ja c ovat vakioita

T_{ap} on pinnan lämpötila.

Lämmitysputkisto asennetaan alustamateriaaliin syvyydelle h_a . Asennussyvyyden lämpövastus on

$$R_a = h_a / \lambda_{am}, \quad (22)$$

jossa λ_{am} on alustamateriaalin lämmönjohtavuus [W/m,K].

Pintamateriaalin lämpövastus on

$$R_{pm} = h_{pm} / \lambda_{pm}, \quad (23)$$

jossa h_{pm} on pintamateriaalin paksuus [m]
 λ_{pm} on pintamateriaalin lämmönjohtavuus [W/m,K].

Putkiston asennussyvyys on siten

$$h = h_a + h_{pm}. \quad (24)$$

Lämpövastus putkesta lumeen lasketaan yhtälöstä

$$R_{pl} = R_{am} + R_{pm} + 1 / \alpha_{ml}. \quad (25)$$

Lämpövastus putkiston alapuolelle on

$$R_{pa} = \frac{h_e}{\lambda_e} + \frac{h_{ea}}{\lambda_{ea}} + \frac{h_{am} - h_a}{\lambda_{am}}, \quad (26)$$

jossa h_e on eristeen paksuus (jos on lämpöeristetty)
 h_{ea} on eristeen alla olevan maakerroksen paksuus
 h_{am} on alustamateriaalin paksuus
 λ_e on eristeen lämmönjohtavuus
 λ_{ea} eristeen alustamaan lämmönjohtavuus.

Putken ripavaikutus alustamateriaaliin arvioidaan seuraavasti:

Ripavaikutus on

$$\omega = f \cdot \sqrt{\frac{(1/R_{pl} + 1/R_{pa})}{\lambda_a \cdot d_u}}, \quad (27)$$

jossa f on vakio $\sqrt{2/\Pi}$
 d_u on putken ulkohalkaisija [m].

Ripahyötysuhde on

$$\eta_r = \frac{\tanh(\omega \cdot s / 2)}{\omega \cdot s / 2}, \quad (28)$$

jossa s on putkijako
 $\tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$, jossa $x = \omega \cdot s / 2$.

Putken pinta lämpötila T_o saadaan yhtälöstä

$$T_o = (R_{pl} / \eta_r) \cdot q + T_{ap}. \quad (29)$$

Putken lämpövastus lasketaan yhtälöstä

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_u}{d_s}, \quad (30)$$

jossa λ_p on putkimateriaalin lämmönjohtavuus [W/m,K]
 d_u on putken ulkohalkaisija [m]
 d_s on putken sisähalkaisija [m].

Putkijako saadaan yhtälöstä

$$s = \frac{f(T_k)}{\left(\frac{1}{R_{pl}} + \frac{1}{R_{pa}}\right) \cdot R_{pl} \cdot \alpha_{pl} \cdot (T_{ap} - T_l) - \frac{1}{R_{pa}} \cdot (T_o - T_{am})}, \quad (31)$$

jossa T_l on sulavan lumen lämpötila ($= 0$ °C)
 T_{am} on putkiston alapuolisen maan lämpötila [°C]
 $f(T_k)$ on putken lämmönluovutuskykyä lämmönsiirtonesteen kuvaava funktio [W/m] keskilämpötilassa T_k , joka saadaan yhtälöstä

$$f(T_k) = 2 \cdot \pi^2 \cdot \lambda_p (T_k - T_o) \cdot d_u / \ln\left(\frac{d_u}{d_s}\right), \quad (32)$$

jossa λ_p on putkimateriaalin lämmönjohtavuus.

Putkimäärä saadaan laskettua yhtälöstä

$$L = A / s, \quad (33)$$

jossa A on lämmitettävä ala [m^2].

Siirtonesteen massavirta saadaan yhtälöstä

$$m' = \frac{q \cdot A}{c_{pm} \cdot T_j}. \quad (34)$$

Nesteen virtausnopeudeksi saadaan

$$v = \frac{4 \cdot m'}{\rho_n \pi \cdot d_s^2}, \quad (35)$$

jossa ρ_n on nesteen tiheys [kg/m^3]
 d_s on putken sisähalkaisija [m].

Putkilenkin painehäviö Δp [kPa] lasketaan yhtälöstä

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \xi \cdot \rho_n \cdot \frac{l \cdot v^2}{d_s}, \quad (36)$$

jossa l on yhden putkilenkin pituus [m]
 ζ on putken kertavastuksien aiheuttama kerroin
 ξ on virtausvastuskerroin.

Virtausvastuskerroin saadaan yhtälöstä

$$\xi = \frac{0,25}{\left(\ln\left(\frac{k}{3,7 \cdot d_s} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}}\right) / \ln(10)\right)^2}, \quad (37)$$

jossa k on putken karheus [mm]
 d_s on putken sisähalkaisija [mm].

Reynoldsinluku määritellään

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d_s}{\nu}, \quad (38)$$

jossa v on nesteen virtausnopeus putkessa
 ν on nesteen kinemaattinen viskositeetti [m^2/s].

Putkilenkkien määräksi saadaan

$$n = \frac{L}{l}, \text{ kun } \Delta p = f(l, d_s, m) \leq \Delta p_{\max}. \quad (39)$$

Määritellään jakotukki, johon putkilenkit kytketään.

Jakotukin pituus L_{jk} valitaan sopivasti ja valitaan montako putkilenkkiä lähtee samasta kohtaa jakotukin kehältä. Putkilenkkien jakovälin pituus jakotukissa on

$$l_{jt} = \frac{L_{jt} - L_{jt1} - L_{jt2}}{n^* - 1}, \quad (40)$$

jossa L_{jt1} ja L_{jt2} ovat jakotukin päätyjen vapaat osuudet.
 n^* on jakotukista lähtevien putkilenkkiryhmien lukumäärä.

Jakotukin massavirta on

$$m = \sum_{i=1}^N m_i, \quad (41)$$

jossa m_i on putkilenkin massavirta ja
 N jakotukista lähtevien putkilenkkien määrä.

Jakotukin halkaisija on

$$D_i = \sqrt{2 \cdot N} \cdot d_i, \quad (42)$$

jossa d_i on putkilenkin sisähalkaisija.

Jakotukin painehäviö on

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{n^*} 0,5 \cdot \zeta_{jt1} \cdot \zeta_{jt} \cdot \rho_n \cdot \frac{l_{jt} \cdot (v_{i-1} - n \cdot \frac{d_i^2}{D_i^2} \cdot v_p)^2}{D_i} + 0,5 \cdot \zeta_{jt} \cdot \zeta_{jt} \cdot \rho \cdot \frac{L_{jt1} \cdot v_{jt}^2}{D_i}, \quad (43)$$

jossa n on ryhmälähdöstä lähtevien putkilenkkien määrä ($N = n^* \cdot n$)
 v_i on nesteen virtausnopeus kullakin jako-osuudella ($v_0 = v_{jt}$)

ζ_{jtl} on putkilenkin haarautumisvastuskerroin ($= 1,01 \cdot n$)
n on jaon kohdalla haarautuvien putkilenkkien määrä
 ξ_{jt} on jakotukin virtausvastuskerroin jaon osuudella (saadaan aiemmasta yhtälöstä)
 ρ_n on nesteen tiheys
 ζ_{jtt} on virtauksen hidastumisesta johtuva vastuskerroin ($= 1 + (1 - D_1^2/D_i^2)^2$),
jossa D_1 on tulevan jakeluputken halkaisija ja D_i on jakotukin halkaisija.

5.4 Laskentamallin kuvaus

5.4.1 Yleistä

Projektissa on kehitetty laskentamalli piha- ja katualueiden nestekiertoisten sulanapitojärjestelmien suunnittelun avuksi. Laskentamalli on toteutettu Microsoft Excel-
-taulukkolaskentaohjelman avulla. Käytetty ohjelmaversio on Excel 97, ja mallia on testattu Windows NT 4.0 -käyttöjärjestelmässä.

Laskentamalli on suunniteltu asiantuntijan työkaluksi. Malli ei suorita varsinaista optimointia, vaan laskee annetuilla lähtöarvoilla tarvittavan vähimmäisputkimäärän, jolla haluttu lämmitysteho saadaan siirrettyä.

Mallissa on kaksi osaa: lämmöntarpeen laskenta sekä varsinainen putkiston mitoitus. Näitä voidaan haluttaessa käyttää toisistaan riippumattomina, eli mallin laskeman lämmöntarpeen sijasta voidaan putkiston mitoitukseen käytettävä tehontarve antaa myös käsin.

5.4.2 Lämmöntarpeen laskenta

Mallin osana on lomake lumen sulatukseen tarvittavan lämpötehon laskemiseksi eri olosuhteissa. Lähtötietoina annetaan ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, pilvisuusaste, tuulen nopeus sekä lumisateen määrä. Malli laskee tarvittavan lämpötehon lumen lämpötilan nostamiseksi, lumen sulattamiseksi ja sulaneen valumaveden jälkeen jääneen kosteuden höyrystämiseksi sekä pinnalta ilmaan siirtyvän lämpötehon (kuva 26).

Osa lämmöntarpeen laskennasta on ohjelmoitu Excelin VBA-makrokielellä mutta käyttäjän kannalta laskenta toimii tavallisena Excel-lomakkeena. Lähtötiedot syötetään niille varattuihin soluihin, ja kun jotakin lähtöarvoa muutetaan, laskenta päivittyy automaattisesti ja uudet tulokset näkyvät niille varatuissa soluissa.

Mallin laskemaa tehontarvetta voidaan käyttää suoraan putkiston mitoituksen lähtötietona, mutta mitoitusteho voidaan myös antaa käsin.

Lämmitettävä ala	x	25	m	
	y	40	m	
	A	1000	m ²	
Lämmöntarve	q	243	W/m ²	
	qs	31,2	W/m ²	lumen lämpötilan nostoon tarvittava lämpöteho
	qm	92,6	W/m ²	lumen sulatukseen tarvittava lämpöteho
	qh	119,5	W/m ²	lämmön siirto pinnasta ilmaan
	qe	45,7	W/m ²	veden höyrystäminen (filmikerros)
Lähtötiedot:	v1	10	mm/h	sateen määrä
	Ts	-2	°C	lumen lämpötila
	Tf	0,56	°C	vesifilmikerroksen lämpötila
	Ty	-5	°C	ympäristön lämpötila
	v	5	m/s	tuulen nopeus
	f	0,8		ilman suhteellinen kosteus
	ψ	0,6		pilvisyysaste

Kuva 26. Lämmöntarpeen laskenta.

5.4.3 Putkiston mitoitus

Putkiston mitoitusohjelma laskee mitoitusolosuhteissa halutun tehon siirtämiseksi tarvittavan putkitiheyden ja siitä edelleen putkilenkkien pituudet. Ohjelma ei suorita optimointia, vaan laskee pienimmän putkimäärän, joka riittää tuottamaan halutun lämmitystehon annetuilla painehäviö- ja virtausnopeusalueilla. Annettujen kustannustietojen mukaisesti ohjelma laskee materiaalikustannukset neliometriä kohti pintaputkistolle, jakotukeille ja kaivoille (kuva 27). Lasketun painehäviön sekä arvioidun vuotuisen käyttäjän ja sähkön hinnan perusteella malli laskee pumppauskustannukset vuositasolla.

Ohjelma sijoittaa käyttäjän määrittelemälle suorakulmion muotoiselle alueelle yhden putkiryhmän, ts. jakotukin ja siihen liittyvät putkilenkit. Laskettaessa laajaa aluetta, johon tarvitaan useita putkiryhmiä, on suunnittelijan itse arvioitava miten putkiryhmät kannattaa sijoittaa. Jos kyseessä on katualueen (tai muun pitkän, kapeahkon alueen) laskenta, työ on suoraviivaista, koska käytännössä yksi putkiryhmä kattaa kadun koko leveyden ja “optimoitavaksi” jää vain putkiryhmän pituus ja jakotukin sijoitus. Laskettaessa leveämmän alueen mitoitusta on putkiryhmien sijoittelussa enemmän vaihtoehtoja ja suunnittelija joutuu tekemään enemmän työtä optimiratkaisun etsimiseksi. Putkiryhmien sijoittelun optimointia ei haluttu rakentaa malliin sisään, sillä monesti piha- tai torialueet sisältävät istutuksia, rakennuksia, suihkulähteitä ja erilaisia maaston muotoja tms., jotka rajoittavat lämmityspotkiston sijoittelua. Mallin avulla suunnittelija voi kuitenkin helposti vertailla eri vaihtoehtojen kustannuksia.

Pintaputket							
Tunnus	ds mm	du mm	min säde mm	hinta mk/metri	karheus m	lämmönjohtavuus W/m,K	
P20	16	20	50	10	0,0005	5,00	
P25	20,4	25	62,5	12	0,0005	5,00	
P32	26,2	32	80	19	0,0005	5,00	

Jakotukki, putkilähdöt vain toiselta puolelta					
lähtöjä muhvia/m	hinta mk/m	ds mm	du mm	karheus m	
DN100	6	1550	90	100	0,03

Jakotukki, putkilähdöt molemmilta puolilta					
lähtöjä muhvia/m	hinta mk/m	ds mm	du mm	karheus m	
DN100	12	2500	90	100	0,03

Kuva 27. Putkitiedot.

Mitoituslaskennan lähtötietoja ovat:

- tehontarve (W/m^2)
- kiertonesteen tulolämpötila ja haluttava jäähdytys pintaputkistossa
- alustan ja putken alapuolisen maan lämpötilat
- asennustiedot:
 - pintamateriaalin paksuus ja laatu (lämmönjohtavuus)
 - asennussyvyys alustamateriaaliin ja alustamateriaalin laatu (lämmönjohtavuus)
 - mahdollisen eristekerroksen paksuus ja eristeen laatu (lämmönjohtavuus)
 - alapuolisen maakerroksen paksuus ja lämmönjohtavuus
 - minimi- ja maksimi-arvot virtausnopeudelle ja putkilenkin painehäviölle
- tieto jakotukin sijoituksesta putkiryhmään nähden. Vaihtoehtoja on neljä:
 - alueen lyhyemmän sivun reunassa (putkilenkit yhteen suuntaan pidemmän sivun suuntaisina)
 - alueen pidemmän sivun reunassa (putkilenkit yhteen suuntaan lyhyemmän sivun suuntaisina)
 - alueen keskellä lyhyen sivun suuntaisena (putkilenkit kahteen suuntaan pidemmän sivun suuntaisina)
 - alueen keskellä pitkän sivun suuntaisena (putkilenkit kahteen suuntaan lyhyemmän sivun suuntaisina)

Putkiston mitoitusmalli on suurimmaksi osaksi ohjelmoitu Excelin VBA-makrokielellä. Suurin osa lähtötiedoista annetaan Excel-lomakkeen soluihin, osa valitaan lomakkeella olevista valikoista. Kun lähtötiedot on syötetty, käynnistetään laskenta lomakkeella ole-

vasta toimintopainikkeesta. Kun laskenta on valmis, ohjelma kirjoittaa tulokset tuloslomakkeen soluihin.

5.4.4 Laskentaesimerkkejä

Esimerkki 1. 10 000 m² laajuisen katualueen lämmitysputkiston mitoitus.

Kohdealue on asfaltoitu katu, lämmitettävän alueen leveys 16 ja pituus 625 metriä. Mitoitustehontarpeena käytettiin 300 W/m², kiertonesteen tulolämpötilana 37°C, vaadittavana jäähtymisenä 7°C, painehäviön sallittuina arvoina 1,0–5,0 kPa sekä virtausnopeuden sallittuina arvoina 0,3–1,0 m/s.

Mallilla laskettiin, minkä kokoisiksi ryhmiksi lämmitysputkisto kannattaa jakaa ja miten jakotukki kannattaa sijoittaa.

Laskelmien mukaan (taulukko 11) edullisimmaksi tulee ratkaisu, jossa jakotukit sijoitetaan kadun suuntaisesti keskelle katua ja kukin tukki syöttää 16 x 17,5 m laajuista aluetta. 2,9 metrin pituisesta jakotukista lähtee 17 putkilenkkiä kumpaankin suuntaan, ja yhden putkilenkin pituus on 33 metriä. Tällöin putkistokustannuksiksi saadaan 132 mk/m², joka sisältää pintaputkiston, jakotukit sekä kaivot. Jos jakotukki joudutaan jostain syystä sijoittamaan alueen reunaan, saadaan putkistokustannuksiksi 140 mk/m². Tässä laskelmassa ei ole otettu huomioon asennuskustannuksia ja niiden mahdollisia eroja jakotukin sijoituksessa.

Jos putkisto jaetaan pienemmiksi ryhmiksi, alkaa yksikkökustannus kasvaa jakotukin ja ennen kaikkea kaivojen kustannusten kohdistuessa pienemmälle alueelle. Esimerkiksi 12,5 x 16 m alueella putkistokustannuksiksi laskettiin 136 mk/m², jolloin koko putkisto tulisi 41 kmk kalliimmaksi. Painehäviön pienemisen ansiosta pumppauskustannus jäisi vuodessa hieman alhaisemmaksi, mutta ei kuitenkaan niin merkittävästi, että kalliimpaan putkistoon kannattaisi investoida.

Suuremmilla ryhmillä puolestaan painehäviö- ja virtausnopeusvaatimukset eivät enää täyty.

Taulukko 11. Esimerkkitapauksen 1 laskentatulokset.

Putkitunnus		P25	P25	P25
Alue	m x m	16 x 17,5	16 x 12,5	16 x 17,5
Jakotukin sijainti		3	3	2
Tulolämpötila	°C	37,0	37,0	37,0
putkijako	mm	257	260	257
silmukoita		68	48	34
silm/lenkki		2	2	1
lenkkeja		34	24	34
painehäviö yht	kPa	3,88	3,76	3,74
virtausnopeus	m/s	0,30	0,30	0,29
lenkin pituus	m	33	33	32
liitosputket	m	275	139	201
putkea yhteensä	m	1 381	920	1 298
putkikustannus	mk	16 571	11 037	15 575
jakotukkien pituus	m	2,85	2,02	5,69
jakotukkien kustannus	mk	14 267	10 100	17 629
putket + tukit yht	mk	30 838	21 137	33 204
kaivot+lähdöt	mk	6 000	6 000	6 000
putkistot yhteensä	mk/m²	132	136	140
pumpp. hyötysuhde	%	90 %	90 %	90 %
pumppausteho	kW	1,3	1,2	1,2
käyttöaika	h/a	2 000	2 000	2 000
sähkön hinta	mk/kWh	0,4	0,4	0,4
pumppauskust.	kmk/a	1,01	0,99	0,97
Koko alaa kohti:				
putkistot	kmk	1 316	1 357	1 400
pumppauskustannus	kmk/a	35,9	35,2	34,6

Esimerkki 2. Lämmitysputkiston mitoitus 1 000 m² laajuiselle piha-alueelle.

Kohdealue on torialue, lämmitettävän alueen leveys 25 ja pituus 40 metriä. Mallilla laskettiin, minkä kokoiseksi ryhmiksi lämmitysputkisto kannattaa jakaa ja miten jakotukki kannattaa sijoittaa. Mitoituksen lähtötiedot olivat tässä osittain erilaiset kuin edellisessä esimerkissä.

Laskelmien mukaan (taulukko 12) kolme vaihtoehtoa on materiaalikustannuksiltaan hyvin lähellä toisiaan. Ratkaisu, jossa yksi jakotukki on keskellä aluetta lyhyen sivun suuntaisena, on mallin mukaan yhtä edullinen kuin ratkaisu, jossa torialue jaetaan kahteen 12,5 x 40 metrin alueeseen. Näiden putkistokustannuksiksi saatiin 122 mk/m². Seuraavaksi edullisin oli ratkaisu, jossa alue jaettiin kolmeen 8,33 x 40 metrin lohkoon, joissa kussakin jakotukki syöttää yhtä putkiryhmää. Tämän vaihtoehdon kustannuksiksi tuli 125 mk/m². Vielä neljäskin vaihtoehto, jossa alue jaetaan kahteen 20 x 25 metrin lohkoon, oli kustannuksiltaan vain noin 5 % kalliimpi kuin halvimmaksi arvioidut. Tämän vaihtoehdon materiaalikustannus oli 129 mk/m². Eri vaihtoehtojen painehäviöt ja sen seurauksena pumppauskustannukset olivat lähes samansuuruiset, eli niidenkään perusteella ei voida suoraan sanoa, mikä vaihtoehdoista todella olisi edullisin. Malli ei nykyisellään ota huomioon asennuskustannuksia, eli niiden erot eri vaihtoehdoissa jäävät suunnittelijan arvioitavaksi. Laskentamalli on muutenkin suunnittelijan työkalu ja apuväline, eikä se voi antaa yksiselitteistä vastausta. Suunnittelija voi kuitenkin mallilla haarukoida edullisimmat vaihtoehdot selvästi kalliimmista ja tehdä sen jälkeen ratkaisun omien arviointiensa sekä paikallisten olosuhteiden perusteella.

Taulukko 12. Esimerkkitapauksen 2 laskentatulokset.

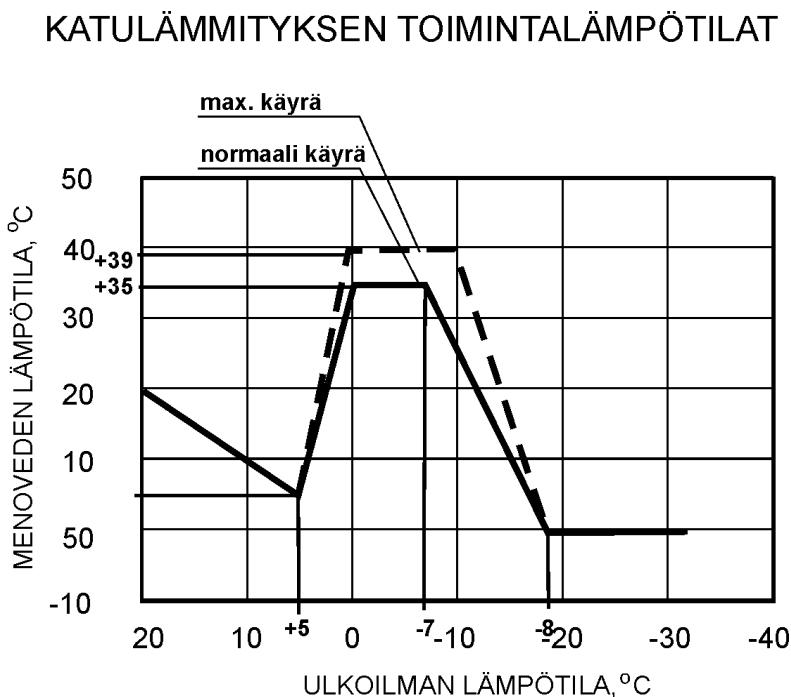
		P25	P25	P25
Tulolämpötila	°C	37,0	37,0	37,0
Alue		25 x 40	12,5 x 40	8,33 x 40
Jakotukin sijainti		3	3	3
Tulolämpötila	°C	37,0	37,0	37,0
putkijako	mm	162	164	167
silmuoita		154	76	50
silmlenkki		2	2	2
lenkkejä		77,0	38,0	25,0
painehäviö yht	kPa	4,77	4,63	4,67
virtausnopeus	m/s	0,46	0,47	0,47
lenkin pituus	m	80	80	80
liitosputket	m	833	212	85
putkea yhteensä	m	7 018	3 264	2 093
putkikustannus	mk	84 212	39 171	25 122
jakotukkien pituus	m	6,44	3,19	2,10
jakotukkien kustannus	mk	32 183	15 933	10 517
putket + tukit yht	mk	116 396	55 104	35 639
kaivot+lähdöt	mk	6 000	6 000	6 000
putkistot yhteensä	mk/m²	122	122	125
pumpp. hyötysuhde	%	90 %	90 %	90 %
pumppausteho	kW	2,4	2,4	2,4
käyttöaika	h/a	2 000	2 000	2 000
sähkön hinta	mk/kWh	0,4	0,4	0,4
pumppauskust.	kmk/a	1,95	1,92	1,96

6. Lumen sulatuksen säätö- ja valvontajärjestelmä

6.1 Säätö- ja valvontajärjestelmän toteutus

Lumensulatusjärjestelmän energiankulutuksen minimoimiseksi järjestelmä vaatii ympärivuorokautisen säätö-, ohjaus- ja valvontajärjestelmän sekä asiantuntevan käyttöhenkilöstön seuraamaan laitteiden toimintaa. Lumensulatusjärjestelmän säätö-, ohjaus- ja valvontajärjestelmäksi suositellaan elektronista DDC-pohjaista järjestelmää, jolla voidaan toteuttaa monimutkaisia säätö- ja ohjaustoimenpiteitä sekä liittää kaikki säätö-, ohjaus- ja valvontatoiminnot johonkin ympärivuorokautisella miehityksellä ja/tai päivytyksellä varustettuun kaukovalvontajärjestelmään. Kaukolämpöön pohjautuvassa lumensulatusjärjestelmissä käytetään pääasiallisesti kaukolämmön paluuvesienergiaa. Aina on tehtävä kuitenkin liittymä myös kaukolämmön tulovesiputkesta sellaisia lumisadeolosuhteita varten, joissa paluueden lämpötila on liian alhainen riittääkseen järjestelmän huipputehon tarpeisiin (ulkolämpötiloilla $+5\text{ °C}$ -5 °C).

Kuvassa 28 esitetään katulämmityksen menoveden lämpötilan ohjekäyrä ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 28. Katulämmityksen menoveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta.

Lumen sulatusjärjestelmän periaatteellinen kytkentä esitetään kuvassa 29.

Ulkolämpötilan ollessa alle raja-arvon (+5 °C) pumppu P1 käy ja lämpökeskus pitää katulämmitysverkoston menoveden lämpötilan TE1.11 kohdalla ulkoilman lämpötilasta riippuvassa arvossa kuvan mukaan ohjaamalla sarjassa venttiiliä FV1.13 ja FV1.14.

Katukiveyksen pintalämpötila (TE1.15 ja TE1.16 keskiarvo) rajoittaa säädön toimintaa siten, ettei lämpötila nouse yli raja-arvon (+3 ... +5 °C).

Katulämmitysverkoston paluueden lämpötilan TE1.12 ei sallita laskea alle raja-arvon (0 °C). Paluueden rajoitussäädöllä on korkeampi prioriteetti muihin säätöihin nähden.

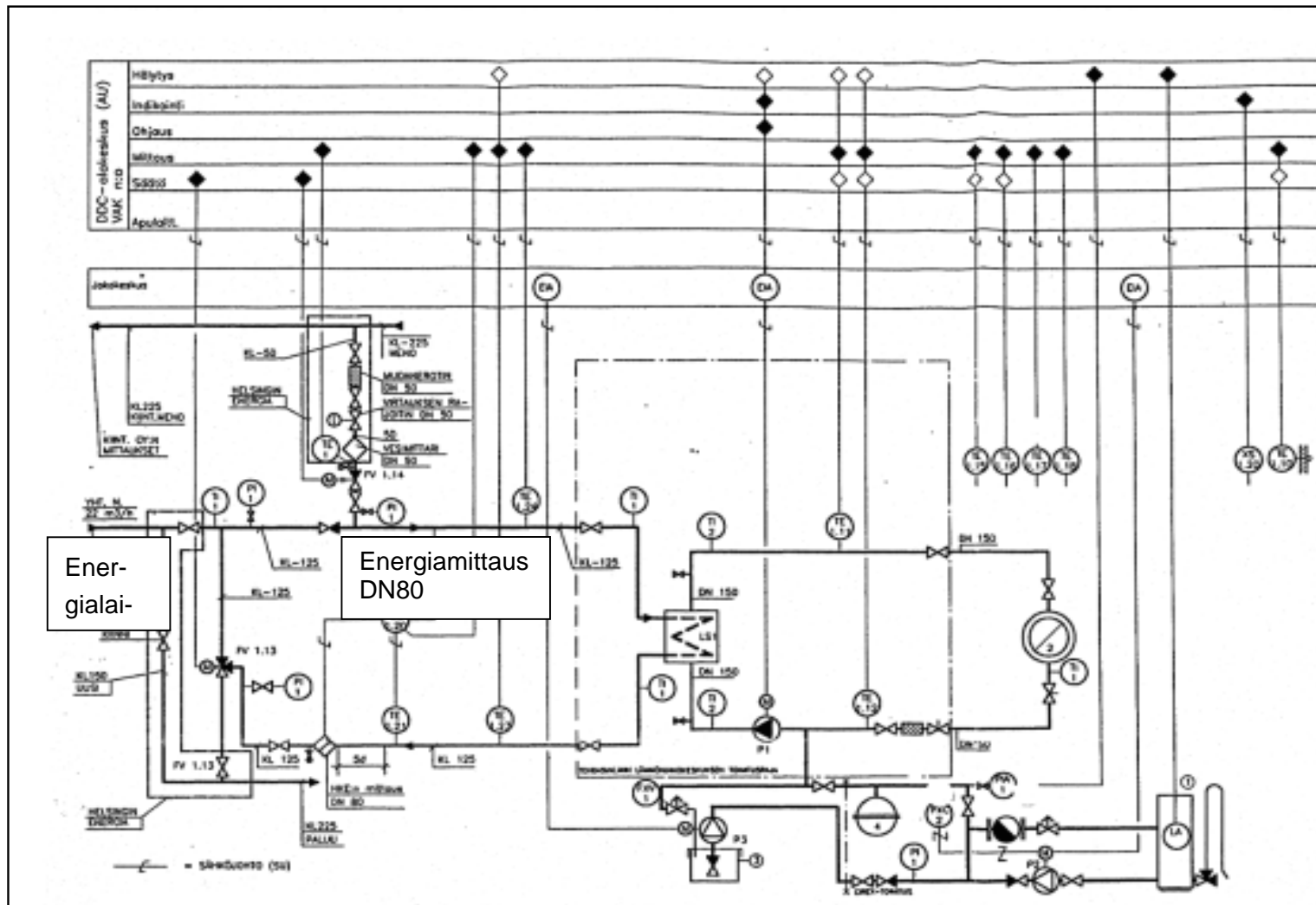
Mikäli lumianturi XS1.20 tunnistaa lumisateen, pysyy menoveden lämpötila säätökäyrän mukaisessa maksimiarvossaan, vaikka ulkolämpötila olisi alle -7 °C

Lumianturin lumisateen tunnistuksen poistuttua palautuu säätö viiveen (esim. 4 h) jälkeen normaaliin säätöön. Mikäli lumianturin lumisateen tunnistus ei palaudu 24 tunnissa, palautuu säätö myös normaaliin säätöön ja tapahtuu hälytys. Kuittaus suoritetaan säätökeskuksen kuittauspainikkeelta.

Mikäli kaukolämmön paluueden lämpötila TE1.23 kohdalla laskee alle raja-arvon (+3 °C), pysähtyy pumppu P1 ja venttiilin FV1.13 vaihtimelta tuleva haara avautuu ja tapahtuu hälytys. Kuittaus suoritetaan säätökeskuksen kuittauspainikkeella.

Ulkolämpötilan ollessa yli +5 °C:n, pumppu P1 on pysäytettynä ja venttiilit FV1.13 ja FV 1.14 ovat kiinni. Alakeskus käyttää seisokkiaikana pumppua P1 minuutin vuorokaudessa.

Katulämmityksen säädön vastetta vallitsevassa säätilanteessa voidaan nopeuttaa lumianturin lisäksi ilmanpainemittauksella ja/tai Ilmatieteen laitoksen säätutkan ennusteella, jonka perusteella pystytään antamaan hyvinkin tarkat muutaman tunnin ennusteet säätilan kehityksestä, kuten maatilojen sääennustepalvelu on osoittanut.



Kuva 29. Lumen sulatusjärjestelmän periaatteellinen kytkentä kaukolämpöjärjestelmään (lähde: LVI-Lindroos Oy).

6.2 Säätojärjestelmän kehitys

Suomen ensimmäinen nykyaikainen katulämmitys- ja lumensulatusjärjestelmä, pinta-alaltaan n. 5 000 m², otettiin käyttöön Jyväskylän keskustan kävelykadulla lokakuun puolivälissä v. 1995. Katulämmityksen säätö- ja ohjausjärjestelmänä on DDC-pohjainen järjestelmä, jossa tehoa säädetään järjestelmään menevän veden lämpötilaa muuttamalla, liuospuolen 3-tiesäätöventtiilillä. Kun katulämmitys otettiin käyttöön, ei säätöjärjestelmä toiminut vielä automaattisesti, vaan järjestelmää ohjattiin käsikäytöllä syksyn 1995 ajan. Kun säätöjärjestelmä saatiin toimimaan v. 1996 tammikuussa, voitiin pian havaita, että tietyissä olosuhteissa, kun lunta ei ollut satanut ja katupinta oli aivan kuiva, nousi kadun pintalämpötila +13 °C:seen ulkoilman lämpötilan ollessa -17 °C. Säätojärjestelmän toimintaa muutettiin siten, että aktivoitiin toinen pintalämpötilamittauksista rajoittamaan kadun pintalämpötilaa, ettei se nouse yli +3 °C:n.

Toisena vuonna säätöjärjestelmää käytettiin ensimmäisen vuoden aikana tehtyjen muutosten mukaisesti siten, että asetuksia käytiin muuttamassa ja valvomassa järjestelmän toimintaa lähes päivittäin.

Kolmantena vuonna säätöjärjestelmää käytettiin samanlaisena kuin edellisinä vuosina, mutta paikalla käytiin vain tarvittaessa.

Neljänneksi käyttövuodeksi säätöjärjestelmään lisättiin lumisadetuntoelin, ja järjestelmä liitettiin ympärivuorokautiseen valvontaan.

Kehittämistyön vaikutusta järjestelmän toimintaan ja energiansäästöön kuvaa viiden vuoden tilasto taulukossa 13.

Kuten taulukosta 13 havaitaan, niin säätö-, ohjaus- ja valvontajärjestelmän toiminnalla voidaan vaikuttaa paljon katulämmitys- ja lumensulatusjärjestelmän energiankulutukseen ja kustannuksiin (energiahinnalla 180 mk/MWh, vaihtelu = n. 21,- mk/m², a).

Taulukko 13. Kehitystoimenpiteiden vaikutus Jyväskylän kävelykadun energiankulutukseen viiden vuoden aikana.

Käyttövuosi	1. vuosi	2. vuosi	3. vuosi	4. vuosi	5. vuosi
Kulutus MWh/m ² ,a	0,409	0,311	0,411	0,310	0,292
Lämmityskausi	95–96	96–97	97–98	98–99	99–00

Helsingissä Pohjois-Esplanadin ja Kluuvikadun katulämmityksen vuosikulutus talvikautena 99–00 on ollut 0,270 MWh/m²,a, joka vastaa Helsingin ja Jyväskylän kulutusvertailussa suunnilleen astepäivälukujen erotusta. Helsingissä on pintaputkiston alla käytetty asfaltin sijasta solumuovieristeitä, millä ei näyttäisi olevan vaikutusta vuosikulutukseen.

7. Yhteenveto

Lämmityksen käyttö katu- ja liikennealueiden lumen poistossa sekä liukkaudentorjunta-keinona on yleistymässä erityisesti kaupunkikeskustojen kävelykatualueilla ja liikekeskusten piha- ja ulkoalueilla. Yhä useammin myös liikennealueita, mm. bussitermiinaaleja, pysäkkejä, liittymiä sekä siltoja ja rampeja, suunnitellaan lämmitettäväksi. Kaupunkien keskusta-alueilla lumen poistosta ja kuljetuksesta sekä hiekoituksesta aiheutuu suuret vuotuiset kustannukset. Liukkauden torjuntaan käytetty hiekka joudutaan myös keväällä nopeasti poistamaan pölyhaittojen takia. Liukkauden torjuntaa suolalla on pyritty vähentämään ympäristöhaittojen takia. Lumen poistoa talvella katuja lämmittämällä on kokeiltu ensimmäisenä Jyväskylän keskustan kävelykadulla ja Helsingissä Etelä-Esplanadin jalkakäytävällä. Lämmittäminen perustuu kaukolämmön paluukierrosta saatavaan energiaan, jolla lumi ja jää sulatetaan katualueelta. Katujen lumen sulatusjärjestelmiä käytetään laajasti myös muualla, mm. muissa Pohjoismaissa, USA:ssa ja Kanadassa sekä Japanissa, jossa vanhimmat sähkölämmitteiset katulämmitysjärjestelmät ovat olleet käytössä jo yli 40 vuotta.

Lämmönlähteitä voivat olla kaukolämpö, sähkö, lauhdelämpö, jätelämpö sekä maa-, kallio- tai vesistölämpö yhdistettynä lämpöpumppulaitokseen.

Yli 300 m²:n suuruisen alueen katulämmitysjärjestelmä on järkevää toteuttaa rakentamalla putkisto kadun alle ja käyttämällä lämmön siirto-aineena pakkasen kestävää vesiliuosta. Katulämmitys suunnitellaan siten, että kadun pintalämpötila pysyy n. +3 °C:ssa, joka mahdollistaa kaikkien ns. matalalämpöisten energialähteiden käytön järjestelmän lämmönlähteenä. Lumen sulatukseen tarvittava lämmitysteho on n. 300 W/m², mikä riittää pitämään lumisateella 30 mm/h tien pinnan sulana -13 °C:n ulkolämpötilassa. Tätä alemmilla ulkolämpötiloilla lämmitysteho yleensä alennetaan nimellisteholle, jolla estetään nestejärjestelmissä kiertonesteen jäätyminen. Tätä alemmissa lämpötiloissa myös lumisateet ovat harvinaisia. Käyttökokemusten mukaan katualueita lämmitetään Suomessa n. 1 000 tuntia vuodessa

Projektissa tutkittiin 9 erilaista lämmitettyä katurakennetta, joille on tehty jännitystila- ja muodonmuutoslaskelmat ja verrattu eri rakenneratkaisujen toimivuutta. Samoja rakenneratkaisuja on käytetty mallinnettaessa katurakenteen lämpökäyttäytymistä ja tarvittavaa lämpötehomitoitusta. Laskelmien perusteella lämmitetyssä katurakenteessa lämmöneristeellä ei ole kovin suurta merkitystä lämmitystehomitoitukseen eikä energiakulutukseen. Toimiva lämmitys sillan kansirakenteessa sen sijaan edellyttää alapuolista lämpöeristystä.

Katulämmityksen vaikutusta kaukolämmön paluulämpötilan aleneman kautta CHP-tuotantoon tutkittiin myös. CHP-voimalaitoksen kattilan 100 %:n kuormituksella ja

kaukolämmön 2 °C:n paluulämpötilan laskulla saadaan lisäsähkötehoa ja -lämpötehoa n. 0,3 % ja 50 %:n kattilateholla lisäys on n. 0,6 %. Jos lämmitettävän katualueen jäähdytys on 15 °C ja lämmityksen mitoitustehona käytetään 300 W/m², niin kaukolämmön paluueden 2 °C:n lämpötilan pudotukseen tarvitaan noin 5,4 MW:n lämmitysteho ja 18 000 m² lämmitettävää katuosuutta, mikä merkitsee noin 1 000 m 18 m levyistä katua.

Kylmäkoneet tuottavat lauhdelämpöä toimisto- ja liikekiinteistöissä ympäri vuoden. Kylmäkoneiden lauhdelämpö on yleensä 35–45 °C:n lämpötilassa ja sopii hyvin myös piha- ja katualueiden lämmittämiseen. Jos piha- tai katualueen lämmitystarve on 300 W/m², niin kompressorikoneen kylmä-MW kohden tuottamalla lauhdelämmöllä voidaan sulattaa maksimissaan n. 4 000 m² ja absorptiokoneen lauhteella vastaavasti n. 8 000 m² piha- tai katualuetta.

Sähkölämmityskaapeli asennetaan samoin kuin vesiputkijärjestelmä kivetyksen tai katusasfalttikerroksen alle kevytasfaltti- tai hiekkakerrokseen. Kaapelin asennusväli on 5–30 cm. Kaapeli asennetaan ajoradan tai kävelytien poikittaissuuntaan siten, että ajoradan suuntainen matka on mahdollisimman lyhyt. Asennettavia kaapeleita on kolmea eri tyyppiä: vakiovastus-, vakioteho- ja vakiolämpötilakaapeli.

Grafiittilämmitys koostuu sähkökaapeleista ja asfalttiin sekoitetusta sähköä johtavasta grafiitista. Sähkökaapeleihin johdetaan sähkövirta, joka aiheuttaa sähkökentän vaihejohtimen ja 0-johtimen välille. Grafiitti toimii johtimena, joka lämpiää ja lämmittää samalla ympärillä olevan asfalttikerroksen.

Katulämmityksen investointien kustannusvaihtelu on 300–700 mk/m². Rakentamiskustannuksista runko- ja pintaputkisto aiheuttaa yli puolet kokonaiskustannuksista. Vuositaiset käyttökustannukset ovat luokkaa 4–60 mk/m². Piha- ja torialueen investointien neliöhinta nykyisellä kustannustasolla on 200–400 mk/m² ja käyttökustannukset 30–50 mk/m².

Espoon Tapiolassa Sampotorilla on toteutettu Suomen ensimmäinen sähköllä lämmitettävä n. 400 m²:n grafiittiasfalttialue. Järjestelmän rakentamiskustannus on n. 750 mk/m² sisältäen grafiittiasfaltin laitteistoinen.

Piha- tai katualueen pohjatöiden rakentamiskustannus sähkökaapelilämmityksellä on samaa luokkaa kuin vesilämmityksen, mutta kaapelointi tulee yleensä halvemmaksi kuin vesilämmityksen kokonaisinvestointikustannus. Sähköenergia on puolestaan kalliimpaa kuin kaukolämpö tai kylmäkoneiden lauhdelämpö.

Tiealueen eri lämmitystapojen investointi-, energia- ja käyttökustannusvertailu osoittaa, että pohjavesilämmitys lämpöpumpulla ja kaukolämmitys ovat nykyarvotarkastelun

perusteella kustannuksiltaan lähes samanhintaiset. Sähkölämmitys on selvästi kallein lämmitystapa, mikä johtuu suuresta energiakustannuksesta ja suuren liittymätehon aiheuttamasta tariffikustannuksesta. Tienpitäjän kannalta pohjaveden suojauksessa tien luiskasuojaukset ovat lämmitystä selkeästi edullisempi vaihtoehto.

Projektissa kehitettiin myös laskentamalli piha- ja katualueiden nestekiertoisen sulanapitojärjestelmän suunnitteluun. Malli ei suorita varsinaista optimointia, vaan laskee annetuilla lähtöarvoilla tarvittavan vähimmäisputkimäärän, jolla haluttu lämmitysteho saadaan siirrettyä lämmitettävään pintaan. Lähtötietoina annetaan ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, pilvisuusaste, tuulen nopeus sekä lumisateen määrä. Mallissa on kaksi osaa, joita voidaan käyttää myös toisistaan riippumatta. Malli laskee tarvittavan lämpötehon lumen lämpötilan nostamiseksi, lumen sulattamiseksi ja sulaneen valumaveden jälkeen jääneen kosteuden höyrystämiseksi, sekä pinnalta ilmaan siirtyvän lämpötehon. Putkiston mitoitusohjelma laskee mitoitusolosuhteissa halutun tehon siirtämiseksi tarvittavan pienimmän putkitiheyden ja putkilenkkien pituudet sekä jakotukin mitoituksen annetuilla painehäviö- ja virtausnopeusalueilla. Annettujen kustannustietojen mukaisesti ohjelma laskee materiaalikustannukset neliometriä kohti pintaputkistolle, jakotukeille ja kaivoille. Lasketun painehäviön sekä arvioitun vuotuisen käyttöajan ja sähkön hinnan perusteella malli laskee pumppauskustannukset vuositasolla.

Lumensulatusjärjestelmän energiankulutuksen minimoimiseksi järjestelmään rakennetaan lumisateen tunnistimella varustettu säätö-, ohjaus- ja valvontajärjestelmä, joka voidaan liittää kaukovalvontajärjestelmään. Katulämmityksen säädön vastetta välttävissä säätilanteessa voidaan nopeuttaa lumianturin lisäksi ilmanpainemittauksella ja/tai Ilmatieteen laitoksen säätutkan ennusteella, jonka perusteella pystytään antamaan hyvinkin tarkat muutaman tunnin ennusteet säätilan kehityksestä.

Lähdeluettelo

Koljonen, T. & Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 53 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1926.) ISBN 951-38-5334-9; 951-38-5335-7
WWW: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>

Lindroos, R. 2000. Katu 2000. Katulämmitys/lumensulatus. Julkaisematon käsikirjoitus.

NGU, Norges geologiske undersøkelse. 1998. Årsrapport 1998.31 s.

PEXEP Oy. 1990. LUMIKKI. Lumen sulatuksen mitoitusohjelmisto, ohjelman kuvaus. 24 s.

Ramsey, J. W. & al. 1999. Updated design guidelines for snow melting systems. ASHRAE, CH-99-17-2 (RP-926). 11 s.

Liite A: Lämmitettävien katurakenteiden jännitystilalaskelmat

RAPORTTI

LT-Infra/JTa

22.04.1998

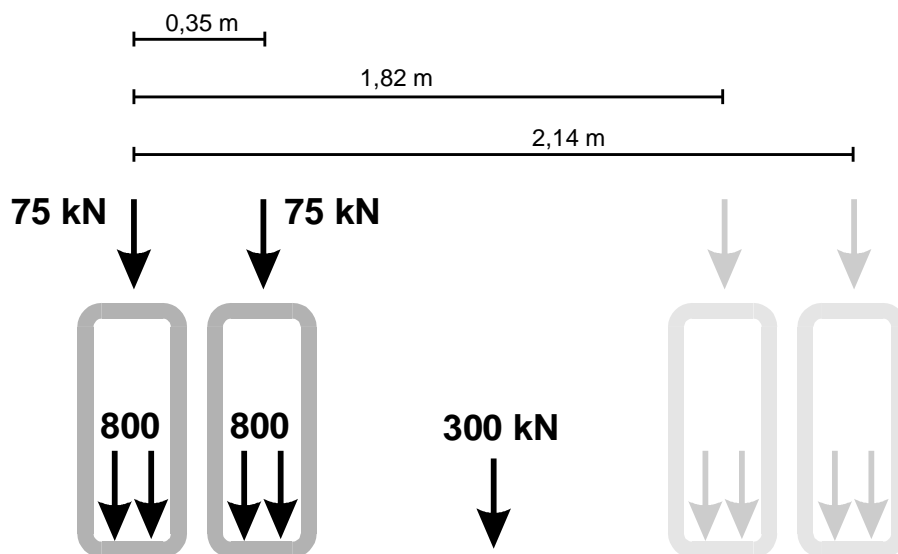
1.1 Lähtökohdat

Olemme tehneet LVI-Insinööritoimisto Lindroos Oy:n toimeksiannosta lämmitettävien katurakenteiden jännitystilalaskelmia. Tällaiset päällysrakenteet sijaitsevat yleensä varsinaisten ajoneuvoväylien ulkopuolella esim. kävelykaduilla, toreilla jne., joten vertailua ei tehdä normaalina päällysrakenteen mitoitustehtävänä. Koska rakennetta kuormittavat kuitenkin satunnaiset ajoneuvo- tai nosturikuormat, on laskelmien teko perusteltua.

Tehtävässä on keskitytty päällysrakenteen muodonmuutosten selvittämiseen, joten niiden välisiä taloudellisia eroja ei ole tarkasteltu.

2. Laskentamenetelmät

Laskentaohjelmana on käytetty Neste Oy:n myymää APAS-ohjelmaa. Ohjelma on analyyttinen päällysrakenteen suunnittelu-järjestelmä ja käytetty ohjelmaversio 1.0 on julkaistu helmikuussa 1994. Ohjelmassa hyödynnetään materiaalitietokantaa, jonka Neste on koonnut yhdessä tielaitoksen kanssa. Varsinainen laskenta tehdään NOAH-aliohjelmalla, joka on kimmoteoriaan perustuva monikerrosohjelma.



Kuva 1. Kuormitusmalli

Laskennassa käytetty kuormitusmalli on esitetty kuvassa 1. Se vastaa Rakenteiden kuormitusohjeen RIL 144 mukaista raskasta erikoiskuormaa 1 kuormitusluokassa I ilman sysäyslisää.

Koska katurakenne ei pääse routaantumaan, voidaan rakennettavan päällysrakenteen paksuutta pienentää. Rakennekerrosten kuivatukselta on kuitenkin huolehdittava, koska rakennekerroksen vesipitoisuuden kasvaminen pienentää sen jäykkyysmoduulia.

Asfalttibetoni on ainoa rakennekerrosmateriaali, jonka jäykkyysmoduuli riippuu lämpötilasta. Koska lämmityksen vuoksi asfalttibetoni ei pääse jäätymään, on ilmastoalueena käytetty rannikko-Suomea.

3. Materiaaliominaisuudet

Laskennassa on käytetty seuraavia rakennekerrosten jäykkyysmoduuleita ja kerrospaksuuksia

	E (MPa)	paksuus (mm)
Betonikivi	2500	80
Maabetoni	2000	80...100
Hiekka	70	80
Asfalttibetoni	3000	50
Lämpöeriste	50	50
Murske	280	150
Sora	200	600
Pohjamaa	20	ääretön (routiva hiekkamoreeni)

Pohjamaaksi on oletettu routiva hiekkamoreeni, koska se on yleinen maalaji. Tielaitoksen kantavuustaulukossa hiekkamoreenin jäykkyysmoduuli on 20 MPa, joka vastaa märän maalajin moduulia.

4. Rakennetyyppien vertailu

Tilaja esitti rakennetyypit, jotka lasketaan. Ne ovat:

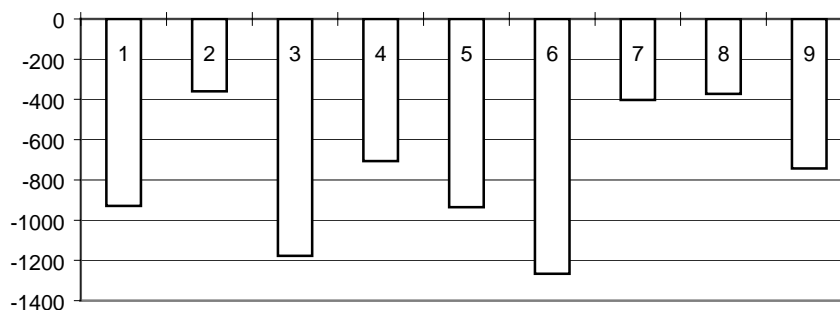
kerrosmateriaali	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	kerroksen paksuus (mm)								
betonikivi	80	80	80	80	-	-	-	-	-
asfalttibetoni	-	-	-	-	50	50	50	50	50
asennushiekka	80	-	80	-	80	80	-	-	-
maabetoni	-	80	-	80	-	-	80	100	-
	100								
lämpöeriste	-	-	50	50	-	50	-	-	50
asfalttibetoni	50	50	-	-	50	-	50	50	-
murske	150	150	150	150	150	150	150	150	-
	150								
sora	600	600	600	600	600	600	600	600	-
	600								

Liitteessä "tyyppi 1, laskentapisteen vertailu" on esitetty miten suurimmat suhteellisen muodonmuutoksen, pystysuuntaisen paineen ja rakennekerrosten taipuman arvot riippuvat laskentapisteen sijainnista. Suurimmat vaakasuuntaiset muodonmuutokset tapahtuvat pyörien välissä. Päällysteen suurimmat pystysuuntaiset muodonmuutokset tapahtuvat pyörän alla, mutta sidotuilla rakennekerroksilla nämä eivät ole kriittisiä pisteitä. Suurin paine on rakenteen pintaa lukuunottamatta pyörien välissä. Suurin taipuma tapahtuu pyörien välissä.

Päällystekerrosten kuormituskestävyyden kannalta kriittisimmät vaakasuuntaiset muodonmuutokset muodostuvat sidottujen ja sitomattomien rakennekerrosten rajapintaan. Eri rakenteiden välinen vertailu on esitetty kuvassa 2.

Rakenteet, joissa lämmitysputkiston on asennettu maabetoniin, jonka alapuolella ei ole lämpöeristettä, kestävät parhaiten kuormitusta.

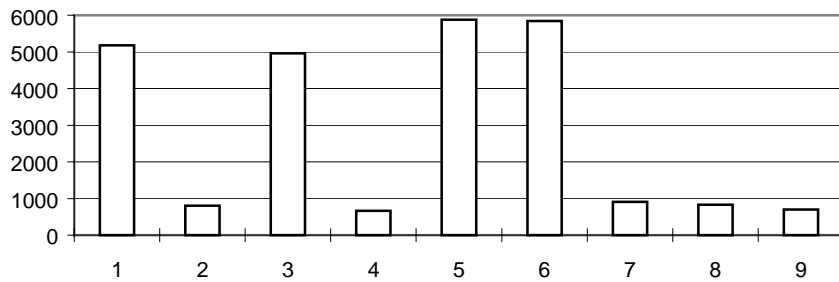
vaakasuuntainen suhteellinen muodonmuutos sidotun kerroksen alapinnassa



Kuva 2. Muodonmuutokset sidottujen ja sitomattomien rakennekerrosten rajapinnassa.

Rakenteen pinnan tasaisuuden kannalta on tärkeää, että ylimmän sitomattoman rakennekerroksen pystysuuntaiset muodonmuutokset pysyvät pieninä. Kuvasta 3 nähdään, että pystysuuntainen suhteellinen muodonmuutos on huomattavan suuri niissä rakenteissa, joissa lämmitysputkiston on asennettu hiekkakerrokseen.

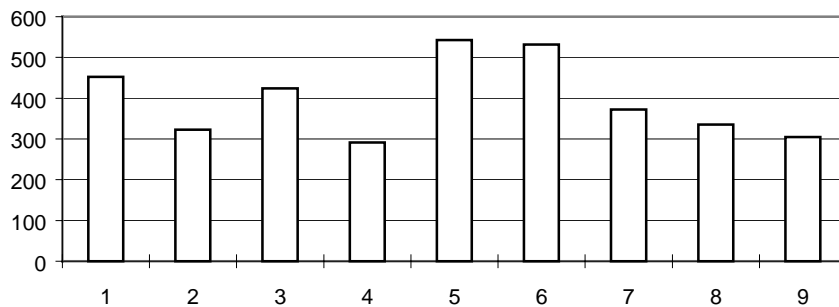
**pystysuuntainen suhteellinen muodonmuutos
sitomattoman kerroksen yläpinnassa**



Kuva 3. Muodonmuutokset ylimmän sitomattoman rakennekerroksen pinnassa.

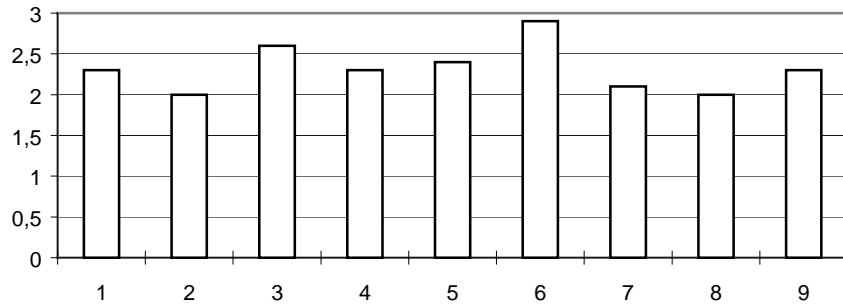
Lämmitysputkistojen toiminnan kannalta voi olla oleellista tarkastella erikoiskuorman aiheuttamaa pystyjännitystä tai rakennekerrosten taipumaa putkiston asennustasossa, kuvat 4 ja 5.

**pystysuuntainen paine lämmitysputkiston
asennustasossa (kPa)**



Kuva 4. Erikoiskuorman pystypaine lämmitysputkistoihin.

**erikoiskuorman aiheuttama rakennekerroksen taipuma
lämmitysputkiston asennustasossa (mm)**



Kuva 5. Erikoiskuorman aiheuttama rakennekerrosten taipuma.

Rakenteiden välillä on myös epävarmuustekijöitä. Asennushiekan jäykkyysmoduulina on käytetty arvoa, joka saavutetaan hyvin tiivistetyllä kuivalla maa-aineksella. Putkistojen kohdalla rakennekerroksen tiivistys jäänee heikommaksi kuin niiden välissä. Maabetonilla saadaan muodonmuutosominaisuuksiltaan tasaisempi rakennekerros.

Vesi vaikuttaa hiekan jäykkyysmoduuliin huomattavasti. Mikäli rakennekerrosten kuivatus ei toimi kunnolla, vaurioituu tällainen rakennekerros helposti.

Asfalttibetoni on päällysteenä visko-elasto-plastinen, joten lämpötila ja kuormitusaika vaikuttavat sen jäykkyyteen ja pinnan tasaisuuteen toistuvan tai pitkäaikaisen kuorman vaikutuksesta. Mikäli rakenne tehdään kohteeseen, johon esim. ympäristön rakennusten saneerausten vuoksi on tulossa työmaaparakeja, sementtisiiloja tms. kuormitusta, suositellaan päällysteeksi betonikiveä.

Lämpöeristeestä ei oikein tiedä, onko sen kriittiset suhteelliset muodonmuutokset vaaka- vai pystysuuntaisia. Tätä aihetta voidaan tutkia lisää.

Lämpöeristeiden yläpinnassa pystyjännitys on 290..530 kPa. Suosittelemme käytettäväksi suulakepuristettua solumuovia, jonka tiheys on kohteesta riippuen 38..45 kg/m³ (esimerkiksi F-4 tai F-5 lujuusluokan Finnfoam).

LT-Konsultit Oy

Jukka Tarkkala

dipl.ins.

Liite B: Lämmitettyjen katurakenteiden jännitystilalaskelmat

Asfaltti- ja betonikivirakenteiden vertailu

Teimme LVI-Insinööritoimisto Lindroos Oy:n toimeksiannosta lämmitettävien katurakenteiden jännitystilalaskelmia, jotka raportoitiin 22.04.1998. Tässä muistiossa vertaillaan tarkemmin rakennetyyppejä 1 ja 5, jotka muuten ovat samanlaisia rakenteita, mutta päällysteenä on asfalttibetoni tai betonikivi.

Laskennassa on käytetty 100 kN standardiajoneuvoa. Ilmastoalue on rannikko-Suomi. Arviona liikennekuormituksesta on käytetty 60 linja-autoa/huipputunti sekä kuorma-autoja. Laskennassa käytetyt liikennemäärät ja ajoneuvojen vastaavuuskertoimet ovat seuraavat:

	KVL	vastaavuuskerroin
linja-autot	700	0,4
kuorma-autot ilman perävaunua	200	0,4
kuorma-autot puoliperävaunulla	0	1,5
kuorma-autot täysperävaunulla	100	2,3
täydet kuorma-autot ilman perävaunua	0	1,5
kuorma-autot täydellä puoliperävaunulla	0	3,0
kuorma-autot täydellä täysperävaunulla	0	4,5

kuormituskertaluku $KKL=4,8E6$

Kumpikaan rakennetyypeistä 1 ja 5 ei käytännössä kestä tällaista liikennekuormitusta. Jotta kuormituskesto olisi $KKL=4,8E6$, olisi rakennetyypissä 1 betonipäällysteen oltava noin 250 mm paksu ja rakennetyypissä 5 olisi asfalttibetonin oltava noin 160 mm paksu. Näin raskaaseen liikennekuormitukseen suositellaan rakennetta, jossa päällysteenä on 130 mm betonikivi tai 120 mm paksu asfalttibetoni ja lämpöputkisto on asennettu maabetoniin.

Kun muut ajoneuvot kuin linja-autot jätetään kuormituksesta pois, on kuormituskertaluku noin $2,3E6$. Tällöin molemmat rakennetyypit 1 ja 5 kestävät noin 0,5 vuotta.

Kun kuormituksena on ainoastaan 100 linja-autoa vuorokaudessa ($KKL=3,3E5$), kestävät molemmat rakennetyypit 1 ja 5 noin 6,5 a. Tällaista kuormitusta rakennetyyppi 2 kestää yli 20 a. Rakennetyypissä 7 pitäisi päällysteen olla 90 mm, jotta kestoikä olisi 20 a.

Suosituksina voidaan sanoa, että

- Monikerrosrakenteiden analysointi on hankalaa, varsinkin kun rakennekerroksissa on useita asfalttibetonikerroksia.
- Lämpöputkiston asentaminen paksuun 80 mm hiikkakerrokseen vähentää päällysrakenteen yläosan kuormituskestä

- vyyttä niin valtavasti, että tällaista rakennetta ei tulisi käyttää ajoneuvoliikenteen väylillä.
- Kun lämpöputkisto asennetaan maabetoniin ja kun päällysteenä käytetään 120..130 mm betonikiveä tai asfalttibetonia, kestää rakenne kuormituskertaluvun $4,8E6$ (yllä esitetty liikennemäärä 20 vuoden mitoitusaikana).
- Tarkastelu on tehty vain päällysrakenteen kuormituskestävyydelle. Kun lisäksi otetaan huomioon päällysteen pinnan deformaation linja-autopysäkeillä, korostuu maabetonin käyttö lämpöputkiston kerroksessa edelleen.

LT-Konsultit Oy

Jukka Tarkkala

dipl.ins.

RAPORTTI

LT-Silta/Vla

5.6.2000

Liite C: JYVÄSKYLÄN VAPAUDENKATU – KATURAKENTEEN JÄNNITYSTILALASKELMAT

1. Lähtökohdat

Nämä laskelmat on tehty kesäkeli- (snowhow)-projektiin liittyen. Koekohdeena on Jyväskylän Vapaudenkadun bussiterminaali. Rakennetyyppi n:o 1 on kohteessa tehdyn rakennussuunnitelman mukainen. Kaksi muuta rakennetyyppiä on tarkasteltu vertailukohtien saamiseksi. Pääasiassa Vapaudenkadulla liikennöivät linja-autot ja henkilöautot. Kuormituskertaluku on $2,3 \times 10^6$, jonka perusteella kadun rakenteet on mitoitettu.

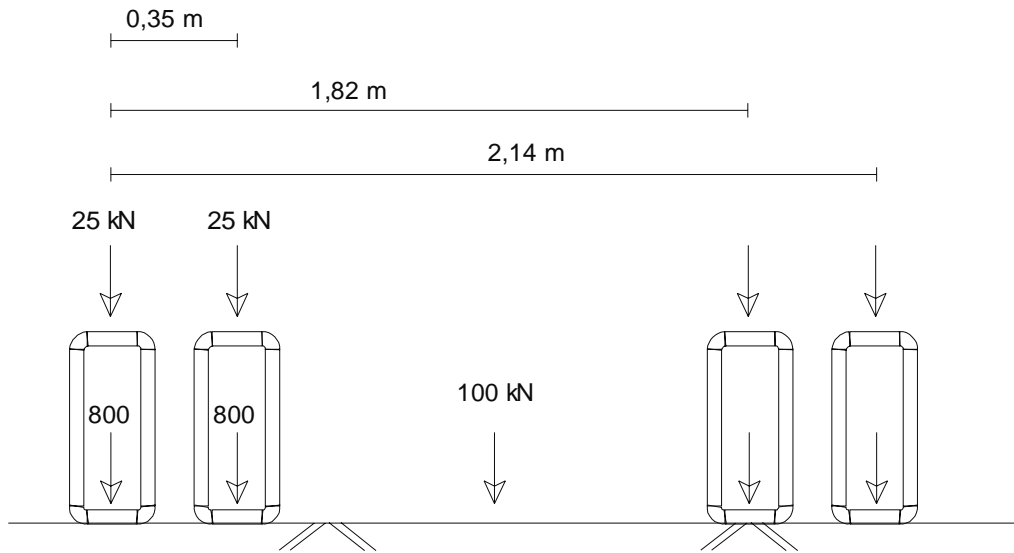
2. Laskentamenetelmät

Laskentaohjelmana on käytetty Neste Oy:n myymää APAS-ohjelmaa. Ohjelma on analyttinen päällysrakenteen suunnittelujärjestelmä ja käytetty ohjelmaversio 1.0 on julkaistu helmikuussa 1994. Ohjelmassa hyödynnetään materiaalitietokantaa, jonka Neste on koonnut yhdessä tielaitoksen kanssa. Varsinainen laskenta tehdään NOAH-aliohjelmalla, joka on kimmoteoriaan perustuva monikerrosohjelma.

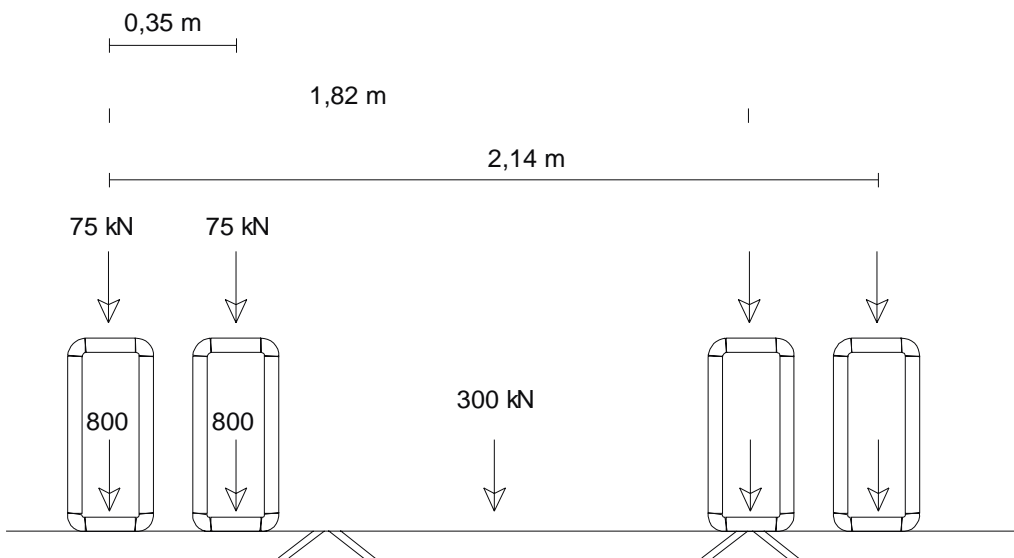
Laskennassa käytetyt kuormitusmallit on esitetty kuvissa yksi ja kaksi. Kuvassa yksi esitetty malli on standardikuormitus ja kuvassa kaksi esitetty kuormitusmalli vastaa Rakenteiden kuormitusohjeen RIL 144 mukaista raskasta erikoiskuormaa I kuormitusluokassa ilman sysäys lisää.

Katurakenne ei pääse routaantumaan joten rakennekerroksista voidaan tehdä ohuempia kuin routaantuvassa tilanteessa, kuitenkin siten että riittävä kantavuus saavutetaan. Rakennekerroksen kuivatuksesta on kuitenkin huolehdittava, koska rakennekerroksen vesipitoisuuden kasvaminen pienentää sen kantavuutta.

Asfalttibetoni on ainoa rakennekerros materiaali, jonka jäykkyysmoduuli riippuu lämpötilasta. Koska lämmityksen vuoksi asfalttibetoni ei pääse jäätymään, on ilmastoalueena käytetty rannikko-Suomea.



Kuva 1. Standardikuormitus.



Kuva 2. Erikoiskuormitus.

3. Materiaaliominaisuudet

Laskennassa on käytetty seuraavia rakennekerrosten jäykkyysmoduuleita

	<u>E (MPa)</u>
Asfalttibetoni	4300
Maabetoni	2000
Murske	280
Sora	200
Hiekka	70
<u>Pohjamaa</u>	<u>20</u>

Pohjamaaksi on oletettu routiva hiekkamoreeni, koska se on yleinen maalaji. Tielaitoksen kantavuustaulukossa hiekkamoreenin jäykkyysmoduuli on 20 MPa, joka vastaa märän maalajin moduulia.

4. Rakennetyyppien vertailu

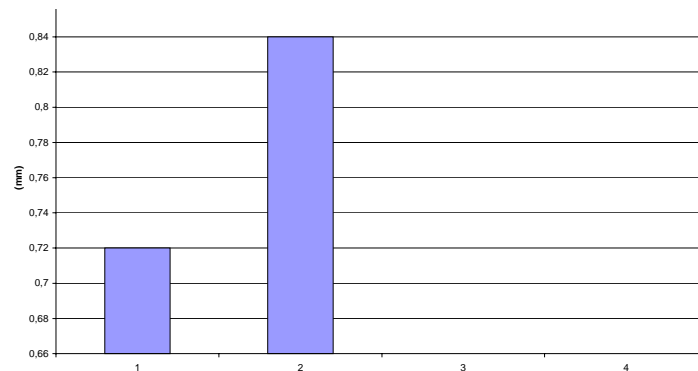
Laskennoissa vertailtiin kolmea erityyppistä rakennetta:

Materiaali	1	2	3
kerroksen paksuus (mm)			
asfalttibetoni	50	50	100
asennushiekka	-	-	80
asfalttibetoni	-	-	50
maabetoni	300	200	-
murske	250	300	200
sora -	-	300	
hiekk	-	-	300

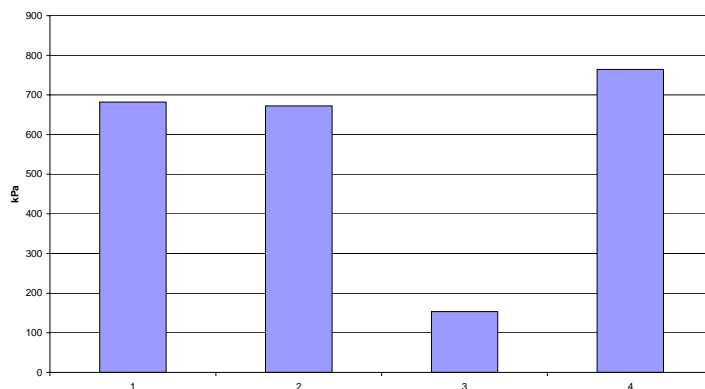
Rakenne 1 on Vapaudenkadusta tehdyn rakennussuunnitelman mukainen. Tielaitoksen ohjeen mukaan kuormituskertaluvun $2,3 \times 10^6$ suuruisilla kuormituksilla kevät-kantavuus päällysteen päältä tulisi olla 365 MPa. Kuitenkin lineaarisesti interpoloimalla kantavuustaulukosta saadaan arvolla KKL $2,3 \times 10^6$ selville, että kantavuuden arvoksi riittäisi 285 MPa. Lämmitetty rakenne ei jäädy, joten keväällä ei tapahdu rakennekerrosten sulamisesta aiheutuvaa kantavuuden alenemista. Rakenne 2 on laskettu hieman ohuemmalla maabetonikerroksella ja paksummalla murskekerroksella. Kantavuus päällysteen päältä on 322 MPa.

Kolmantena rakenteena on rakenne, jossa lämmitysputket on asennettu asennushiekkaan. Päällysteen alla oleva asennushiekka pienentää rakenteen kantavuutta niin merkittävästi, että päällysteen paksuus täytyy kasvattaa 100 mm:iin. Kantavuus 100 mm päällysteellä 299 MPa. Kokonaisuudessaan rakennekerrosten paksuus ylittää metrin.

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty rakenteessa tapahtuvat painumat ja pystysuuntaiset jännitykset lämmitysputkien asennustasossa. Standardikuormalla suurin taipuma ja paine on suoraan renkaiden alla. Kuvissa rakenne 4 on sama kuin rakenne 1, mutta kuormituksena on erikoiskuormitus. Erikoiskuormalla suurin taipuma tapahtuu paripyörien välissä.



Kuva 3. Rakennekerrosten taipuma lämmitysputkien tasossa.



Kuva 4. Pystysuuntainen paine lämmitysputkien tasossa.

Kuvista nähdään, että pystysuuntainen paine putkien asentamistasossa on 680 kPa luokkaa ja erikoiskuormalla hieman suurempi. Rakenteessa 3 paine putkien tasossa on vain n. 150 kPa, joka on huomattavasti alhaisempi kuin rakenteissa 1 ja 2. Lämmitysputkille ei ole tehty kokeita, joissa olisi selvitetty putkien kestävyyttä pystysuuntaista painetta vastaan. Toteutettujen kohteiden perusteella voidaan kuitenkin todeta että putket kestävät ja toimivat rakenteessa yksittäisissä raskaissa kuormitustilanteissa.

Painumat ovat maabetoni rakenteessa alle 1,0 mm luokkaa ja erikoiskuormallakin vain hieman yli 2 mm. Putket ovat elastista materiaalia eikä alle 1,0 mm painuma, vaikka toistoja tulisi runsaastikin, vaikuta materiaalin kestävyyteen.

LT-Konsultit Oy

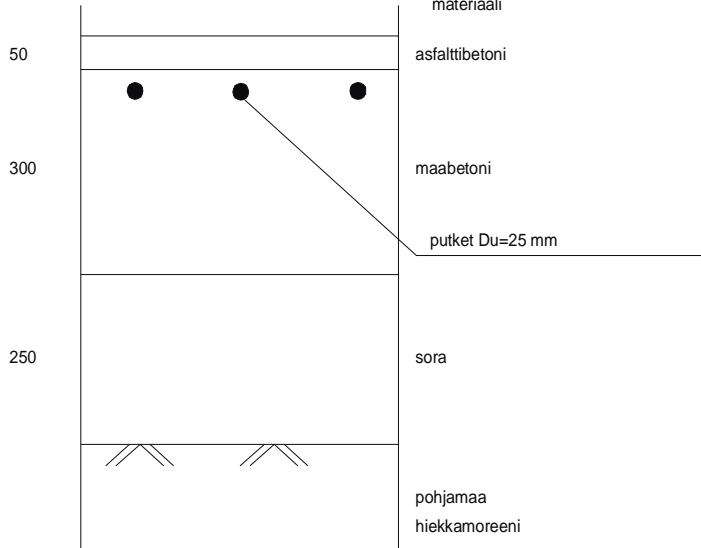
Vesa Lainpelto

dipl.ins.

LIITTEET Rakennetyypit 1-3, rakennekerrokset ja laskentatulokset

RAKENNE 1

Kerroksen
paksuus (mm)



Kerroksen
materiaali

asfalttibetoni

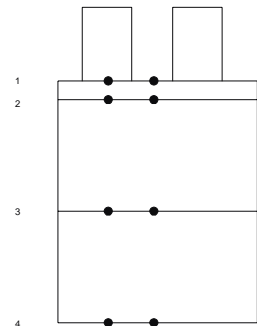
maabetoni

putket Du=25 mm

sora

pohjamaa
hiekkamoreeni

LASKENTAPISTEET



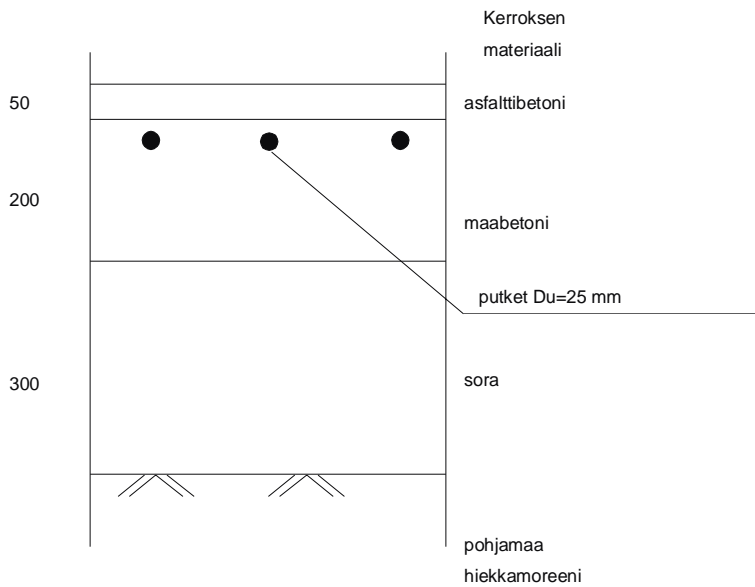
muodonmuutos $\mu_s=1 \times 10^6$ m/m (+puristus,-venymä)								
taso	pyörän alla				pyörien välissä			taipuma (mm)
	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	
1	131,6	152,9	800	0,72	0,5	116,9	0	0,70
2	-23,6	-19,8	682,1	0,72	106,4	21,3	53,1	0,70
3	-77	-104,3	29,7	0,68	-76,3	-110,0	30,2	0,69
4	-110,5	-128,3	6,6	0,64	-119,9	-132,9	6,9	0,64

RAKENNE 1 – ERIKOISKUORMA

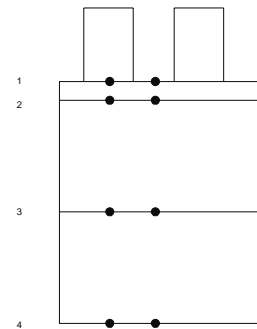
muodonmuutos $\mu_s=1 \times 10^6$ m/m (+puristus,-venymä)								
taso	pyörän alla				pyörien välissä			
	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)
1	211,9	272,2	800	2,01	125,1	321,2	400	2,03
2	84,1	89,6	764,5	2,02	163,8	58,8	609,0	2,03
3	-207,0	-277,0	77,0	1,95	-222,8	-294,3	82,9	1,98
4	-322,7	-374,9	19,4	1,86	-351,4	-388,4	20,2	1,88

RAKENNE 2

Kerroksen
paksuus (mm)



LASKENTAPISTEET

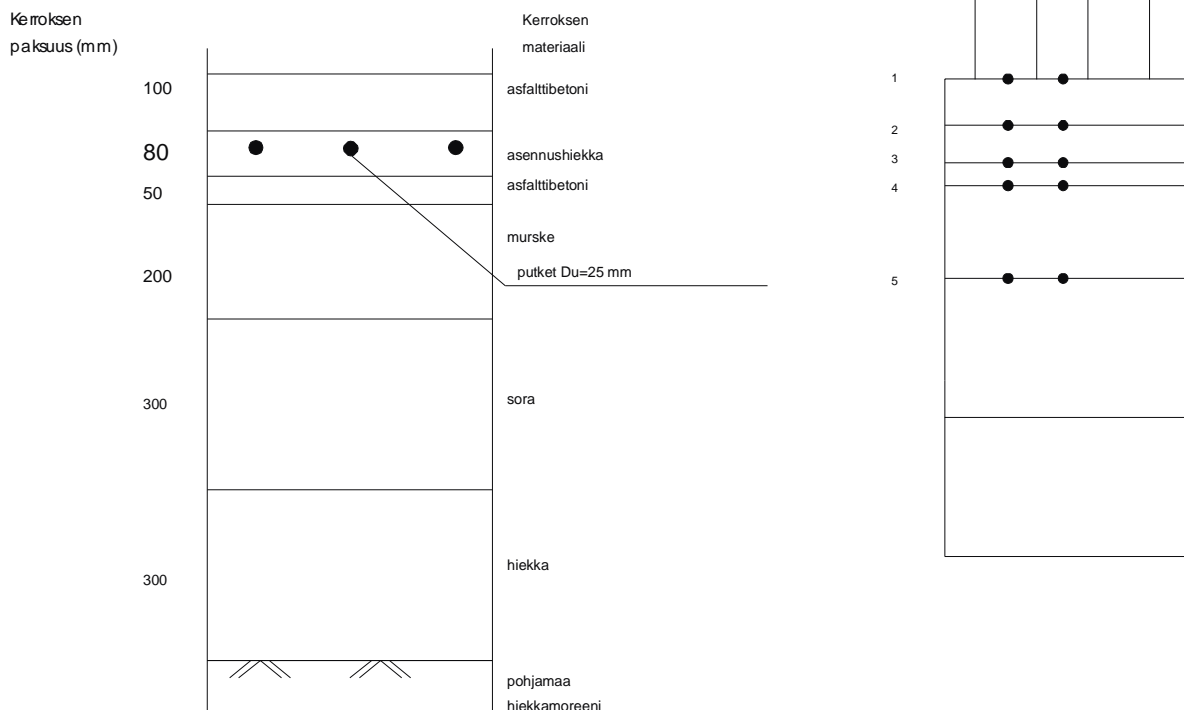


RAKENNE 2

taso	muodonmuutos $\mu_s=1 \times 10^6$ m/m (+puristus,-venymä)							
	pyörän alla				pyörien välissä			
	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)
1	150,2	182,7	800	0,84	19,9	149,3	0	0,82
2	-19,9	-12,9	672,5	0,84	110,4	28,9	46,4	0,83
3	-106,7	-151,7	60,7	0,81	-77,5	156,5	54,9	0,82
4	-150,2	-177,5	8,9	0,74	-164,3	-184,5	9,3	0,75

RAKENNE 3

LASKENTAPISTEET



RAKENNE 3

taso	muodonmuutos $\mu_s = 1 \times 10^6$ m/m (+puristus, -venymä)							
	pyörän alla				pyörien välissä			
	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)	mm. vaaka	mm. pysty	paine (kPa)	taipuma (mm)
1	214,8	309	800	0,96	18,7	284,6	0	0,96
2	-214,9	-312,9	153,7	0,95	34,9	-273,7	137,2	0,96
3	30	47,0	120,8	0,84	31,2	51	119,4	0,86
4	-39,5	-65,0	91,6	0,84	-36,9	-70,2	99,6	0,86
5	-100,6	-135,0	41,3	0,79	-115,0	-143,7	46,4	0,81



Tekijä(t) Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri			
Nimeke Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät Energialaous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti			
Tiivistelmä Projektissa tutkittiin katu- ja liikennealueiden lämmöllä toimivien sulanapitojärjestelmien teknistä toteutusta, energiaratkaisuja ja -taloutta. Lämmitysjärjestelmän lämmönlähteitä voivat olla kaukolämpö, sähkö, lauhde- ja prosessilämpö sekä matalalämpöiset energialähteet yhdistettynä lämpöpumppulaitokseen. Liukkaudentorjuntavaihtoehtona tiealueiden suolaukselle ja luiskasuojauksille pohjavesialueella tutkittiin niiden lämmittämistä. Projektissa vertailtiin yhdeksän erilaisen lämmitetyn katurakenteen toimivuus, joille on jo aiemmin tehty jännitystila- ja muodonmuutoslaskelmat. Samoille katurakenneratkaisulle tehtiin lämpökäyttäytymismallit ja laskettiin tarvittava lämmitysteho ja tutkittiin lämpöeristyksen tarpeellisuutta. Katurakenteissa lämmitysteho on 300 W/m^2 , mikä riittää sulattamaan uutta lunta 30 mm tunnissa ja pitämään tien pinnan sulana $-13 \text{ }^\circ\text{C}$:n ulkolämpötilaan saakka. Kadun reunakiven alueella tulee käyttää suurempaa lämmitystehoa. Betonisissa silta- ja kansirakenteissa toimiva lämmitys edellyttää suurempaa lämmitystehoa ja alapuolista lämmöneristystä. Nestekiertoisen sulanapitojärjestelmän mitoitukseen kehitettiin laskentamalli, jolla voidaan mitoittaa katulämmityksen putkijärjestelmä sekä laskea lämmitysjärjestelmän kustannukset.			
Avainsanat heating, smelting, snow, ice, energy economy, costs, calculations, slipperiness, streets, traffic area, pavements, shopping centres, road junctions, traffic safety, bus terminals, bridges, junctions			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja Yhdyskuntateknikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät, Betonimiehenkuja 1, PL 19041, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5916-9 (nid.) 951-38-5917-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R1SU00462 N0SU0026	
Julkaisuaika Marraskuu 2001	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 75 s. + liitt. 15 s.	Hinta B
Projektin nimi Kesäkeli-projekti		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), teollisuus	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Author(s) Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri			
Title Snow melting systems of traffic and common areas			
Abstract <p>Snow smelting is used to prevent slipperiness in streets and traffic areas of towns especially in pedestrian streets and also in courtyards and outdoor recreation areas of shopping centres. Also traffic areas e.g. bus terminals, bus stops, road junctions, bridges and ramps are planned to be heated for slipperiness prevention as well to improve security and comfort of pedestrians. The total operating time of the outdoor street heating systems are about 1000 hours a year in Finland.</p> <p>Energy choice and economy as well technical details of ice smelting systems in streets and traffic areas are investigated in this project. The ice smelting system can be heated by district heat, electricity, condensing heat, waste heat of processes and by low heat cells as ground, rock mass or lake water etc. connected to heat pumps. Heating of street areas was investigated in a virtual pilot as an alternative solution for salting the roads in ground water areas. The discounted value cost was calculated for several heating alternatives comparing to salting method including water protection on road sides. The ground water heat connected to a heat pump was investigated as one alternative among others.</p> <p>Nine different street structures were investigated and compared by stress and deformation analyses. Calculations were done to evaluate thermal behaving, needed thermal effect and insulation under heating system. The insulation under the ice smelting system has not very important role for designed heat effect and thermal energy consumption. Thermal effect of 300 W/m² for ice smelting system of the road is used, but near the edge stone higher thermal effect is needed. Concrete structures of bridges and decks need thermal effect of 300–400 W/m² and at least 60 mm of insulation under the heated layer, because the bridge is cooled also underneath.</p> <p>Thermal effect of 300 W/m² is enough to smelt snow rain of 30 mm/h and to keep the surface of the road snow free to outdoor temperature of -13 °C. For design of thermal snow free system with a liquid circulation was developed a calculation model, which can design the pipeline system and evaluated the investment and driving cost of heating system. Also alarm, control and regulation system of snow smelting system is described in the report.</p>			
Keywords heating, smelting, snow, ice, energy economy, costs, calculations, slipperiness, streets, traffic area, pavements, shopping centres, road junctions, traffic safety, bus terminals, bridges, junctions			
Activity unit VTT Building and Transport, Structures and Building Services, Betonimiehenkuja 1, P.O.Box 19041, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5916-9 (soft back ed.) 951-38-5917-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R1SU00462 N0SU0026	
Date November 2001	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 75 p. + app. 15 p.	Price B
Name of project Kesäkeli-projekti		Commissioned by National Technology Agency (Tekes), industry	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT ENERGIA – VTT ENERGI – VTT ENERGY

- 1973 Rasilainen, Kari, Luukkonen, Ari, Niemi, Auli, Olin, Markus, & Pöllä, Jukka. The feasibility of modelling coupled processes in safety analysis of spent nuclear fuel disposal. 1999. 83 p. + app. 4 p.
- 1975 Ranne, Aulis, Hänninen, Markku & Salmi, Jaakko. Kuitueristeet korkealämpötiloissa. Toteutus ja käyttö. 1999. 99 s. + liitt. 28 s.
- 1982 Kärkkäinen, Seppo, Sipilä, Kari, Ranne, Aulis, Kekkonen, Veikko, Koponen, Pekka, Koskelainen, Lasse & Heikkinen Jouni. Kysynnän hallinta kaukolämmitysjärjestelmissä. DSM:n perusteet ja tarvittava tekniikka. 1999. 98 s.
- 1992 Sipilä, Kari, Ritola, Jouko, Vuopio, Jaakko, Leino, Olavi & Hiltunen, Mikko. Absorptiolämpöpumpulla ja varastolla varustetun kalliotilan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä. 1999. 71 s.
- 1996 Ranne, Aulis, Eerikäinen, Lauri & Hänninen, Markku. Ejektorin kaukolämmitysjärjestelmässä. Perusteet ja toiminta. 1999. 54 s. + liitt. 1 s.
- 2016 Mannila, Pekka & Lehtonen, Matti. Decentralised electrical distribution network in power plants. 2000. 33 p. + app. 4 p.
- 2019 Lahdelma, Risto & Ranne, Aulis. Vesivoima Euroopassa. Ympäristöluokittelun vaikutukset. 1999. 87 s. + liitt. 2 s.
- 2024 Solantausta, Yrjö, Podesser, Erich, Beckman, David, Östman, Anders & Overend, Ralph P. IEA Bioenergy Task 22: Techno-economic assessment for bioenergy applications 1998–1999. Final report. 2000. 241 p.
- 2033 Rasilainen, Kari, Suolanen, Vesa & Vuori, Seppo. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuuden arvioinnin perusteet. 2000. 57 s.
- 2045 Alakangas, Eija. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. 2000. 172 s. + liitt. 17 s.
- 2057 Vantola, Timo, Puska, Eija Karita & Marttila, Anne (eds.). FINNUS. The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety. Interim Report 1999 – August 2002. 2000. 227 p. + app. 60 p.
- 2059 Kurkela, Esa, Simell, Pekka, Ståhlberg, Pekka, Berna, Gianni, Barbagli, Francesco & Haavisto, Ilkka. Development of novel fixed-bed gasification for biomass residues and agrobifuels. 2000. 42 p. + app. 1 p.
- 2060 Ranne, Aulis. Multi Supply Plant. Sähkö ja vesi. 2000. 84 s. + liitt. 12 s.
- 2071 Sipilä, Kari, Ranne, Aulis & Koljonen, Tiina. Modular district heating system MODiS. 2000. 142 p. + app. 20 p.
- 2074 Ohlström, Mikael, Mäkinen, Tuula, Laurikko, Juhani & Pipatti, Riitta. New concepts for biofuels in transportation. Biomass-based methanol production and reduced emission in advanced vehicles. 2001. 94 p.
- 2080 Rasilainen, Kari, Suolanen, Vesa & Vuori, Seppo. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuusanalyseissa laskettujen säteilyvaikutusten havainnollistaminen. 2001. 58 s. + liitt. 5 s.
- 2081 Lohiniva, Eina, Mäkinen, Tuula & Sipilä, Kai. Lietteiden käsittely. Uudet ja käytössä olevat tekniikat. 2001. 146 s. + liitt. 11 s.
- 2087 Hakkila, Pentti, Nousiainen, Ismo & Kalaja, Hannu. Metsähakkeen käyttö Suomessa. Tilannekatsaus vuodesta 1999. 2001. 39 s.
- 2094 Pipatti, Riitta. Greenhouse gas emissions and removals in Finland. 2001. 59 p. + app. 95 p.
- 2096 Rasilainen, Kari, Hölttä, Pirkko, Siitari-Kauppi, Marja, Suksi, Juhani, Lehikoinen, Jarmo, Valkiainen, Matti, Timonen, Jussi, Lindberg, Antero & Marcos, Nuria. Retardation mechanism studies for performance assessments. 2001. 84 p. + app. 4 p.
- 2097 Ranne, Aulis. Multi Supply Plant. Sähkö ja kylmä. 2001. 115 s.
- 2099 Oinonen, Teemu & Soimakallio, Sampo. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. 2001. 154 s. + liitt. 17 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2070 Nieminen, Jyri & Salonvaara, Mikael. Hygrothermal performance of light steel-framed walls. 2000. 26 p.
- 2072 Paiho, Satu, Leskinen, Mia & Mustakallio, Panu. Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen energiatietoisesta käytön apuvälineenä. 2000. 63 s.
- 2075 Häkkänen, Helinä, Britschgi, Virpi & Kanner, Heikki. Nuorten aikomus hankkia ajokortti. 2000. 71 s. + liitt. 4 s.
- 2076 Leivo, Markku & Holt, Erika. Betonin kutistuma. 2001. 57 s.
- 2078 Ratvio, Juha. Ultralujan betonin käyttösovellukset. Esitutkimus. 2001. 45 s. + liitt. 13 s.
- 2079 Laukkanen, Kyösti & Unhola, Timo. Ajoharjoitteluratojen liukasaluetutkimus. Laboratorio- ja kenttäkokeet 2000. 2000. 58 s. + liitt. 8 s.
- 2082 Tiuri, Ulpu, Sarja, Asko & Laine, Juhani. Korjauskonsepti. Korjausrakentamisella asunto kaikkiin elämänvaiheisiin 2001. 45 s. + liitt. 130 s.
- 2083 Tarvainen, Veikko, Pietilä, Jukka & Serenius, Matti. Puun öljykuivaus, öljykyllästys ja värjäys. 2001. 65 s. + liitt. 9 s.
- 2084 Hietaniemi, Jukka, Mangs, Johan & Hakkarainen, Tuula. Burning of Electrical Household Appliances: An Experimental Study. 2001. 60 p. + app. 23 p.
- 2085 Valkiainen, Matti, Klobut, Krzysztof, Leppäniemi, Sami, Vanhanen, Juha & Varila, Reijo. PEM-polttokennoon perustuvat mikro-CHP-järjestelmät. Tilannekatsaus. 2001. 60 s.
- 2090 Koukkari, Heli, Petäkoski-Hult, Tuula, Rönkä, Kimmo, Regårdh, Elina, Lappalainen, Veijo, Eerikäinen Miia, Norvasuo, Markku & Koota, Jaana. Esteetön asuinkortteli. 2001. 112 s. + liitt. 68 s.
- 2091 Toratti, Tomi. Puurakenteiden seisminen suunnittelu. 2001. 57 s. + liitt. 16 s.
- 2093 Andstén, Tauno. Käsisammuttimien käyttö ruokaöljypalojen sammutuksessa. Kirjallisuustutkimus. 2001. 28 s.
- 2100 Pakanen, Jouko, Möttönen, Veli, Hyytinen, Mikko, Ruonansuu, Heikki & Törmäkangas, Kaija. Dynaamisten HTML-sivujen ja multimedian hyödyntäminen taloteknisten järjestelmien käytön, huollon ja vikadiagnostiikan opastamiseen. 2001. 20 s. + liitt. 10 s.
- 2101 Toratti, Tomi. Seismic design of timber structures. 2001. 53 p. + app. 16 p.
- 2102 Kolari, Sirpa & Luoma, Marianna. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtaan asennusmenetelmän kehittäminen. 2001. 47 s.
- 2103 Koivu, Tapio, Mäntylä, Kaj, Loikkanen, Kaisu, Appel, Mikael & Pulakka, Sakari. Innovaatiotoiminnan kehittäminen kiinteistö- ja rakennuskluusterissa. Lähtökohtia ja kokeiluja. 2001. 81 s. + 19 s.
- 2104 Hostikka, Simo, Kokkala, Matti & Vaari, Jukka. Experimental Study of the Localized Room Fires. NFSC2 Test Series. 2001. 49 p. + app. 46 p.
- 2106 Anttila, Virpi & Luoma, Juha. Turvavöiden käyttökokeilu junissa. Käyttö ja matkustajien mielipiteet. 2001. 27 s. + liitt. 9 s.
- 2108 Vares, Sirje. Kerrostalon ympäristövaikutukset. LVIS-2001-tyyppikerrostalo. 2001. 49 s.
- 2109 Ranta-Maunus, Alpo, Fonselius, Mikael, Kurkela, Juha & Toratti, Tomi. Reliability analysis of timber structures. 2001. 102 p. + app. 3 p.
- 2110 Anttila, Virpi. Talvijalankulku, liukastumistapaturmat ja kelitiedottamisen kehittäminen. 2001. 51 s. + liitt. 11 s.
- 2112 Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. 2001. 53 s. + liitt. 9 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.