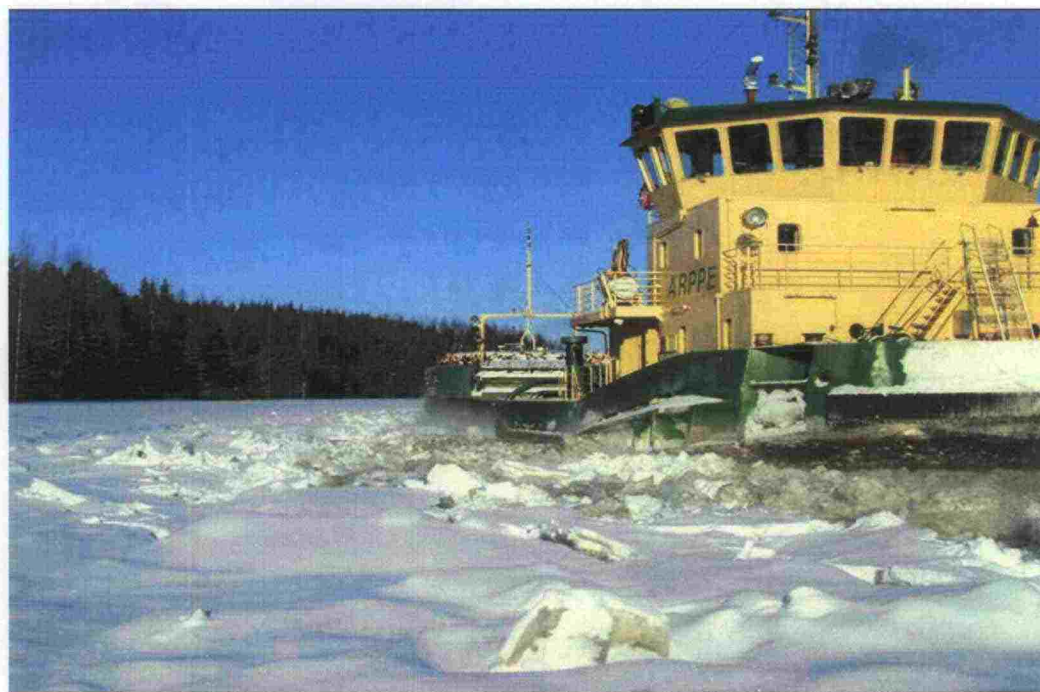


Merenkululaitoksen julkaisuja 8/2005

# Saimaan kanavan jäänkehityksen simulointi



**Merenkululaitos**

Helsinki 2005  
ISBN 951-49-2105-4  
ISSN 1456-7814

Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja 8/2005

# Saimaan kanavan jäänkehityksen simulointi



9961



**Merenkululaitos**

Helsinki 2005  
ISBN 951-49-2105-4  
ISSN 1456-9442



ISSN 1456-7814  
Merenkululaitos, Helsinki 2005



Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) <b>Harri Soininen, Tapio Nyman, Esa Eranti</b>		Julkaisun laji <b>Raportti</b>	
		Toimeksiantaja <b>Merenkululaitos</b>	
		Toimielimen asettamispäivämäärä	
Julkaisun nimi <b>Saimaan kanavan jäänkehityksen simulointi</b>			
Tiivistelmä			
<p>Työssä kehitettiin olemassa olevien havainto- ja mittaustulosten pohjalta sekä jään kehittymismalli että 1A-jääluokan aluksen transit-simulointimalli Saimaan kanavalle. Mallien avulla selvitettiin, riittääkö suunniteltu 120 MW:n lämpösyöttö kilometrin välein sijaitsevin purkupistein liikenteen ylläpitämiseen talven yli.</p> <p>Jään muodostus- ja sulamismallin avulla simuloitiin jään muodostumista erilaisina talvina rahtialusliikenteellä 1, 2 ja 4 alusta vuorokaudessa. Transit-simulointilaskelmat osoittivat, että suunnitellulla lämpösyötöllä 1A-jääluokan alus pystyy selviytymään leutoina ja keskimääräisinä talvina Saimaan kanavalla lähes ilman jäänmurtaja-avustusta. Lämpösyöttökapasiteettia on jopa ylen määrin. Vain erittäin ankarina talvina neljän aluksen vuorokautisella liikennemäärällä liikennöintiin kanavalla ei ole enää realistisia mahdollisuuksia.</p> <p>Simulaatioiden mukaan sulatusteho purkupisteiden välillä vaihtelee kuitenkin suunniteltua enemmän raskaassa jäätilanteessa. Tämä hallitsemiseksi saattueajo, lämmön syötön kohdentaminen ongelmajaksoille sekä liikennekatko ovat tehokkaita jousto- ja järjestelymahdollisuuksia. Lisäksi purkupisteitä voidaan lisätä varsin vähäisin kustannuksin. Uudet alus- ja propulsiolaiteratkaisut, kuten perä edellä kulkevat double-acting -alukset ja propulsiolaitteiden alalla azimuth propulsio eli ruoripotkuri tuovat yleistyessään lisää joustoa vaikeimmissa tilanteissa.</p>			
Avainsanat (asiasanat) <b>Saimaan kanava, jäänkehitys, simulointi, laivaränni</b>			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero <b>Merenkululaitoksen julkaisuja 8/2005</b>		ISSN <b>1456-7814</b>	ISBN <b>951-49-2105-4</b>
Kokonaissivumäärä <b>59</b>	Kieli <b>Suomi</b>	Hinta	Luottamuksellisuus <b>julkinen</b>
Jakaja <b>Merenkululaitos</b>		Kustantaja	

## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
2	Menetelmät.....	4
3	Teoreettisten tarkasteluiden vertailu havaintojen kanssa .....	5
3.1	Jään muodostumisprosessin ensivaihe .....	5
3.2	Jään muodostumisprosessin toinen vaihe .....	7
3.3	Laskettujen jään paksuusarvojen vertailu mitattuihin arvoihin .....	11
3.4	Jään sulaminen kanavassa veteen johdetun lämpöenergian vaikutuksesta .....	12
3.5	Lämpöenergian kuluminen jään sulatukseen – mitattujen ja laskettujen arvojen vertailu.....	14
3.6	Mallin verifiointi .....	27
4	Simulaatiolaskelmat.....	31
4.1	Lähtökohdat .....	31
4.2	Erytyyppisten talvien simulointi .....	32
4.3	Eri tekijöiden vaikutuksia jäätilanteen hallintaan .....	37
4.4	Transit-simuloinnit.....	42
4.4.1	Perusoletukset .....	44
4.4.2	Tulokset .....	45
4.4.3	Johtopäätökset.....	51
4.5	Kanavakokonaisuuden tarkastelu .....	53
5	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	55
5.1	Talviliikennöintistrategia .....	55
5.2	Tulosten tarkastelu.....	55
5.3	Johtopäätökset.....	56
	Lähdeviitteet .....	57
	Liitteet.....	59

# 1 Johdanto

Saimaan kanavan (liitteet 1 ja 2) ympärivuotisen liikennöinnin edellytyksistä on tehty useita erityyppisiä selvityksiä vuosien varrella. Aiemmista selvityksistä ovat tämän työn kannalta tärkeitä erityisesti Eranti Engineering Oy:n raportit jään muodostuksesta kanavassa ja lämpöenergian käyttömahdollisuuksista [1,2] sekä VTT:n raportti MS Jääkotkan koeajoista talvella 1999–2000 [3], johon oli sisällytetty myös runsaasti vuosien varrelta kerättyä mittaustietoa muun muassa Saimaan kanavan jäätilanteen kehittymisestä.

Tehtyjen selvitysten pohjalta laadittiin esisuunnitelma lämpimän veden jakamisesta Saimaan kanavaan [4]. Suunnitelman mukaan kanavaan johdettaisiin  $1 \text{ m}^3/\text{s} + 30 \text{ }^\circ\text{C}$  -asteista lauhdevettä (120 MW), joka purettaisiin kanavajaksoille 32 purkupisteestä. Viimeisestä purkupisteestä laskettaisiin lämpöä noin 20 MW:n teholla Brushnitchnoen sulun alapuolelle tarkoituksena pitää Lavolan kapea tuloväylä (noin 4 km) liikennöitävänä. Toisaalta kanavan alkupää (4 km) suunnitellaan pidettäväksi liikennöintikunnossa juoksuttamalla Kaukaan lämpöpäästöistä johtuen kanavan suulla lämmintä vettä kanavan läpi.

Tehtyihin selvityksiin liittyi kuitenkin huomattavia epävarmuustekijöitä. Riskien hallitsemiseksi tehtiin Saimaan kanavalla lämmönjakeluun ja talviliikennöintiin liittyviä kokeellisia tutkimuksia [5, 6]. Näistä jälkimmäisessä yhdistettiin lämpöenergian juoksutus ja talviliikennöintikokeilu VA Kummelilla, JM Arppella ja MP Vekaralla talvella 2004. Kyseinen VTT:n selvitys on tämän työn kannalta keskeisessä roolissa.

Tämän työn tarkoituksena on tarkentaa aiemmin tehtyjä arvioita kanavan lisälämmön tarpeesta sekä lämmönjakelusta tehtyjä suunnitelmia. Peruskysymys on se, riittääkö suunniteltu lämpömäärä (120 MW + 20 MW) Saimaan kanavan talviliikenteen hoitamiseksi kanavan suulta Lavolan kapeikkoon.

## 2 Menetelmät

Selvitystyö jakaantui kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäisessä suoritettiin jäänkehittymistä simuloivan laskentamallin valinta ja verifiointi olemassa olevan havaintodatan avulla. Ensimmäisessä vaiheessa kerättiin myös kanavaliikenteeseen liittyvä laivamittaust materiaali niiltä osin kuin se oli hyödynnettävissä tämän työn yhteydessä.

Toisessa vaiheessa suoritettiin simulointilaskelmat valituille esimerkkitalville. Tarkastellut talvet olivat 2003–2004 (leuto), 1981–1982 (keskimääräinen), 2002–2003 (ankara), 1986–1987 (erittäin ankara). Simulointien tuloksena saatiin määritettyä tarvittavan lämpöenergian määrä, jotta jään paksuus rännin keskellä ei ylitä 1,0 metriä leutoina ja normaaleina talvina, eikä 1,3 metriä ankarina ja erittäin ankarina talvina. Toisessa vaiheessa kehitettiin myös talven 2003–2004 MP Vekaran koeajotulosten perusteella transit-simulointiohjelma, joka laskee MP Vekaran nopeuden halutuissa jääolosuhteissa. Transit-simuloinnit tehtiin MP Vekaran runkomuodolle aluksen uidessa Saimaan kanavan maksimisyväydessä 4,35 m ja aluksen konetehoksi määritettiin suomalais-ruotsalaisen 1A-jäämaksuluokan mukainen konetehto. Nopeuden avulla voitiin määrittää myös laivaliikenteen avustustarve ennustetuissa jääolosuhteissa.

Kolmannessa vaiheessa muodostettiin edellisten vaiheiden tuloksiin perustuvat johtopäätökset lisälämmön riittävydestä sekä verrattiin tuloksia esimerkiksi eri satamissa saatuihin kokemuksiin lisälämmön vaikutuksesta sataman jääolosuhteisiin. Tässä vaiheessa tarkasteltiin myös erilaisia talviliikennöintistrategioita sekä erilaisia järjestely- ja joustavuustekijöitä jotka ovat käytettävissä vaikeimpien jääolosuhteiden varalle.

### 3 Teoreettisten tarkasteluiden vertailu havaintojen kanssa

Saimaan kanavan jäänmuodostuksesta on kerätty runsaasti tietoa ja kokemuksia, mutta tieto rajoittuu alkutalveen. Liikennekausi on lopetettu tammikuussa, käytännössä viimeistään pakkasmäärän saavutettua mielekkään liikennöinnin rajana pidetyn 500 astevuorokautta. Varhaisia kokemuksia 80-luvun alkuun on käsitelty lähteessä [7].

80-luvun puolivälin jälkeen tärkein perusaineisto muodostuu kanavainsinööri Seppo Pirosen laatimista liikennepäiväkirjoista, veden lämpötilamittauspöytäkirjoista sekä jääprofiilimittauspöytäkirjoista. Kanavahenkilökunnan (Piironen, Vesa, Voutilainen) kokemukset ja kommentit ovat täydentäneet tätä tietopankkia arvokkaalla tavalla.

Seuraavassa jään muodostusprosessi on erotettu kanavassa juoksetettavan lämpöenergian aiheuttamasta jään sulamisprosessista. Tätä voidaan perustella sillä, että jään muodostus tapahtuu valtaosin lohkarajakerroksen pinnassa eikä kanavaveden keskilämpötilalla ole tässä kerroksessa merkitystä. Jään sulaminen taas tapahtuu valtaosin lohkarajaa/jääsohjoikerroksen alapinnassa, eikä ilman lämpötilalla ole tässä kerroksessa merkitystä.

Jään muodostumisprosessi kanavassa jakautuu kahteen vaiheeseen. Ensi vaiheessa jääkansi kanavapoikkileikkauksessa on epäyhtenäinen tai liikenteen rikkoma. Lohkarajaa syntyy koko kanavapoikkileikkauksen leveydeltä.

Toisessa vaiheessa jääkansi on stabiloitunut kanavapoikkileikkauksen reunoilta. Uutta lohkarajaa syntyy vain rännialueella. Reuna-alueilla stabiloitunut ja yleensä lumen peittämä lohkarajakerros jäätyy hitaasti alaspäin jäätymisrintaman ollessa ainakin aluksi lohkarajakerroksen sisällä.

Lohkarajaan sulamisprosessista lämpöenergian vaikutuksesta on kertynyt tietoa satamista ja myös Saimaan kanavalta, kun lämmintä vettä on juoksetettu kanavan suulta alaspäin. Lämpöenergiaa siirtyy erityisesti karkean lohkarajakerroksen alapintaan ja sekoittuneessa virtauskentässä varsin tehokkaasti. Sulamista tapahtuu merkittävässä määrin myös jäälohkareiden sekoittuessa lämpimään veteen aluksen kulun yhteydessä.

Satamista ja Saimaan kanavalta kertyneiden kokemusten, havaintojen ja analyysien perusteella vain ulkoisilla lämpölähteillä on ratkaisevaa merkitystä laajamittaisen jäätälanteen hallinnan kannalta. Geotermisen lämmönjohtumisen merkitys kanavajaksoilla on todettu kanavajaksoilla vähäiseksi ja rajoittuvan lähinnä alkutalveen [8]. Järvijaksoilla ja järvijaksoilta kanavajaksoille siirryttäessä merkitys voi olla hiukan suurempi. Lähteillä voi olla jonkin verran paikallista merkitystä.

#### 3.1 Jään muodostumisprosessin ensivaihe

Liikennöidyssä kanavassa vesi sekoittuu. Lämpöhukka vapaasta vedenpinnasta on Saimaan kanavalla (tuulen keskinopeus 3 – 4 m/s) noin  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$ , siis  $200 \text{ W}/\text{m}^2$  veden ja ilman lämpötilaeron ollessa  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jäätä alkaa varsinaisesti muodostua, kun veden lämpötila on pudonnut lähelle jäätympistettä. Tämä tapahtuu tyypillisesti pakkasmäärän saavutettua noin 30 astevuorokautta, kun kanavapoikkileikkaukseen ei johdu merkittäviä määriä lämpöä.



Pakkasmäärää laskettaessa suojajaksot vähentävät määrää, kun pakkassummaa laskettaessa näin ei tapahdu.

Jään muodostumisprosessin ensi vaiheessa jääkansi on epäyhtenäinen tai liikenteen rikkoma koko kanavapoikkileikkauksessa. Kuten Kuva 1:sta näkyy, pinnassa on edelleen runsaasti jäätymiselle altista vapaata vettä. Jäälautat ovat osin pinnasta kastuneita. Jään muodostukseen liittyvä lämpöhukka on tässä vaiheessa suuruusluokkaa  $10 - 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$  koko kanavan leveydeltä riippuen ennen kaikkea vapaan veden suhteellisesta määrästä pinnassa.

Jääkansi stabiloituu kanavapoikkileikkauksen reunoilta kunnon pakkasjakson aikana, kun lohkarjääkerros on riittävän paksu (Kuva 2). Esimerkiksi talvella 2001 stabiloituminen tapahtui, kun pakkasmäärä oli noin 200 astevuorokautta [5]. Lohkarejään keskipaksuus oli stabiloitumisvaiheessa mittauksen perusteella noin 0,85 m. Luonnollisesti myös liikennöinnin aiheuttaman aaltoilun intensiteetti vaikuttaa stabiloitumiseen.

Havaintojen perusteella näyttää siltä, että kun ensimmäisen vaiheen jäätymisperiodi on pitkä ja pikkupakkaset vallitsevia, lohkarjään keskipaksuus kohoaa suureksi ennen jääkannen stabiloitumista [9]. Myös lumisadanta ja lumituiskut voivat vaikuttaa merkittävästi lohkarjään määrään. Stabiloituminen tapahtuu tyypillisesti pakkasmäärän ollessa noin 200 astevuorokautta ja lohkarjään keskipaksuus näyttäisi tällöin vaihtelevan välillä  $1 \pm 0,2 \text{ m}$ .



Kuva 1 Jäättilanne kanavalla 29,5 km:n kohdalla 3.1.2001 pakkasmäärän ollessa noin 110 astevuorokautta [5].



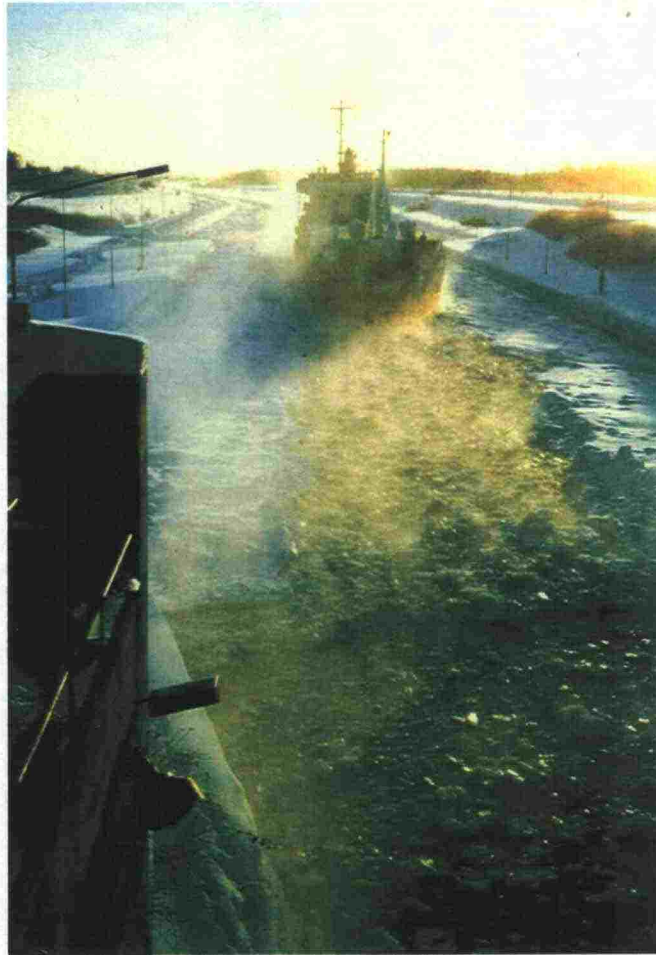
*Kuva 2 Jäätilanne kanavalla 29,5 km:n kohdalla 29.1.2001 pakkasmäärän ollessa noin 205 astevuorokautta [5]. Jääkansi on alkanut kiinteytyä reunoiltaan kuvaushetkeä edeltäneen pakkasjakson aikana.*

## 3.2 Jään muodostumisprosessin toinen vaihe

Kun jääkansi on stabiloitunut kanavapoikkileikkauksen reunoilta, lämpöhukka ja tähän liittyvä jäänmuodostus tapahtuu valtaosin rännissä. Tilanne näkyy Kuva 3:sta. Rännin ulkopuolella lohkarajakerroksen sisällä tapahtuvalla hitaalla jäätymisellä alaspäin ei ole juuri merkitystä tämän tarkastelun kannalta.

On jo pitkään tiedetty, että toistuvasti murrettavan lohkarajakerroksen paksuuskasvu on lähes lineaarista, kun tasojaan paksuuskasvu hidastuu parabolisesti pakkasmäärän funktiona [10,11]. Sandqvist [12] kehitti lohkarajakerroksen paksuuskasvun arvioimiseksi algoritmin, jossa kutakin murtokertaa vastaava lohkarajakerroksen paksuuslisäys laivan leveyttä kohti laskettiin kertomalla edellisestä murtokerrasta kertynyt pakkasmäärä kokemukseräisellä kertoimella 1,2. Kerroin on saatu kahden lohkarajaprofiilin kartoituksista Luulajan edustalla talvella 1978–1979. Murtokertojen määrä oli noin 30 ja niiden välinen pakkassumma vaihteli mitättömästä 350 astevuorokauteen.

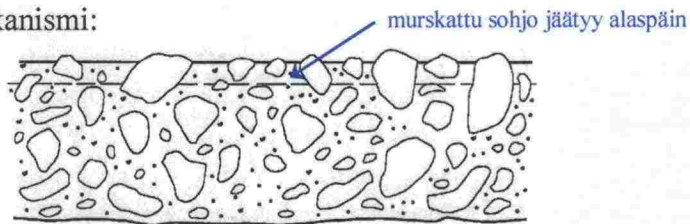
Eranti [1, 12] lähti liikkeelle toistuvasti murrettavan rännin olemuksesta ja käyttäytymisestä (Kuva 4) ja laski sohjomekanismiin ja lohkarimekanismeihin liittyvää lämpöhukkaa. Tätä tarkoitusta varten mekanismit on yhdistetty Kuva 5:n kaavoilla. Kaavat painottavat sohjomekanismia murtamisen ollessa tiheää. Kovilla pakkasilla ja harvalla murtotiheydellä lohkarimekanismi saa enemmän painoa. Lämpöhukka riippuu myös jonkin verran lohkarajakerroksen paksuudesta. Tätä ei kaavoissa ole otettu huomioon, mutta toisaalta lohkarajakerroksen paksuusvaihtelu on tässä tapauksessa varsin rajallinen, rännissä runsaasta puolesta metristä 1,3 metriin.



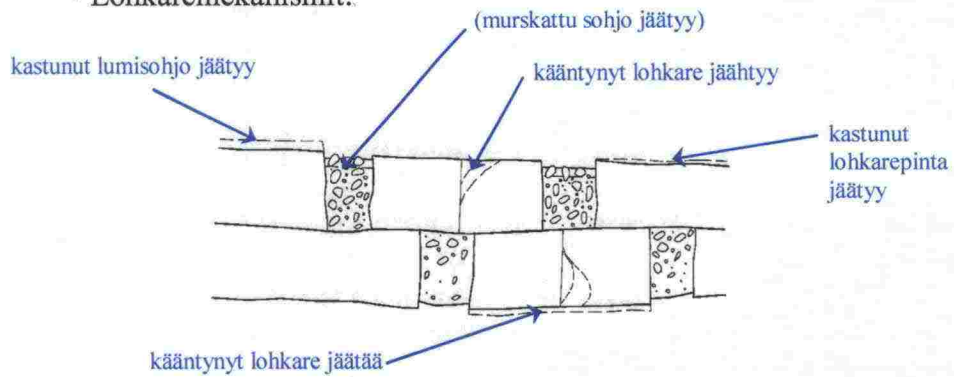
*Kuva 3 Jäänmuodostusta Saimaan kanavalla jääkuoren stabiloiduttua rännin ulkopuolella [7].*



• Sohjomekanismi:



• Lohkaremekanizmit:



Kuva 4 Jäänmuodostukseen liittyviä mekanismeja rännissä.



- Rännin leveys  $B_r \sim B_1 + 2 \cdot 2,5$  m,  $B_1$  = aluksen leveys
- Uuden lohkarjään muodostukseen liittyvä lämpöhukka rännissä

$$q = 12 \cdot T^{0,9} \cdot n^{0,3} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$T$  = keskimääräinen pakkaslukema murtokertojen välillä ( $^{\circ}\text{C}$ )

$n$  = murtotaajuus (kerta/vrk)

- Syntyvän lohkarjään määrä  $V$  [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]

$$V_L = (q \cdot t \cdot B_r) / (L \cdot (1 - e))$$

$t$  = aika murtokertojen välillä (s)

$L$  = jään sulamislämpö ( $307 \text{ MJ/m}^3$ )

$e$  = lohkarjään huokoisuus (käytetty 0,33)

*Kuva 5 Lohkarjään muodostuksen arviointi rännissä.*

Sandqvistin algoritmi perustuu kertaluokkaa pienempään murtotaajuuteen, kuin mitä Saimaan kanavalla toteutuu. Sen antama jäänmuodostus on merkittävästi pienempää kuin mitä Saimaan kanavalla ja Suomen satamissa, viimeksi Helsingin Eteläsatamassa talvella 2003–2004, on havaittu. Siksi seuraavassa on käytetty Kuva 5:n kaavoja.

### 3.3 Laskettujen jään paksuusarvojen vertailu mitattuihin arvoihin

Merenkulkulaitos on tehnyt Saimaan kanavalla lohkarajään paksuusmittauksia eri vuosina liikennöintikauden loputtua. Tuloksia on kerätty yhteen lähteeseen [3]. Taulukko 1:ssä on verrattu mitattuja ja edellä kuvatun kaksivaiheisen mallin avulla laskettuja keskimääräisiä lohkarajään paksuuksia Kansolassa ja Nuijamaan kalliioleikkauksessa. Näiden mittauspisteiden voidaan arvioida olevan suurin piirtein juokсутusten vaikutusten ulkopuolella.

Lohkarajään lasketut paksuusarvot on saatu siten, että lohkarajään keskipaksuudeksi on oletettu kanavapoikkileikkauksessa 1 m pakkasmäärän saavutettua 200 astevuorokautta. Sen jälkeen lohkarajään paksuuskasvu liikennekauden loppuun on arvioitu keskimääräisen liikennetiheyden ja lämpötilan perusteella olettaen lohkarajään syntyvän 17 metriä leveässä rännissä. Murtajaliikenne on otettu jäänmurtolaskelmissa huomioon kertomalla rahtilaivojen kulkukerrat luvulla 1,6.

*Taulukko 1 Lohkarajääkerroksen laskettu keskipaksuus eri vuosina verrattuna liikennöintikauden päätteeksi mitattuun.*

Talvi	Kansola (28,45 km)		Kalliioleikkaus (22,15 km)	
	Mitattu (cm)	Laskettu (cm)	Mitattu (cm)	Laskettu (cm)
85/86	135	179	153	205
86/87	162	180 <sup>1</sup>	180	195 <sup>1</sup>
87/88	133	136	149	147
88/89	135	151	196	180
89/90	133	107	129	109
90/91	157	121	179	128
91/92	78	105	107	107
93/94	124	136	129	149
95/96	147	137	149	150
96/97	112	135	161	146
01/02	182 <sup>2</sup>	162	197 <sup>2</sup>	182

<sup>1</sup> Liikennekatko otettu huomioon  
<sup>2</sup> Seppo Piironen, Järvi-Suomen merenkulkupiiri, muistio 10.1.2002

Tutkittujen talvien pakkasmäärät liikennekauden loppuun mennessä olivat välillä 226 astevuorokautta (91/92) ja 560 astevuorokautta (85/86). Poikkeustalvena 86/87 viimeiset laivat ajettiin kanavasta 13.1. pakkasmäärän oltua 690 astevuorokautta, mutta tätä oli edeltänyt 8 vuorokauden erittäin ankara pakkasjakso, jolloin liikenne oli totaalisesti pysähdyksissä.

Taulukosta nähdään, että lasketut ja mitatut jään paksuusarvot vastaavat melko hyvin toisiaan. Vuonna 85/86 lasketut lohkarajään paksuudet ovat selvästi suurempia kuin mitatut, mutta liikenne oli erittäin harvaa lähes kuukauden ajan liikennekauden lopulla, jolloin esiintyi kovia pakkasia. Valittu karkea lähestymistapa yliarvioi siten lohkarajään muodostusta.

Toisaalta talvina 89/90, 90/91 ja 01/02 mitattiin suurempia lohkarajään paksuuksia kuin mitä laskettiin. Kyseisille talville on tunnusomaista pitkä pikkupakkasten merkeissä kulunut alkutalvi. Vapaata vettä on ollut paljon lohkarajääkerroksen pintakerroksessa koko kanavan leveydeltä. Näissä olosuhteissa lohkarajäätä on voinut syntyä ennakoitua (1 m) enemmän ennen jääkannen stabiloitumista rännin ulkopuolella.

Talvelta 1999–2000 tehtiin Saimaan kanavalla koeajoja MS Jääkotkalla sydäntalvella liikennekauden päätyttyä [3]. Tähän liittyen on tehty tarkempia jäänmuodostuslaskelmia rännin leveydellä 14 m ajopöytäkirjan mukaisin ajoaskelin. Laskettuja jään paksuuksia on verrattu mitattuihin Taulukko 2:ssa. Kehitetty jäänmuodostusmalli toimii tyydyttävästi myös tässä tapauksessa.

Lohkarajään paksuudet on mitattu kairanreiästä sauvalla, johon on liitetty suoraan kulmaan asettuva puolen metrin uloke. Sauvaa nostettaessa sitä on pyöritetty. Kun sauva on kolahtanut jäähän, on saatu paksuuslukema (kanavateknikko Voutilaisen mittauskuvaus).

Mittaustapa antaa jossain määrin varmallalla puolella olevia arvoja lohkarajääkerroksen keskipaksuudelle. Toisaalta vesimassan vähäisetkin termiset reservit aiheuttavat erityisesti yhdessä virtausten kanssa jäälohkareiden pyöristymistä ja lohkarajääkerroksen konsolidoitumista.

### 3.4 Jään sulaminen kanavassa veteen johdetun lämpöenergian vaikutuksesta

Voimalaitosten ja teollisuuslaitosten lämpöpäästöjen tarkkailujen yhteydessä on havaittu, että vesimassassa voi olla kerrostuneena suuria määriä lämpöenergiaa ilman että tämä vaikuttaisi merkittävästi jään paksuuteen. Lämpöpäästöjen on myös havaittu kulkeutuvan pitkiäkin matkoja. Asia voidaan selittää veden huonon lämmönjohtavuuden avulla.

Toisaalta satama-altaissa on menestyksellisesti hallittu jäätilannetta vähäisiinkin lämpöpäästöihin tai termisiin reserveihin tukeutuen (kts. liite 3). Lämmin vesi sekoittuu lohkarajäähän sulattaen sitä tehokkaasti virtausten yhteydessä ja satama-altaassa liikkuvien alusten sotkiessa vesimassaa.

Satamissa on havaittu, että vain ulkoisilla lämmönlähteillä on merkitystä lohkarajään paksuuskehityksen hallinnassa. Geotermisen energian merkitys on marginaalinen ja se riittää kovina talvina kohdennettunakin korkeintaan lohkarajään pitämiseen irti laiturimuurista.

Geotermisen energian merkitystä jäätilanteen hallintaan on selvitetty myös Saimaan kanavalla [8]. Alkutalvesta sillä on jonkin verran merkitystä. Liikennöinnin jatkuessa läpi vuoden merkitys jää marginaaliseksi.

Taulukko 2 Mitatun jään paksuuskehityksen vertailu laskettuun liittyen MS Jääkotkan koeajoihin talvella 1999–2000.

• Tarkempi laskelma ajoaskeleittain

19.11.1999 pakkasmäärä 30 °C·vrk  
 19. 1.2000 pakkasmäärä 200 °C·vrk  
 23. 1.2000 liikenne loppuu, 259 °C·vrk  
 2.2.2000 koeajot alkavat, 335 °C·vrk  
 13.3.2000 tarkastelujakso loppuu, pakkasmäärä 509 °C·vrk  
 23.3.2000 koeajot loppuvat

Päivä- määrä	Lohkarejään keskipaksuudet (cm)				
	Kansola (29,8 km)	Suikki (27,45 km)	Laskelma (B <sub>r</sub> =15 m)	Kallio- leikkaus (22,2 km)	Laskelma (B <sub>r</sub> =15 km)
27.1.	79	102	114	127	120
7.2.	98 (+19)	112 (+10)	121 (+7)	158 (+31)	130 (+10)
21.2.	108 (+29)	99 (-3)	125 (+11)	157 (+30)	134 (+14)
13.3.	142 (+63)	144 (+42)	144 (+30)	151 (+24)	160 (+40)

19.11.1999 - 19.1.2000 lumisadanta 140 mm  
 (vetenä), lohkarajaksi muutettuna 23 cm.

Lämpöenergian kulumista jään sulattamiseen Saimaan kanavalla selvitettiin ensimmäisen kerran tosissaan lämpimän veden purkukokeiden yhteydessä talvella 2000–2001 [5]. Mittaukset kattoivat sekä siirrettävästä kattilalaitoksesta kanavaan johdetun lämpöenergian (4 MW) että kanavan suulta alaspäin juoksetun lämpöenergian (noin 100 MW) kulumisen heti liikennekauden loputtua. Kokeita toistettiin kevättalvella.

Talvella 2003/04 tehtyjen talviliikennöntikokeiden yhteydessä juoksettiin lämpöenergiaa kanavan suulta alaspäin ja tehtiin perusteellisempia jään paksuuskartoituksia ja veden lämpötilamittauksia. Liikennöintiä, jään paksuuksia ja veden lämpötiloja koskevia tietoja on annettu liitteissä 4, 5 ja 6. Kanavan veden keskilämpötilaprofiilit on eri tilanteissa näytetty Kuva 6:ssa ja Kuva 7:ssä.

Vaikka lämmön kulumisen jään sulatukseen onkin jossain määrin dynaaminen ja epälineaarinen prosessi, mitatut lämpötilaprofiilit antavat pohjaa tähän liittyvien tekijöiden analysoimiseksi. Sulamisen yhteydessä kanavassa hitaasti virtaavalla vesimassalla (virtausnopeushaarukka kokeissa ja kaavailuissa 2–8 cm/s) on taipumus kerrostua siten, että



vesi on lähellä pohjaa lämpimämpää kuin lähellä lohkarajakerroksen alapintaa). Vesimassa sekoittuu kuitenkin tehokkaasti liikennöinnin yhteydessä [5] ja sulkujen kohdalla.

Lohkarajaan sulaminen lämpimän veden virratessa kanavapoikkileikkauksessa on erittäin monimutkainen prosessi, jonka hallitsemiseen ei ole löytynyt tutkimustietoa. Onneksi tämä ilmiö tarvitsee hallita vain lohkarajakerroksen keskipaksuuden vaihdellessa vajaasta metristä kahteen kysymykseen tulevilla virtausnopeuksilla.

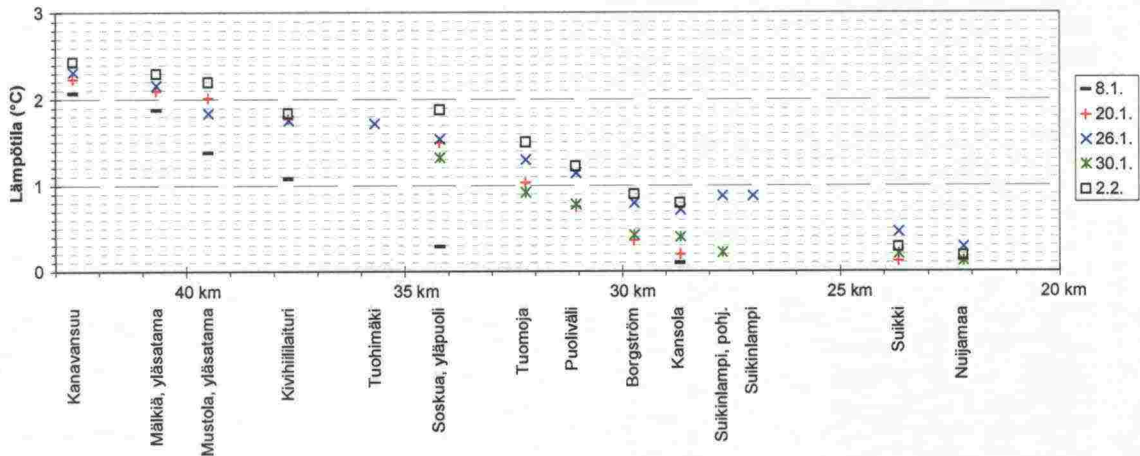
Juoksutuskokeiden yhteydessä mitattua kanavaveden lämpötilatietoa analysoimalla on päädytty Kuva 8:ssa esitettyyn riippuvuuteen. Esitetty voimakas riippuvuus veden virtausnopeudesta ja lohkarajakerroksen paksuudesta muistuttaa lämmön siirtymistä ilmasta veteen, kun otetaan huomioon pinnan karkeuden vaikutus tuulen nopeusprofiiliin [11]. Karkeaa lohkarajapintaa on enemmän kuin sileää tasojaan alapintaa ja karkea pinta aiheuttaa enemmän pyörteilyä, mikä edistää lämmön siirtymistä vedestä jään sulattamiseen. Toisaalta lämpöenergian osittain pyöristämä ja sulattama lohkarajakerroksen alapinta ei omaa yhtä suurta kontaktialaa eikä aiheuta yhtä paljon pyörteilyä, mikä selittää tasoittumiskertoimen C.

Veden lämpötilan putoaminen juoksutusten lopettamisen jälkeen liikennöintikokeiden yhteydessä antaa pohjaa alusliikenteen aiheuttaman jään sulamisen arviointiin lämpimän veden sekoittuessa lohkarajamassaan. Ensimmäisen kertaluvun approksimaatiossa sulatukseen kuluva energia on suoraan verrannollinen veden lämpötilaan. Rahtialuksen tai jäänmurtajan kulkukertaan liittyvä sulatusteho tai vesimassan lämpöhukka on  $50 \text{ MJ}/(\text{C} \times \text{m})$ . Väyläalus Kummelin aluskerroin on 0,5 ja rahtialuksen, jäänmurtajan ja väyläaluksen muodostaman saattueen aluskerroin on 2.

### 3.5 Lämpöenergian kuluminen jään sulatukseen – mitattujen ja laskettujen arvojen vertailu

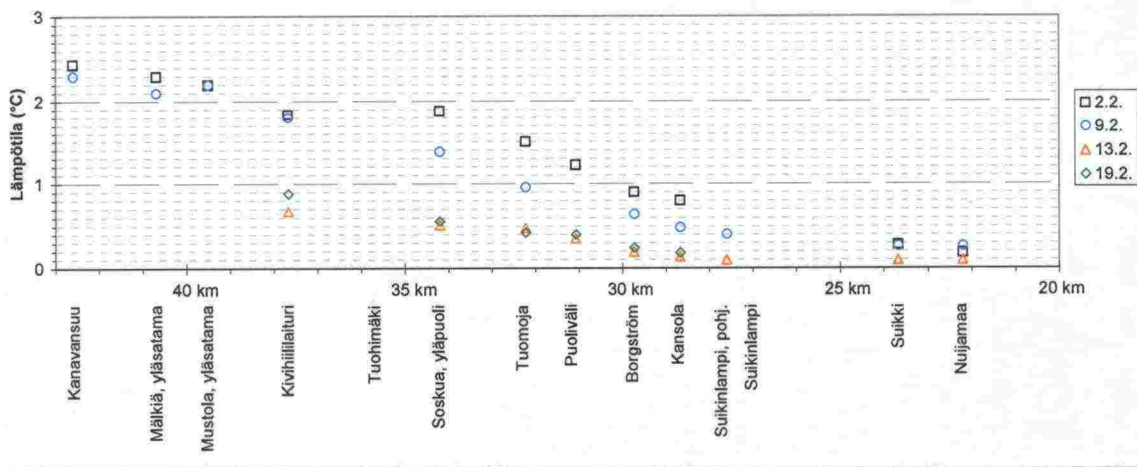
Kun kanavapoikkileikkauksessa virtaavan veden lämpösisältöä verrataan eri pisteissä, saadaan arvio kullakin mittausvälillä kuluneen lämpöenergian määrästä. Kun lisäksi tiedetään jäätilanne eri väleillä, voidaan eri väleillä jään sulatukseen kuluneen energian määrää verrata kehitetyn sulamismallin avulla laskettuun. Samalla saadaan tietoa myös lämpöhukista niissä tilanteissa, jotka ovat sulamismallin pätevyysaluetta keveämpiä.

- Juoksutus 15.12. - 20.1. 10 m<sup>3</sup>/s
- Pakkasmäärä 10.1. 200 astevuorokautta
- Talviliikenne loppui 16.1.
- Juoksutus 20.1. - 2.2. 5 m<sup>3</sup>/s
- Kummelin ajot Mustolan ja Nuijamaanjärven välillä 23.1. - 30.1.
- Pakkasmäärä 2.2. 400 astevuorokautta

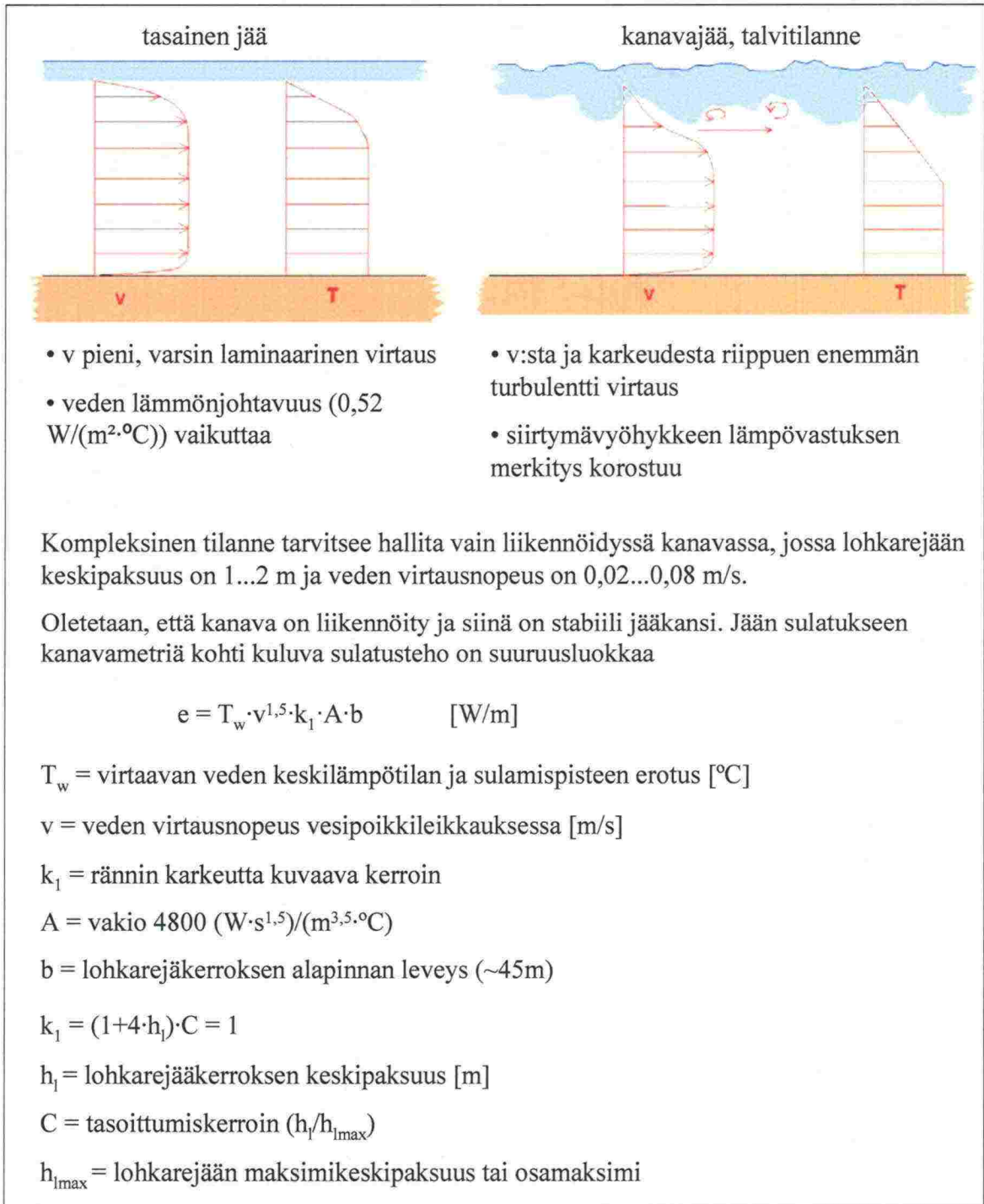


Kuva 6 Saimaan kanavan Suomenpuoleisen osan veden mitatut keskilämpötilat 8.1.–2.2.2003.

- Pakkasmäärä 2.2. noin 400 astevuorokautta
- Juoksutus vähäinen (< 1 m<sup>3</sup>/s)
- Kummelin ajot 2. - 6.2.
- Arppen, Vekaran ja Kummelin ajot 10. - 16.2.
- Pakkasmäärä 19.2. 550 astevuorokautta



Kuva 7 Saimaan kanavan Suomenpuoleisen osan veden mitatut keskilämpötilat 2.2.–19.2.2004.



Kuva 8 Laskentamalli sulatusenergian arvioimiseksi jään peittämässä juoksutettavassa ja liikennöidyssä kanavassa.

Kuva 9:ssä on esitetty liikennöidyssä kanavassa juoksutettavan veden lämpöhukka alkutalvesta ennen jääkuoren stabiloitumista. Lämpöhukan voimakas heilahtelu eri mittausväleillä johtunee ennen kaikkea mittauspisteiden sijainnin edustavuuteen liittyvistä ongelmista. Myös veden lämpötilavaihtelut virtauskentässä ja mittaustarkkuuskysymykset ovat voineet vaikuttaa tähän.

Taso 10 kW/m vastaa 50 metriä leveässä kanavapoikkileikkauksessa lämpöhukka-arvoa 200 W/m<sup>2</sup>, mikä on karkeasti ottaen avoveden lämpöhukka lämpötilassa -10 °C. Jään sulaminen on siis kanavan yläpäässä tässä tilanteessa lähellä tasapainoa jään muodostuksen kanssa.

Kanavan suun juoksutuksen lähes 100 MW:n tehosta on tässä alkutalven tilanteessa jäljellä vain 10 % Soskuan yläsatamaan tultaessa. Soskuan sulun alapuolella jään muodostus on siten lähes normaalia.

Kuva 10:ssa on esitetty tilanne liikennöintikauden loputtua. Lämpöenergia näyttäisi luistavan varsin liukkaasti kanavan loppupään (Kanavansuu – Soskuan sulkku) läpi. Tämä onkin luonnollista, koska loppupää on ohuen ja alapinnastaan termisesti varsin tasaiseksi kuluneen jääkerroksen peitossa.

Soskuan sulun alapuolella tilanne muuttuu. Nyt varsin lämpimänä virtaavan vesimassan lämpöhukka kohoaa suureksi sen tultua karkean ja paksun lohkarejään peittämään kanavansasaan. Lohkarejääkerros sulaa voimakkaasti. Välillä Borgström–Nuijamaa vesimassa on jo kylmää. Lämpöhukka pienenee veden lämpötilan pudotessa lähelle nollaa.

Mainittakoon, että 31.1.2001 juoksutuskokeen yhteydessä tehdyissä mittauksissa [5] saatiin liikennekauden päätteeksi lämpöhukaksi noin 8 kW/m välillä Hiililaituri–Soskuan yläpuoli veden keskilämpötilan oltua 1,3 °C ja juoksutuksen 10 m<sup>3</sup>/s. Lohkarejääkuori oli tällä välillä ohut, mutta vain vähän kulunut. Veden keskilämpötila oli 1.2.2001 0,37 °C välillä Soskua + 730 – Soskua + 1980 ja lämpöhukka noin 6 kW/m. Lohkarejääkerroksen paksuus oli noin 0,85 m. Tulokset ovat siis sopuissa Kuva 10:n tulosten kanssa.

Kuva 10:een on merkitty myös Kuva 8:n mukaan laskettu lämpöhukka. Laskelmissa on oletettu jään paksuudeksi liikennöintikauden lopussa 16.1. jäänmuodostusmallin mukaisesti 1,15 m Tuomojasta alaspäin. Lämpimän veden vaikutusten ei siis oletettu ulottuvan vielä tuona päivänä Tuomojan alapuolelle liikennöintikauden aikana. Laskelmissa on käytetty 21.1. mitattuja lohkarejään paksuuksia. Kuvasta nähdään, että lasketut lämpöhukka-arvot vastaavat melko hyvin mitattuja arvoja tämän selvityksen kannalta relevanteissa jääolosuhteissa Tuomojan alapuolella.

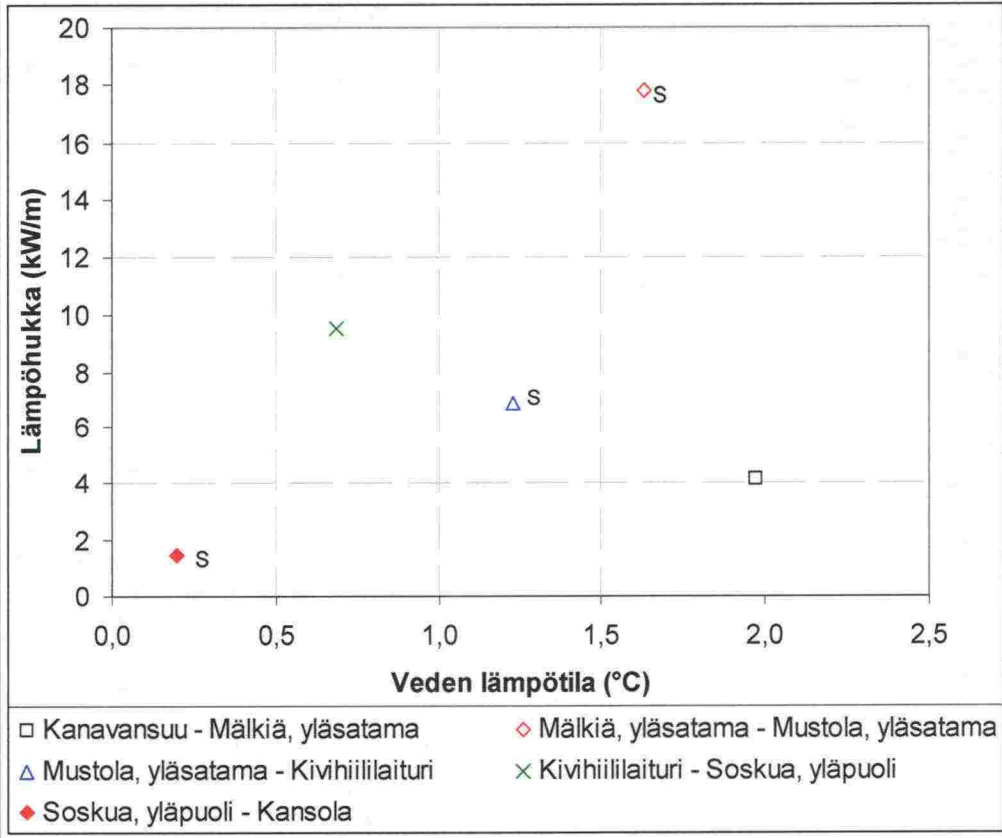
Itse asiassa mitatut lämpöhukka-arvot vastaisivat melko hyvin mallin avulla laskettuja myös Soskuan yläpuolella, kun otetaan huomioon, että jääkansi oli tällä osalla termisestä kulutuksesta johtuen pikemmin tasojäättä kuin lohkarejäättä (karkeuskerroin lähellä yhtä). Kansolan ja Nuijamaan välillä mitattu lähes olematon lämpöhukka voi johtua virtaavan veden kerrostumisesta, ongelmista lämpötilamittauksissa, lähteiden ja geotermisen lämmön vaikutuksista tai näiden yhdistelmästä.

Kuva 11:ssa on esitetty lämpöhukka-analyysin tulokset perustuen veden lämpötilamittauksiin 26.1. Juoksutus oli pudotettu 20.1. arvoon 5 m<sup>3</sup>/s. Kummeli on kulkenut kerran edestakaisin Mustolan sataman ja Nuijamaan välin 23.1. Nähdään, että lämpö liukuu jo paremmin kanavaa alaspäin.

Kuva 11:aan on laskettu myös lämpöhukkamallin antamat lämpöhukka-arvot uudella juoksutusarvolla. Lohkarejään paksuusarvot on interpoloitu 20.1. ja 9.2. mitatuista arvoista olettaen ilman lämpötilatietojen perusteella, että lohkarejään paksuus oli 2.2. sama kuin 9.2. mitattu. Interpolaatio välillä 20.1.–2.2. on lineaarinen.

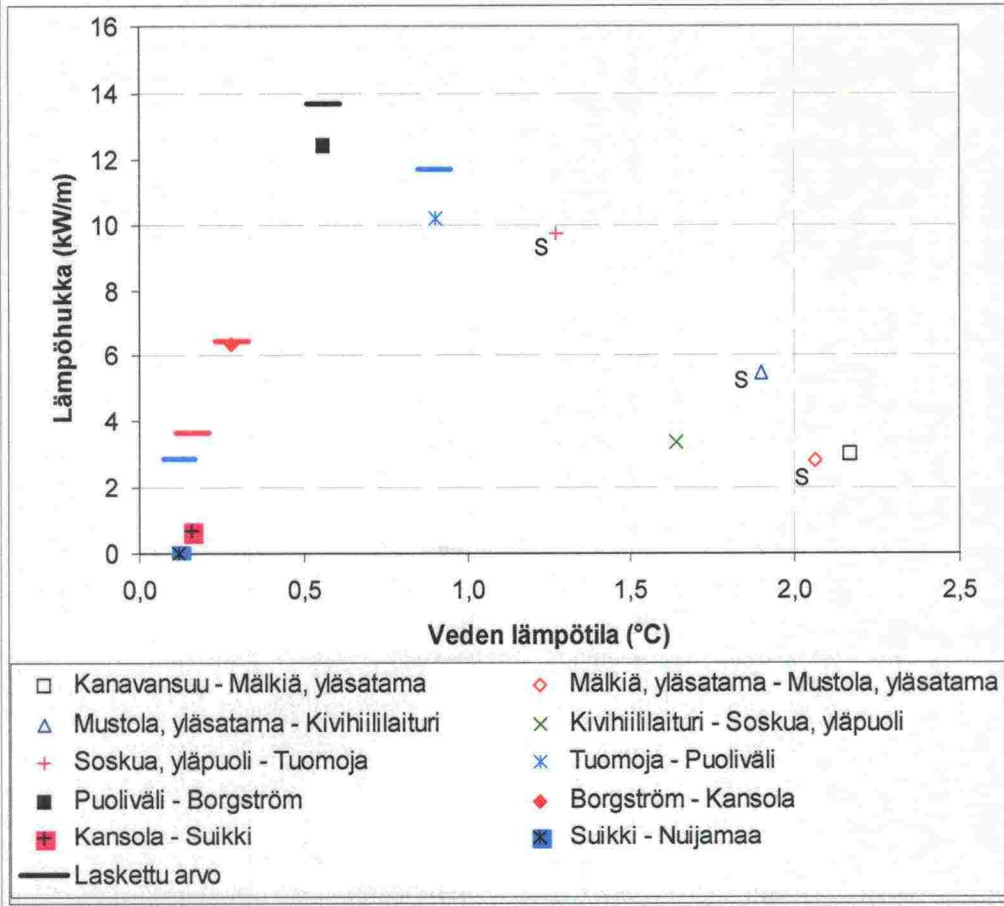
Nähdään, että malli toimii tarkasteluvälillä kohtalaisesti ottaen huomioon virtauksen havaittu kerrostuminen ja muut edellä esitetyt ongelmat Borgströmin alapuolella.

- Juoksutus n. 10 m<sup>3</sup>/s
- Lämpötila n. -10 °C
- Pakkasmäärä 175 astevuorokautta
- Noin 3 kulkukertaa vuorokaudessa
- Jäätä sen verran että, että rännin reunasta pääsi mittaamaan lämpötilan. Ainakin alkupäässä ränni avovettä ja irtolauttoja. Loppupäässäkin tuskin kovin karkea.



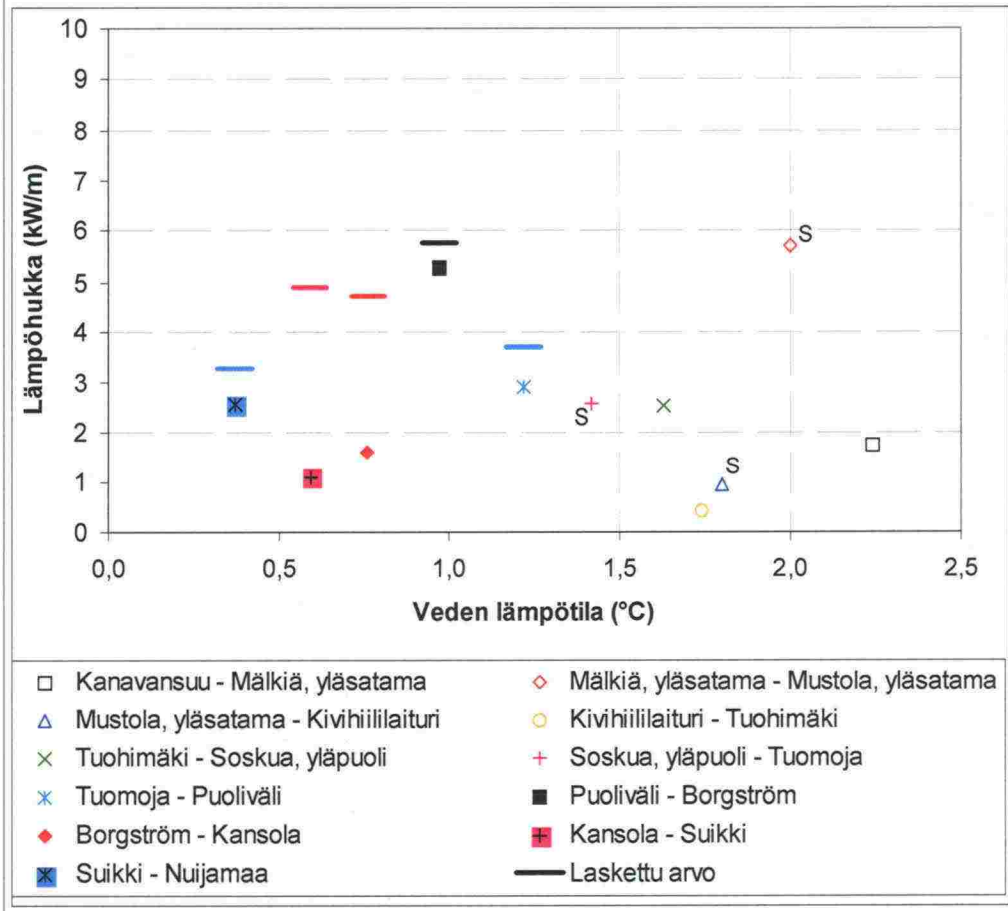
Kuva 9 Veden keskilämpötiloista lasketut lämpöhukat eri kanavajaksoilla 8.1.2004.

- Pakkasmäärä 290 astevuorokautta
- Talviliikenne loppui 18.1. (Tammikuu 32 kulkukertaa, 15.1. laiva alas, 16.1. laiva alas)
- Juoksutus 10 m<sup>3</sup>/s (4 km/vrk)
- Lämpötila n. -10 °C
- Kevyen liikennöimättömän rännin tilanne Kansolaan asti kovalla juoksutuksella



Kuva 10 Veden keskilämpötiloista lasketut lämpöhukat eri kanavajaksoilla 20.1.2004 verrattuna mallin avulla laskettuihin arvoihin.

- Juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s
- Kummeli kulkenut 1-2 kertaa edestakaisin
- Lämpötila n. -10°C
- Pakkasmäärä 360 astevuorokautta
- Ei lunta
- Jääprofiili interpoloitu 21.1. ja 9.2. mitatuista arvoista



Kuva 11 Veden keskilämpötiloista lasketut lämpöhukat eri kanavajaksoilla 26.1.2004 verrattuna mallin avulla laskettuihin arvoihin.

Kuva 12:ssa on esitetty lämpöhukka-analyysin tulokset 30.1.2004. Tämä tilanne on sikäli mielenkiintoinen, että nyt talviliikenne on ollut päällä usean vuorokauden ajan. Veden kerrostumisen vaikutus vähenee, kun vettä sotketaan useita kertoja vuorokaudessa.

Talviliikenne näkyy veden keskilämpötila-arvojen selvänä laskuna koko tarkastelujaksolla. Veden lämpötilamittausten edustavuudelle ja tarkkuudelle asetettavat vaatimukset korostuvat.

Tässäkin tapauksessa mallissa tarvittavat lohkarejään paksuusarvot on interpoloitu 21.1. ja 9.2 mitatuista samalla tavalla kuin edellä. Nähdään, että mallin avulla lasketut lämpöhukka-arvot vastaavat kohtalaisen hyvin havaittuja, joskin heiluntaa on molemmille puolille. Kuvasta näkyy myös liikenteen osuus jään sulamiseen liittyvästä lämpöhukasta, joka on tässä tapauksessa selvästi virtauksen vaikutusta pienempi.

Kuva 13:ssa on esitetty lämpöhukka-analyysin tulokset 2.2. eli juoksutuksen lopettamispäivänä. Kanavalla ei ole ollut liikennettä muutamaan päivään, joten vesi on kanavassa lämmennyt. Virtaava vesimassa on myös voimakkaammin kerrostunutta etäämpänä Soskuan sulun alapuolella. Veden lämpötilamittauksiin liittyvät ongelmat ovat tässäkin kuvassa ilmeisiä.

Mainittakoon, että kevättalven juoksutuskokeissa 27.2.–12.3.2001 juoksutuksella  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  lämpöhukka oli Hiililaiturin ja Soskuan yläpuolen välillä  $0,8\text{--}1,6 \text{ kW/m}$  veden keskilämpötilan oltua  $2,1\text{--}2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vastaavasti välillä Tuomoja–Borgström lämpöhukka oli luokkaa  $3\text{--}5 \text{ kW/m}$  veden lämpötilan oltua  $1,3\text{--}2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun otetaan huomioon kevättalvella näillä väleillä vallinnut jäätilanne, tulokset sopivat hyvin yhteen Kuva 13:n tulosten ja edellä kehitetyn jään sulamismallin kanssa.

Vuoden 2004 talviliikennöintikokeissa jatkettiin liikennöintiä juoksutuksen lopettamisen jälkeen. Veden lämpötila kanavassa laski. Tilanne tarjoaa mahdollisuuden testata jään sulamismallia alusliikenteen osalta suoraan veden lämpötilatiedoista, koska virtauksen aiheuttama sulamiskomponentti oli käytännössä mitätön.

Tulokset on esitetty Kuva 14:ssa, Kuva 15:ssa ja Kuva 16:ssa. Nähdään, että lasketut lämpöhukka-arvot vastaavat pääpiirteissään mitattuja.

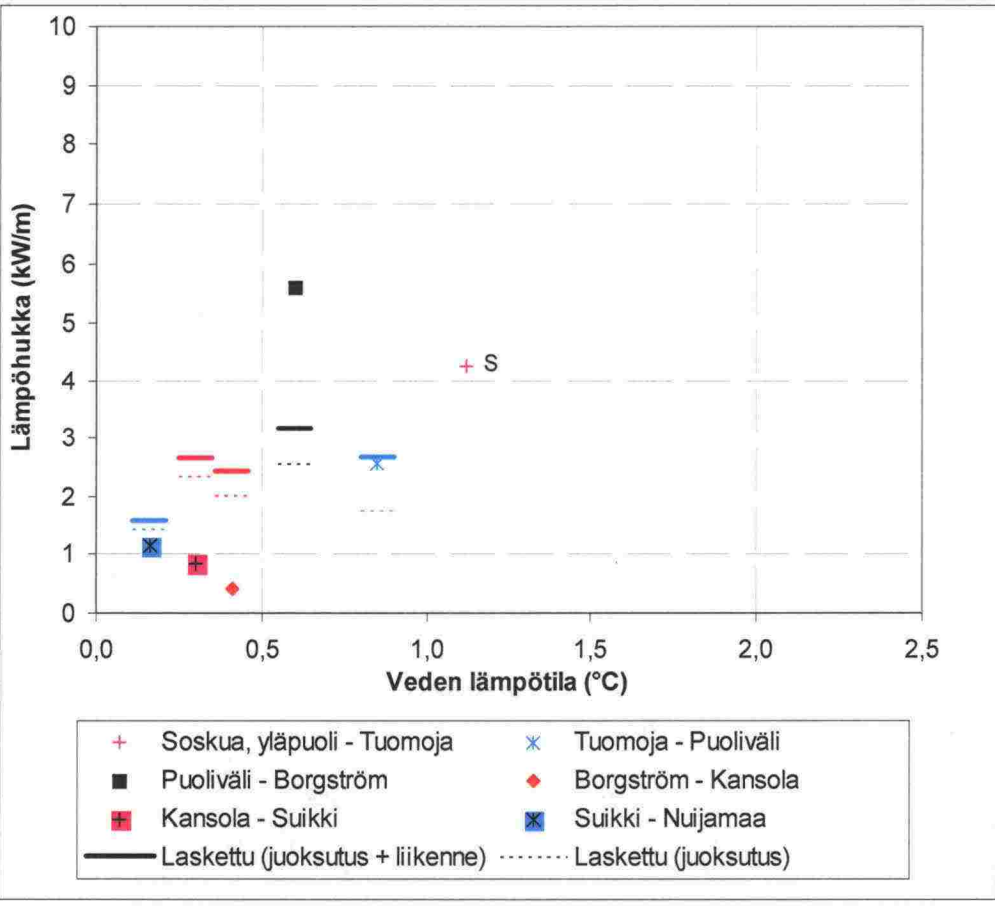
Tuloksia tarkasteltaessa voidaan tehdä seuraavat huomiot:

- Kanavassa tapahtui vain vähäistä juoksutusta lähinnä sulutukseen liittyen;
- Potkurivirtaukset ja lämmön valuminen juoksutuksen myötä alaspäin on voinut vaikuttaa veden lämpötiloihin Kivihiililaiturilla, koska alukset ovat kääntäneet heti sen yläpuolella;
- Geotermisellä lämmön johtumisella on laskelmien perusteella pieni vaikutus tuloksiin. Suuruusluokasta saa käsityksen Kuva 16:sta.

Yleishuomiona edellä esitetyistä tuloksista on se, etteivät sulkujaksojen lämpöhukat poikkea merkittävästi yleisestä linjasta. Sulut ovat kanavan kokonaislämpötalouden kannalta siten vain vähämerkityksellisiä detaljeja. Liikennöinnin kannalta ne ovat toki tärkeitä, koska niiden erityisongelmat on hallittava kaikissa tilanteissa.

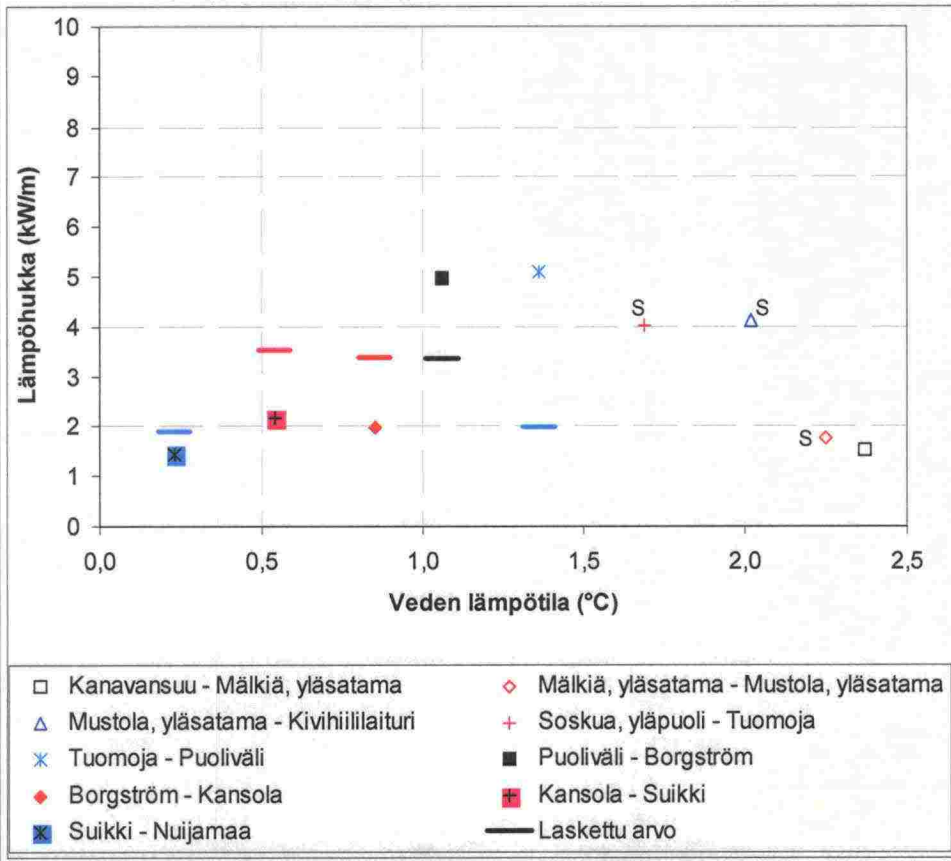


- Viikon aikana liikennöity Kummelilla Soskua-Nuijamaanjärvi n. 15 kertaa ja Soskua-Mustola n. 8 kertaa.
- Murtovaikutus Soskuan alapuolella noin 3 murtokertaa/vrk
- Lunta n. 10 mm (vedeksi muutettuna)
- Lämpötila -5 - -10 °C
- Pakkasmäärä 390 astevuorokautta
- Juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s



Kuva 12 Veden keskilämpötiloista lasketut lämpöhukat eri kanavajaksoilla 30.1.2004 verrattuna mallin avulla laskettuihin arvoihin.

- Ei liikennettä viikonloppuna
- Juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s
- Pikkupakkasta
- Lunta n. 20 mm (vedeksi muutettuna)
- Pakkasmäärä n. 400 astevuorokautta
- Jääprofiili mitattu 9.2.



Kuva 13 Veden keskilämpötiloista lasketut lämpöhukat eri kanavajaksoilla 2.2.2004 verrattuna mallin avulla laskettuihin arvoihin.

- Kummeli kulki viitenä peräkkäisenä päivänä (2.-6.2.) Yhteensä 10 kulkukertaa välillä Mustola-Soskua ja 20 kulkukertaa välillä Soskua-Nuijamaanjärvi.

- Juoksutus vähäistä, vesi seisoo.

- Alusliikenteen aiheuttama sulatuslämpömäärä on laskettu kaavalla

$$E_2 = k_2 \cdot T_w \cdot Q$$

$k_2$  on aluskerroin

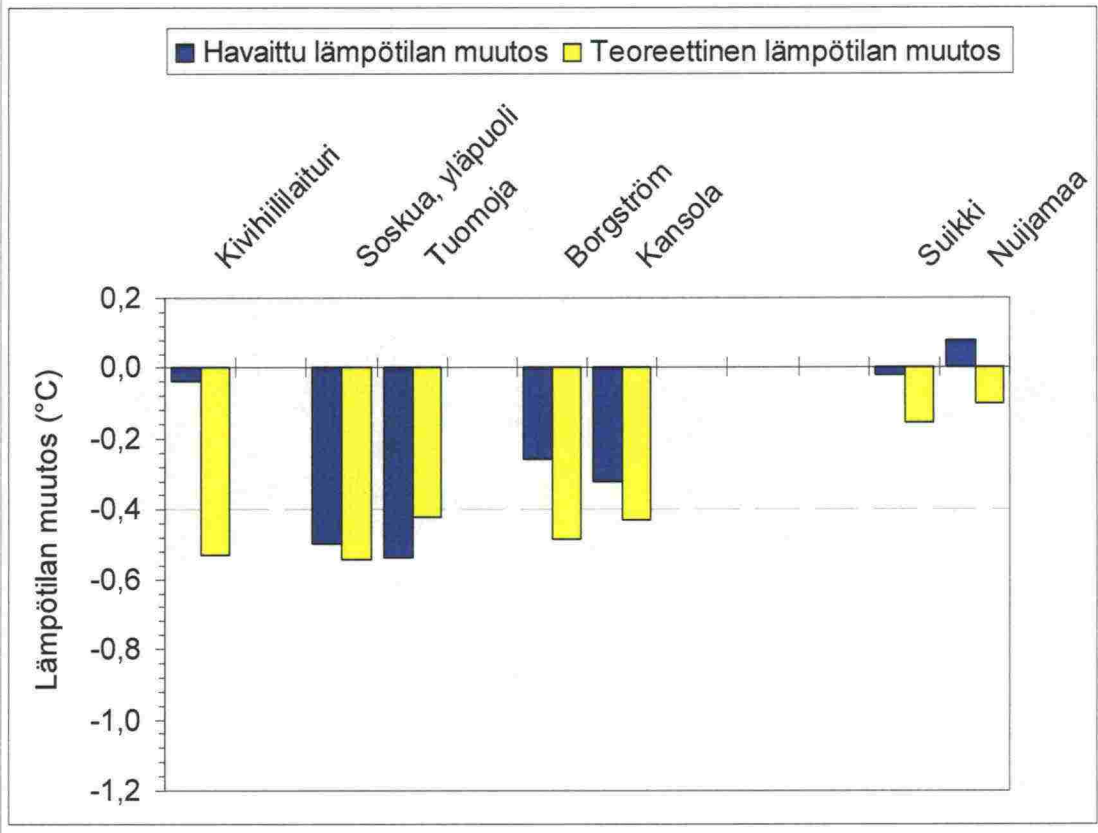
Kummeli  $k_2 = 0,5$

Rahtialus tai jäänmurtaja  $k_2 = 1,0$

Saattue Arppe, Vekara, Kummeli  $k_2 = 2,0$

$Q = 50 \text{ MJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$  / kulkukerta

$T_w =$  veden lämpötila ( $^\circ\text{C}$ )



Kuva 14 Veden keskilämpötilan havaittu ja mallin avulla laskettu muutos eri kohdissa kanavaa 2.-9.2.2004.

- Saattue Arppe, Vekara, Kummeli kulki kolmena peräkkäisenä päivänä (10.-12.2). Kulkukertoja päivässä kaksi, yhteensä kuusi kulkukertaa.
- Juoksutus vähäistä, vesi seisoo.
- Alusliikenteen aiheuttama sulatuslämpömäärä on laskettu kaavalla

$$E_2 = k_2 \cdot T_w \cdot Q$$

$k_2$  on aluskerroin

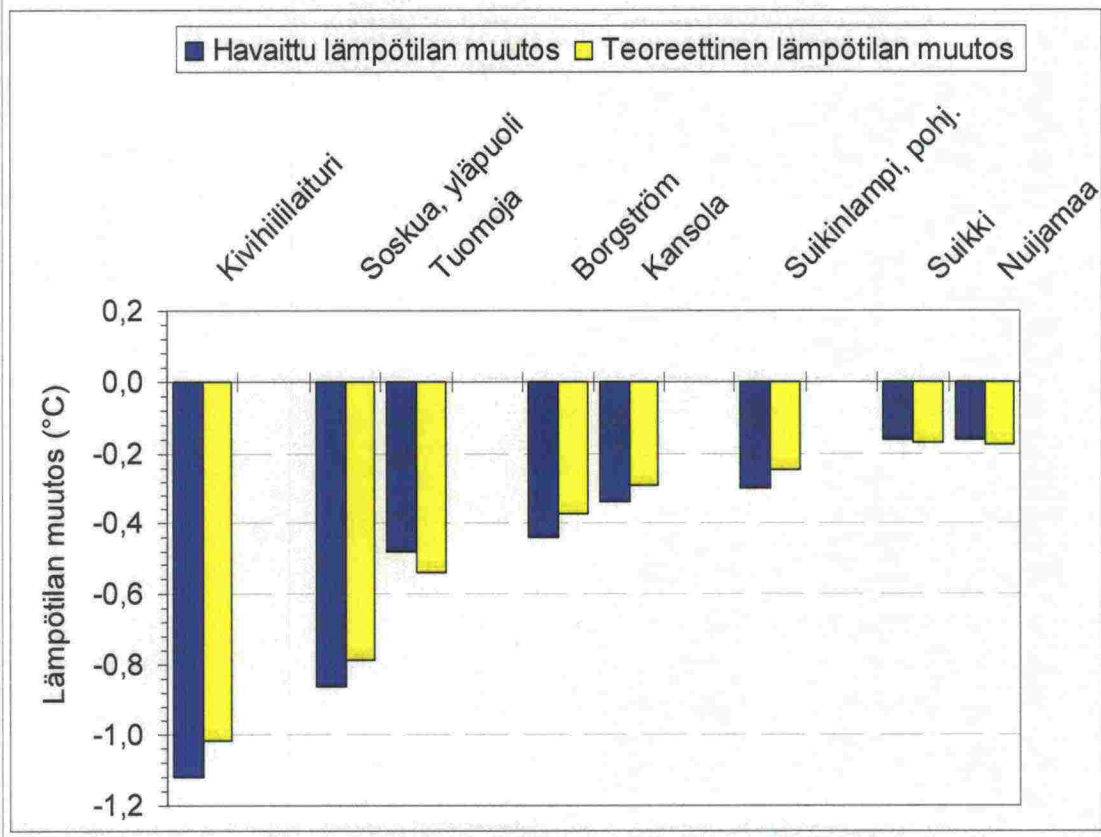
Kummeli  $k_2 = 0,5$

Rahtialus tai jäänmurtaja  $k_2 = 1,0$

Saattue Arppe, Vekara, Kummeli  $k_2 = 2,0$

$Q = 50 \text{ MJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m} / \text{kulkukerta}$

$T_w = \text{veden lämpötila } (^\circ\text{C})$



Kuva 15 Veden kaskilämpötilan havaittu ja mallin avulla laskettu muutos eri kohdissa kanavaa 9.-13.2.1004.

- Saattue Arppe, Vekara, Kummeli kulki 16. päivä kaksi kertaa.
- Juoksutus vähäistä, vesi seisoo.
- Geoterminen lämmönjohtuminen oletettu nolllaksi.
- Alusliikenteen aiheuttama sulatuslämpömäärä on laskettu kaavalla

$$E_2 = k_2 \cdot T_w \cdot Q$$

$k_2$  on aluskerroin

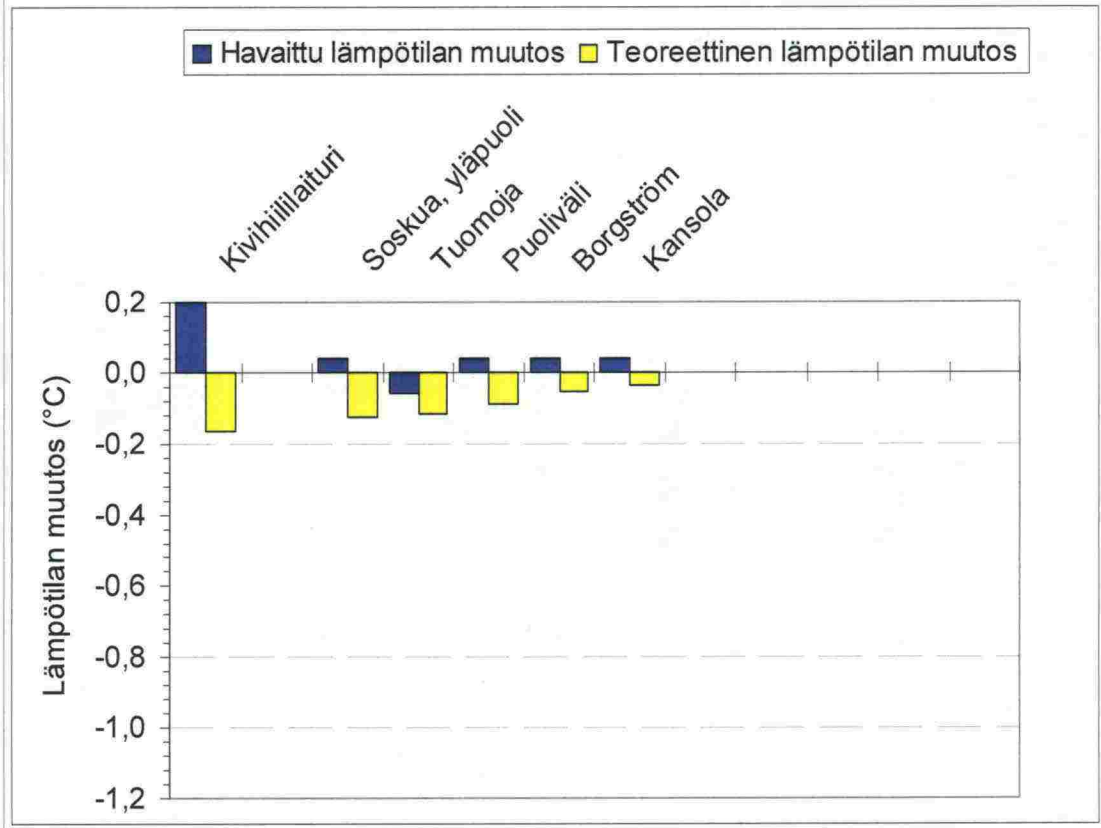
Kummeli  $k_2 = 0,5$

Rahtialus tai jäänmurtaja  $k_2 = 1,0$

Saattue Arppe, Vekara, Kummeli  $k_2 = 2,0$

$Q = 50 \text{ MJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$  / kulkukerta

$T_w =$  veden lämpötila ( $^\circ\text{C}$ )



Kuva 16 Veden keskilämpötilan havaittu ja mallin avulla laskettu muutos eri kohdissa kanavaa 13.–19.2.2004.

### 3.6 Mallin verifiointi

Edellä on tarkasteltu jään muodostusta ja jään sulamiseen liittyvää lämpöhukkaa yksittäisiin pisteisiin liittyvien mittausten ja staattisiksi oletettujen dynaamisten tilanteiden pohjalta. Seuraavassa tarkastellaan kehitetyn mallin (Kuva 17) toimivuutta dynaamisesti laajemman kokonaisuuden ja pitemmän ajanjakson puitteissa. Tarkastelujaksoksi on otettu talvi 2004, jolloin kanavassa tehtiin sydäntalvella koeajoja ja varsin kattavia mittauksia. Tarkasteluväliksi on otettu kymmenen kilometrin jakso Tuomojalta Nuijamaalle. Olosuhteet olivat tällä välillä ympärivuotisen liikennöinnin ja mallin pätevyysalueen kannalta relevantit. Simulointilaskelmataulukko on esitetty liitteessä 7. Simulointi on tehty seuraavasti:

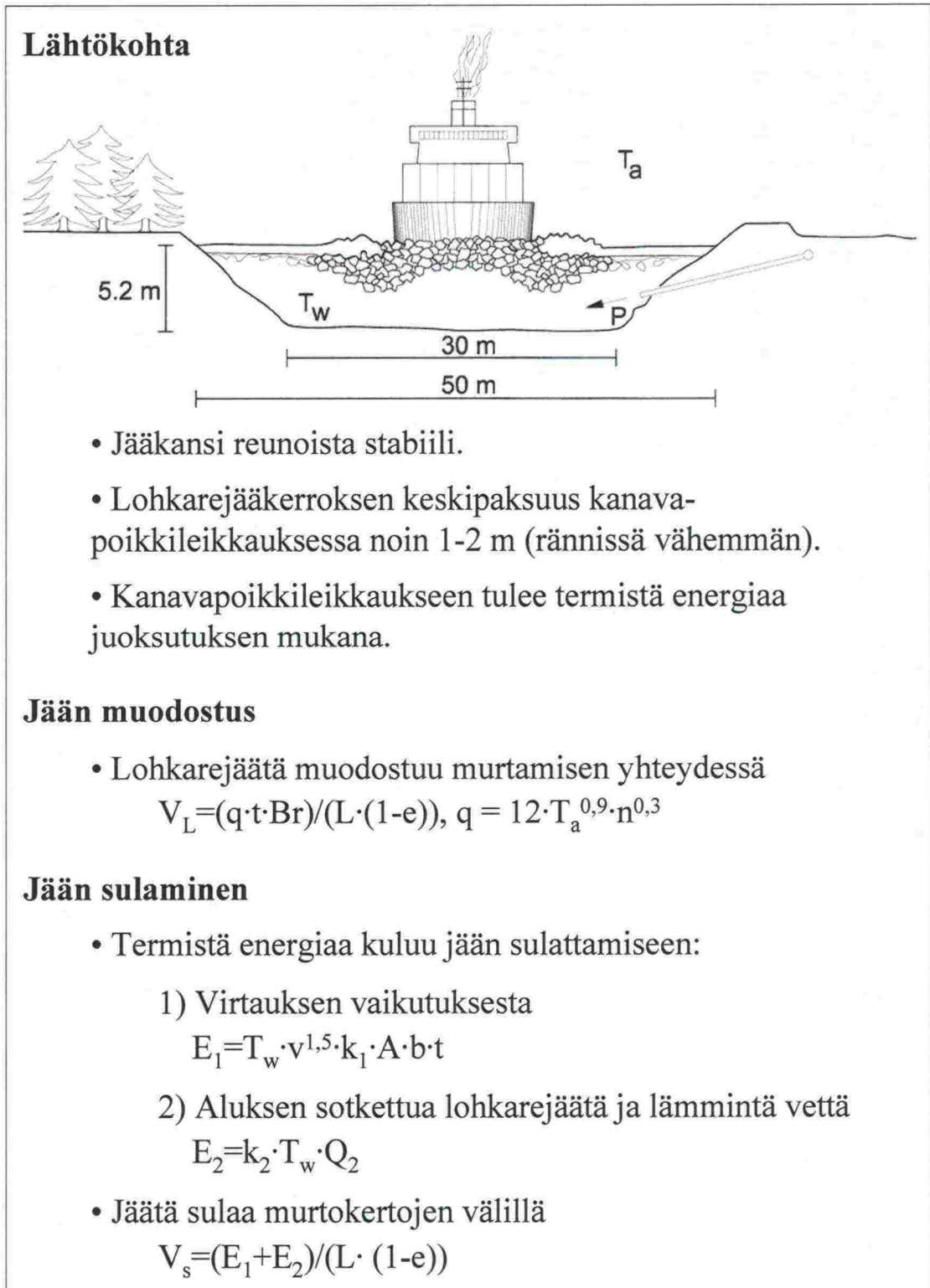
- Tarkastelujakso on jaettu simulointia varten kahteenkymmeneen 500 metrin pätkään;
- Aika-askel on 1 vuorokausi;
- Veden lämpötilamittausten, oletettujen jääolosuhteiden ja liikennöintitietojen perusteella lämpösyötön Tuomolasta alaspäin on oletettu kasvavan 15.–20.1. lineaarisesti 0 – 45 MW;
- 20.1. jälkeen lämpösyöttö (20 – 30 MW) on saatu Tuomojan veden lämpötilamittausten perusteella väliarvot interpoloiden;
- Lappeenrannan säätietojen ja kanavan liikennöintitietojen perusteella kanavan jääpeite on stabiloitunut 10.1. ja lohkarejää paksuudeksi on laskettu 15.1.2004 koko tarkastelujaksolla 1.15 m;
- Tämän jälkeen lohkarejään muodostuminen rännissä on laskettu liikennetietojen ja säätietojen perusteella;
- Lohkarejään sulaminen ja veden lämpötilakehitys on laskettu veden juoksutustietojen ja liikennöintitietojen perusteella matka- ja aika-askelittain.

Mallin avulla simuloituja veden lämpötiloja on verrattu mitattuihin lämpötiloihin kuvissa 17 ja 18. Juoksutusten ajan kattavasta kuvasta 17 nähdään, että aluksi (20.1.) simuloitujen lämpötilat vastaavat varsin hyvin mitattuja. Liikennöinnin oltua jonkin aikaa katkaistuna (26.1., Kummelilla yksi edestakainen ajokerta 23.1.) lämpöenergia näyttää liukuvan simulointia paremmin alaspäin, mikä voidaan selittää veden kerrostumisella. Normaalin liikennöintijakson päätteeksi (30.1.) simuloitujen ja mitattujen veden lämpötilat vastaavat taas paremmin toisiaan. Liikennekatkon jälkeen (2.2.) lämpö näyttää liukuvan taas simuloitua paremmin alaspäin.

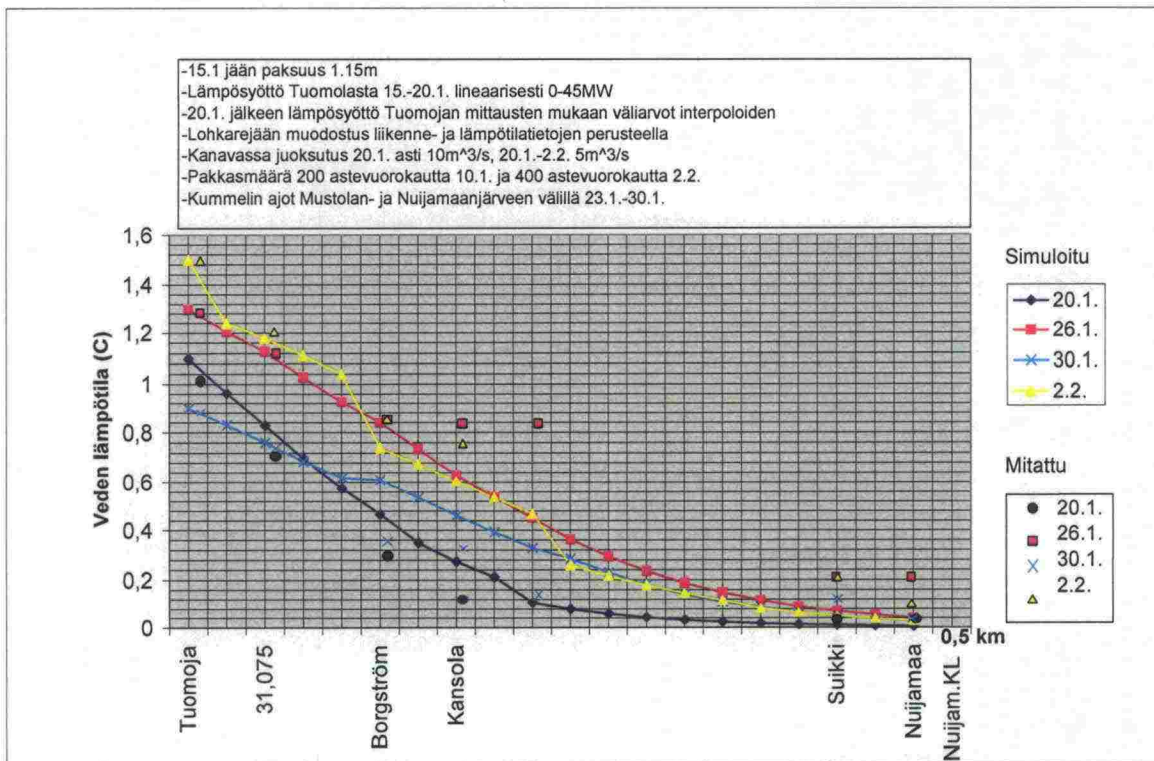
Juoksutusten pysäyttämisen jälkeisen ajan kattavasta kuvasta 18 nähdään veden lämpötilojen putoavan liikennöinnin seurauksena suurin piirtein ennakoitulla tavalla. Geotermisen energian marginaalinen vaikutus näkyy vertaamalla 13.2. ja 19.2. mitattuja ja simuloituja arvoja.

Kuvassa 19 on verrattu simuloituja ja mitattuja lohkarejäänpaksuuksia tarkastelujaksolla. Aluksi (21.1.) mittauksissa havaitut sulamisvaikutukset näyttävät rajoittuvan simuloitua voimakkaammin välille Tuomoja-Borgström. Jatkossa simulointitulokset vastaavat paremmin mittaustuloksia.

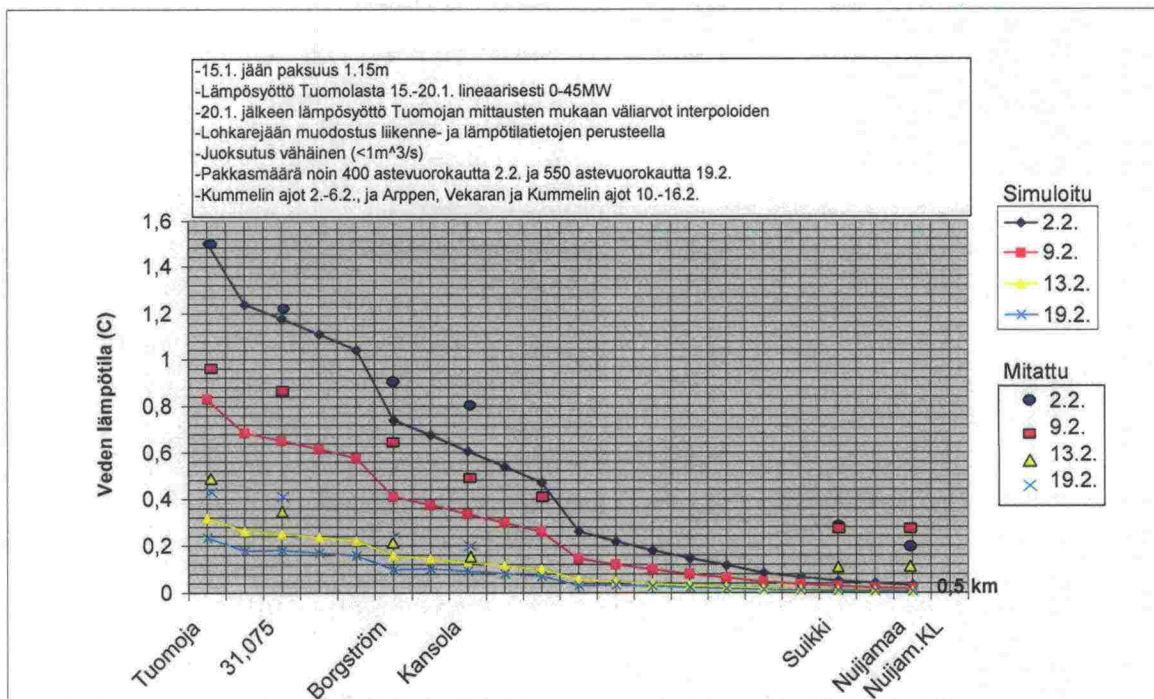
Simulointilaskelmien lähtökohdat perustuvat jossain määrin karkeisiin oletuksiin. Kenttämittausten tarkkuudessa ja edustavuudessa on toivomisen varaa. Kehitetyn mallin avulla simuloitujen veden lämpötilan ja lohkarejään paksuuden arvot vastaavat kuitenkin pääpiirteissään sydäntalven liikennöintikokeissa mitattuja. Tarkastelualue oli laaja, kokeet olivat monipuolisia ja tarkastelujakso oli keskipitkä. Tällä perusteella mallia voi pitää kohtuullisella tarkkuudella verifioituna.



Kuva 17 Jäänkehittymismallin periaatekuva.

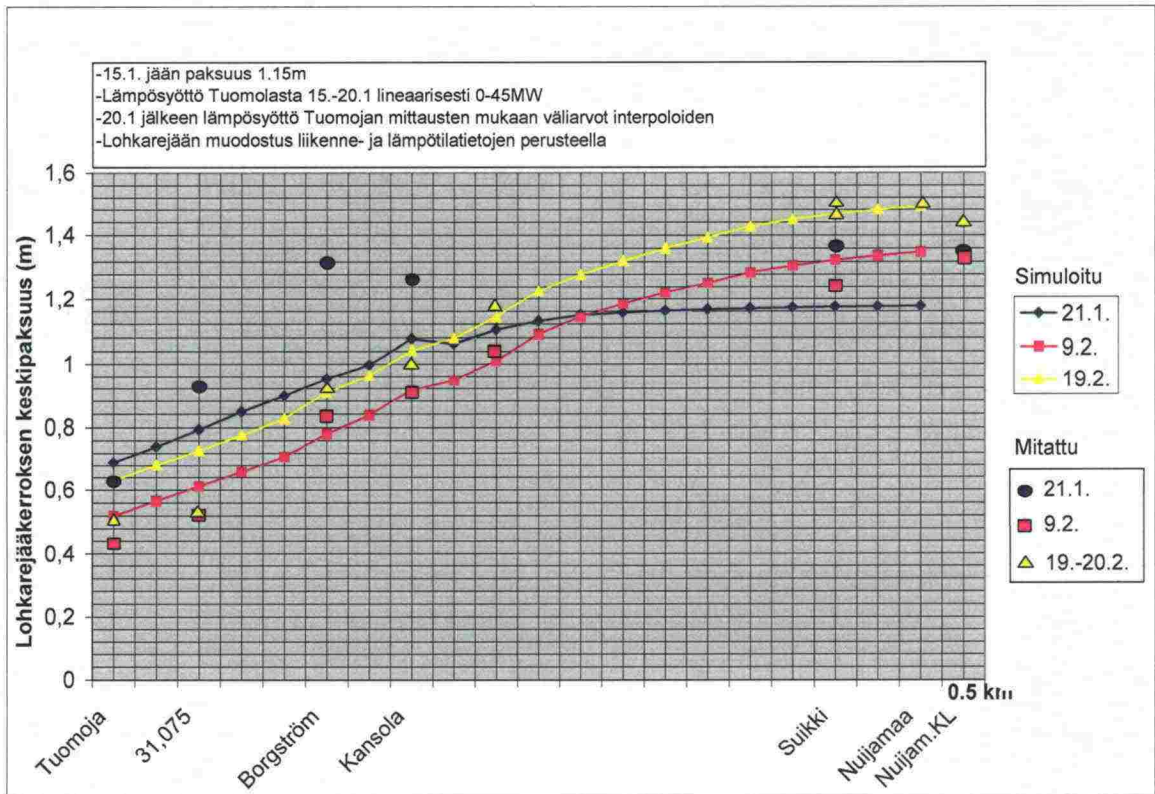


Kuva 18 Mitattujen ja simuloitujen veden lämpötilojen vertailu kanavassa välillä Tuomoja–Nuijamaa 20.1.–2.2.2004.



Kuva 19 Mitattujen ja simuloitujen veden lämpötilojen vertailu kanavassa välillä Tuomoja–Nuijamaa 2.2.–19.2.2004





Kuva 20 Mitattujen ja simuloitujen lohkarjään keskipaksuuksien vertailu kanavalla välillä Tuomoja–Nuijamäe 21.1.–20.2.2004.

## 4 Simulaatiolaskelmat

### 4.1 Lähtökohdat

Saimaan kanava voidaan jakaa tämän tarkastelun kannalta seuraaviin osiin:

- Kanavajaksot 31 km
- 4 järvijaksoa 12 km
- Tuloväylä Brusnitchnoen sululta Lavolan kapeikkoon 4 km

Pääongelmana on kanavajaksojen jäätilanteen hallinta. Kanavapoikkileikkauksena on simulaatioissa käytetty 5,2 metriä syvää pinnasta 50 metriä pohjasta 30 metriä leveää uomaa (vesipinta-ala 208 m<sup>2</sup>, vertaa liite 2). Edellä todetun mukaisesti sulut (8 kpl) ovat kanavan kokonaislämpötalouden kannalta detaljeja. Niiden problematiikkaa on käsitelty lähteessä [1].

Kanavan jääkontrollisysteemin suunnitelma perustuu Kaukaan tehtailta saatavan lämpimän veden jakamiseen putken avulla kanavaan 120 MW:n teholla. Tämän lisäksi lämmintä vettä on tarkoitus juoksuttaa kanavan suulta alaspäin noin 20 MW:n teholla (5 m<sup>3</sup>/s, 1 °C), jolloin 4 km:n kanavajakso Mustolan sulun alapuolelle kyettäisiin pitämään liikennöitävänä. Veden lämpötila kanavan suulla on nykyisin ollut luokkaa 2 astetta (jopa yli) ja tarkoitus on ottaa hyötykäyttöön alle puolet Kaukaan tehtailta nykyisin veteen päästettävästä lämpöenergiasta.

Mitoituksen perustana on ajatus, jonka mukaan järvijaksoille hukkuu energiaa yhteensä noin 20 MW:n teholla. Tätä energiaa ei saada talteen seuraavilla kanavajaksolla, vaan se jää osaltaan helpottamaan jäätilannetta järvijaksolla. 20 MW syötetään Brusnitchnoen sulun alapuolelle helpottamaan tuloväylän jäätilannetta Lavolan kapeikkoon asti. 27 km pitkälle kanavajaksolle jää siis jään sulatukseen käyttäväksi 80 MW:n lämpöteho kapasiteetti. Keskimääräinen teho on 3 kW/m. Lämpö ei kuitenkaan jakaannu tasaisesti, koska purkupisteiden väli on noin kilometri. Kanavajaksolla jään sulatuskapasiteetin on kaavailtu vaihteleva välillä 3,5–2,5 kW/m.

1961–1990 säähavaintojen perusteella tilastollisesti kerran kahdessa vuodessa toistuva pakkasmäärä on Saimaan kanavan alueella noin 850 astevuorokautta, kerran viidessä vuodessa toistuva pakkasmäärä noin 1150 astevuorokautta, kerran kymmenessä vuodessa toistuva pakkasmäärä noin 1300 astevuorokautta ja kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä noin 1750 astevuorokautta [14]. Ankarina ja erittäin ankarina talvina pakkasmäärä on siis jopa kolminkertainen siihen verrattuna mitä Saimaan kanavalla on liikennekauden aikana koettu.

YK:n ilmastopaneeli (IPCC) on ennustanut kasvihuonekaasupäästöjen jo nostaneen maapallon keskilämpötilaa. Se ennustaa kehityksen voimistuvan. Suomen leveysasteilla keskilämpötilojen nousun ennustetaan olevan kaksinkertaisen maapallon keskimääräiseen kehitykseen verrattuna.

Jos YK:n ilmastopaneeli on oikeassa, edellä esitetyt tilastolliset pakkasmäärät ovat pudonneet jo ensi vuosikymmenellä karkean arvion perusteella (talven kesto 100 vuorokautta, talven keskilämpötila noussut 1900-luvun jälkipuoliskon tasosta noin 2 astetta) noin 200 astevuorokautta.

Talviliikennettä on tarkoitus hoitaa 1A-jääluokan aluskalustolla ja tarvittaessa jäänmurtajan avustuksella. Liikennetiheys on tarkasteluissa 1–4 rahtilaivaa vuorokaudessa. Käytännön liikennöinnin kannalta lohkarjään paksuus rännissä (noin 3/4 lohkarjään keskipaksuudesta kanavapoikkileikkauksessa) on normaalitalvina rajoitettu 1,0 metriin, vaikeissa olosuhteissa ankarina ja erittäin ankarina talvina 1,3 metriin (katso [6]). Äärimmäisissä olosuhteissa (merenkulun mielekkyys käy tällöin muutenkin kyseenalaiseksi) sallitaan viikon katko liikennöinnissä.

## 4.2 Erityyppisten talvien simulointi

Seuraavassa on simuloitu kanavan jäätilanteen kehitystä erityyppisinä talvina. Suunnitelman mukainen lämpösyöttö on aloitettu pakkasmäärän saavutettua 200 astevuorokautta, jolloin kanavan jääkannen on oletettu stabiloituneen reunaosiltaan. Lämpösyöttö on lopetettu talven selän taituttua.

Esimerkkitalvet on valittu kanavan dokumentoidusta lähihistoriasta ja simulaatioissa käytetyt lämpötilatiedot ovat Ilmatieteen laitoksen toimittamia Lappeenrannan havaintoaseman tietoja. Laskelmien lämpösyötöksi on valittu 2,5 kW/m, mikä vastaa oletettua heikointa tilannetta purkupisteiden välillä. Jäänmurtajaliikenteen vaikutus on otettu huomioon kertomalla rahtilaivaliikenne liikennekertoimella 1,75.

Leudoksi esimerkkitalveksi on valittu sydäntalven liikennöinti ja juoksutuskokeiden [6] talvi 2003–2004 (pakkasmäärä Lappeenrannassa 684 astevuorokautta). Simulaatioiden tulokset on esitetty Kuva 21:ssä. Nähdään, että lohkarjään paksuus pysyy hyvin kurissa suunnitellulla lämpösyötöllä. Liikenteen ollessa harvaa juoksutettavan veden lämpötila lähtee nousuun. Lämpösyöttöä tarvitaan tässä tapauksessa vain runsaan kuukauden ajan. Jään paksuuden näennäinen kasvu kevättalvella tuskin toteutuu, koska tumma rännin pinta absorboi tehokkaasti auringon säteilyä jo maaliskuussa.

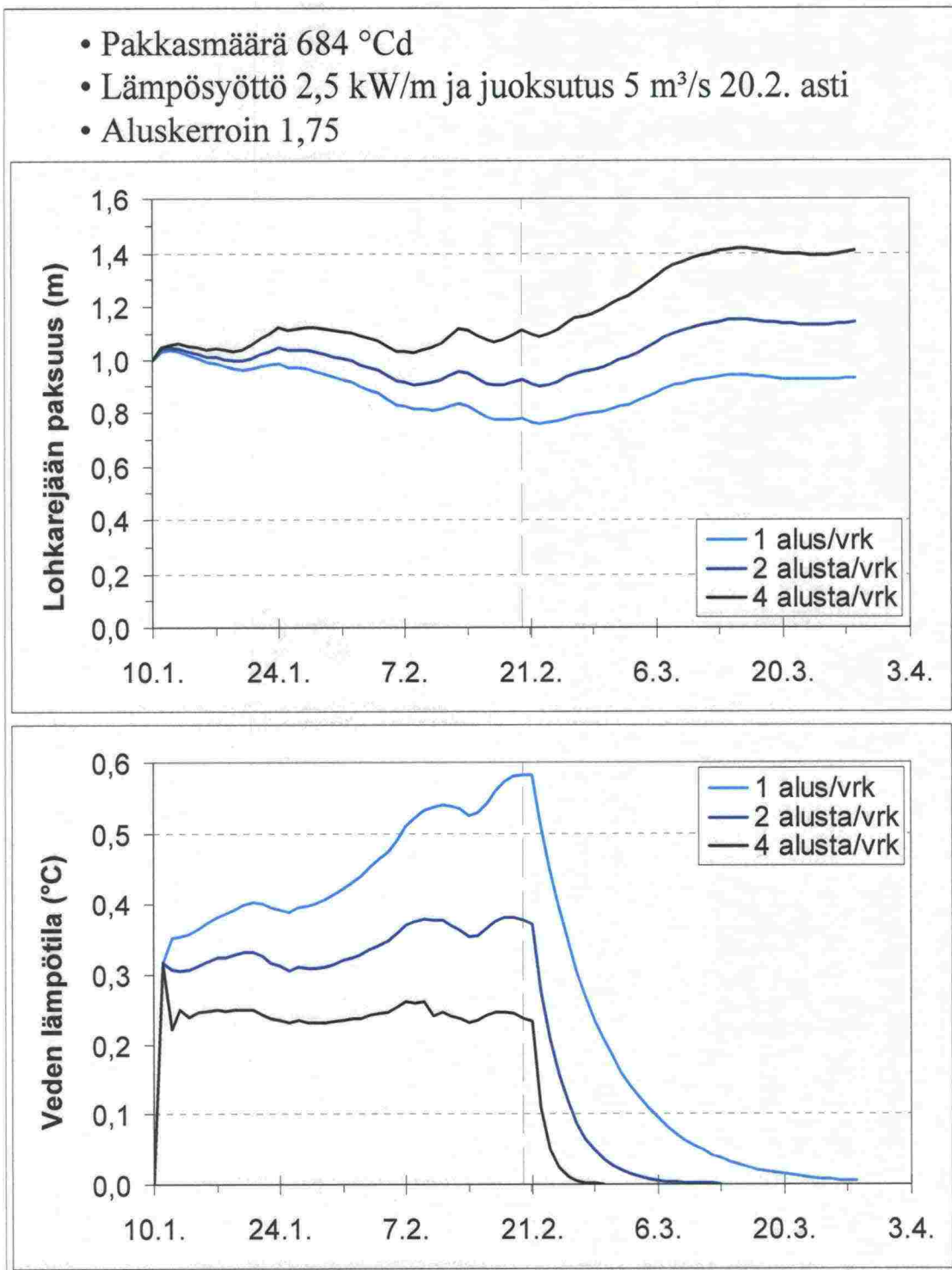
Normaaliksi talveksi on valittu hiukan normaalia kylmempi talvi 1981–1982 (pakkasmäärä 945 astevuorokautta), jolloin tutkittiin ensimmäistä kertaa perusteellisemmin talviliikennöintiä ja jääolosuhteita Saimaan kanavalla [7]. Simulaatioiden tuloksista (Kuva 22) nähdään, että lämpösyöttöä tarvitaan nyt yli kaksi kuukautta, mutta jäätilanne pysyy edelleen hyvin kurissa kaikilla liikennemäärillä.

Ankaraksi esimerkkitalveksi on valittu talvi 2002–2003 (pakkasmäärä 1216 astevuorokautta), joka toistuu käytettävissä olevien tilastojen mukaan noin 7 vuoden välein. Kyseisenä talvena liikenne ruuhkautui pahoin muun muassa Pietarin edustalla ja useissa satamissa oli vakavia jääongelmia. Kuva 23:n mukaisesti lämpösyöttöä tarvitaan tällaisena talvena noin kolme kuukautta.

Lohkarjääkerroksen paksuus pysyy mallin mukaan edelleen kurissa liikennöinnin ollessa luokkaa kaksi alusta vuorokaudessa tai harvempaa. Tässäkään tapauksessa kevättalven pakkasjaksot eivät lohkarjääkerroksen paksuutta enää kasvata. Tapauksen laskelmataulukko on esitetty esimerkin vuoksi liitteessä 8.

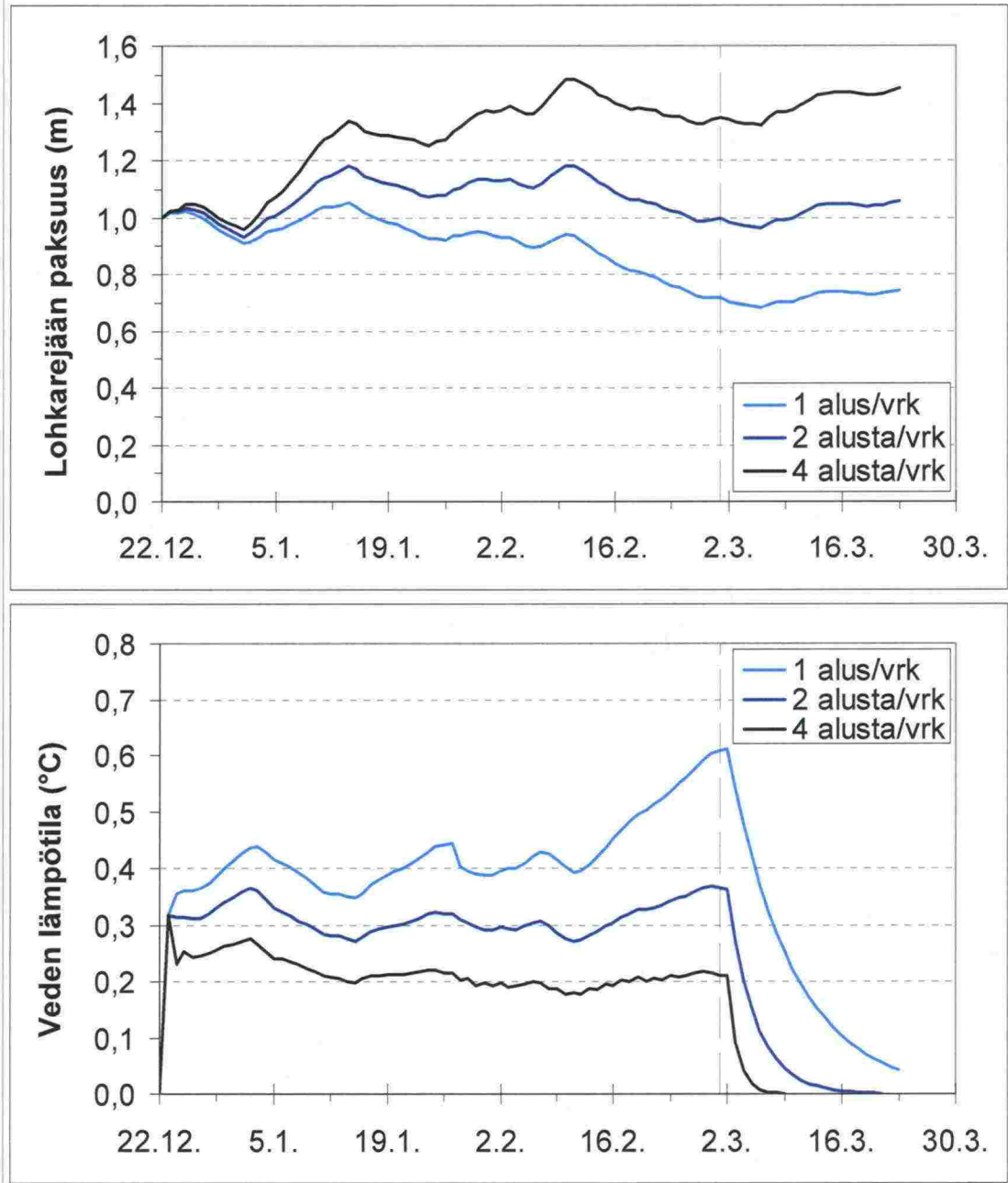
Erittäin ankaraksi talveksi on valittu vaikein Saimaan kanavalla koettu jäätalvi [9] 1986–1987 (pakkasmäärä 1399 astevuorokautta). Etenkin alkutalvi oli poikkeuksellisen raju. Tällainen talvi toistuu käytettävissä olevien tilastojen mukaan noin 15 vuoden välein.

Simulaatiotuloksista (Kuva 24) nähdään, että lämpösyöttöä tarvitaan runsaat 3 kuukautta. Tästä huolimatta jäätilanne ei pysy sallituissa rajoissa liikenteen ollessa vilkasta.



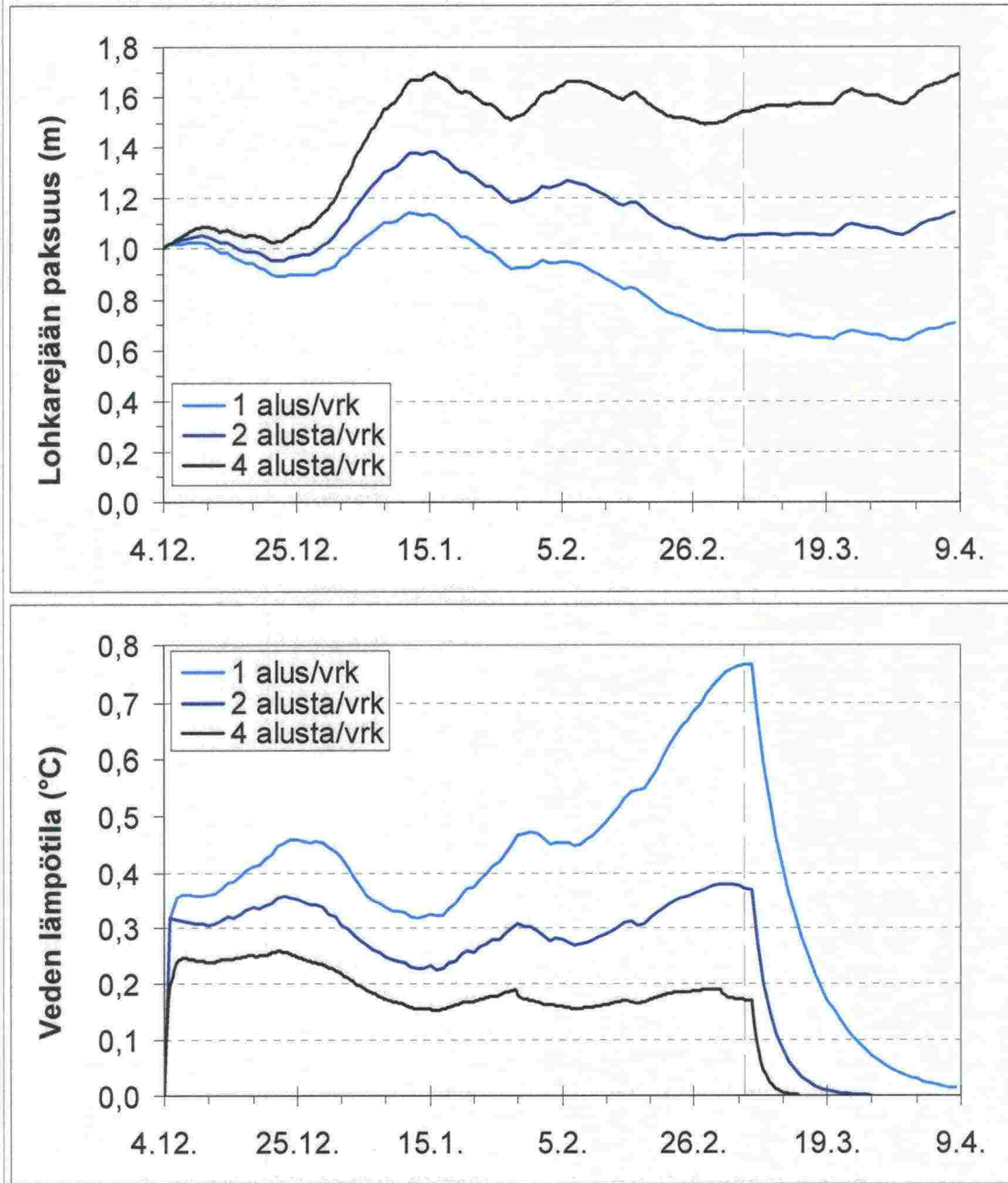
Kuva 21 Lohkarejään keskipaksuuden ja veden lämpötilan simuloitu kehitys kanavassa leutona talvena 2003–2004.

- Pakkasmäärä 945 °Cd
- Lämpösyöttö 2,5 kW/m ja juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s 1.3. asti
- Aluskerroin 1,75



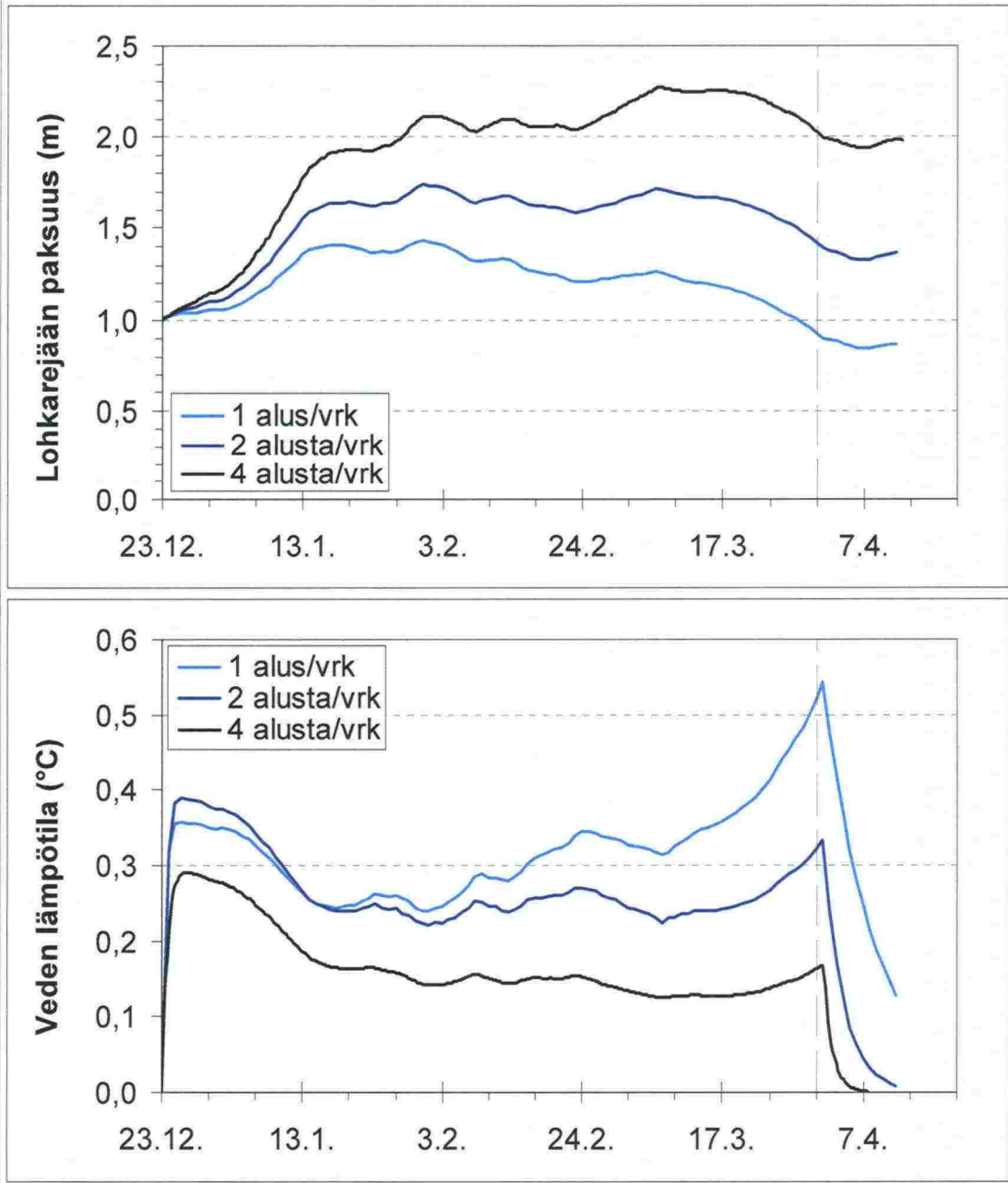
Kuva 22 Lohkarejään keskipaksuuden ja veden lämpötilan simuloitu kehitys kanavassa normaalina talvena 1981–1982.

- Pakkasmäärä 1216 °Cd
- Lämpösyöttö 2,5 kW/m ja juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s 6.3. asti
- Aluskerroin 1,75



Kuva 23 Lohkarejään keskipaksuuden ja veden lämpötilan simuloitu kehitys kanavassa ankarana talvena 2002–2003.

- Pakkasmäärä 1399 °Cd
- Lämpösyöttö 2,5 kW/m ja juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s (1 alus/vrk) tai 4 m<sup>3</sup>/s (2 ja 4 alusta/vrk) ja 31.3. asti
- Aluskerroin 1,75



Kuva 24 Lohkarejään keskipaksuuden ja veden lämpötilan kehitys kanavassa erittäin ankarana talvena 1986–1987.

### 4.3 Eri tekijöiden vaikutuksia jäätilanteen hallintaan

Kuva 25:ssä on simuloitu lämpösyötön tehon vaikutusta kanavapoikkileikkauksen lohkarajakerroksen paksuuteen ja veden lämpötilaan ankarana pakkastalvena 2002–2003 ja liikennemäärällä 2 alusta vuorokaudessa. Nähdään, että 4 kW/m on selvästi liikaa ja 1 kW/m liian vähän. Lohkarajään paksuuskasvu olemattomalla teholla on yli 2 metrin paksuuksilla mallin pätevyysrajojen ulkopuolella. Jäänmuodostus on tällä alueella ainakin teoriassa laskettua jonkin verran pienempää.

Juoksutusvolyymien vaikutusta lohkarajään keskipaksuuteen on simuloitu Kuva 26:ssä. Kuvasta nähdään, että kehitetyn mallin pohjalta juoksutusvolyymillä ei ole vaikutusta lohkarajään määrään. Sen sijaan juoksutusvolyymillä on varsin merkittävä vaikutus kanavaveden lämpötilaan.

Lämpöenergia voi vaikuttaa laivan kulkuvastukseen monella tavalla. Kapteenit sanovat usein lumimyrskyn jäljiltä ränniä muutaman päivän ajan tiukaksi. Operointia satama-altaan lohkarajääkentässä kuvataan kovilla pakkasilla nahkeaksi. Kulkuvastuksen on väitetty kasvavan lohkarajääkentässä nopeuden hidastuessa ryömiväksi. Toisaalta lohkarajäätä sanotaan pehmeäksi lämpöpäästöjen ulottuvilla olevissa satama-altaissa.

Mellorin [15] teoriasta näkyy koheesion suuri merkitys aluksen kulkuvastukseen lohkarajäkerroksessa. Lumisohjo ja alijäätyneet lohkarajat lisäävät koheesiota. Jos vesimassa on lämmintä, se syö sohjoa ja eliminoi alijäähtymisen vaikutuksia liikennöinnin yhteydessä. Siksi veden lämpötilan pitäminen juoksutusta säätelemällä korkeana voi vaikuttaa merkittävästi alusten kulkuvastukseen.

Liikennekatkon vaikutusta lohkarajäkerroksen paksuuteen ja veden lämpötilaan kanavassa on simuloitu mallin avulla erittäin ankarana talvena 1986–1987 Kuva 27:ssä. Nähdään, että viikon liikennekatko pahimpana pakkaskautena helpottaa liikennöinnin kannalta ratkaisevasti jäätilannetta.

Vertailun vuoksi kuvassa 28 on simuloitu tilanteen kehitys ilman lämpösyöttöä ja tilanne, jossa liikenne katkeaa ankaraan pakkasjaksoon, jonka lopuksi mottiin jääneet laivat uitetaan kanavasta pois. Tämä jälkimmäinen tilanne toteutui pääpiirteissään talvella 1986–1987.

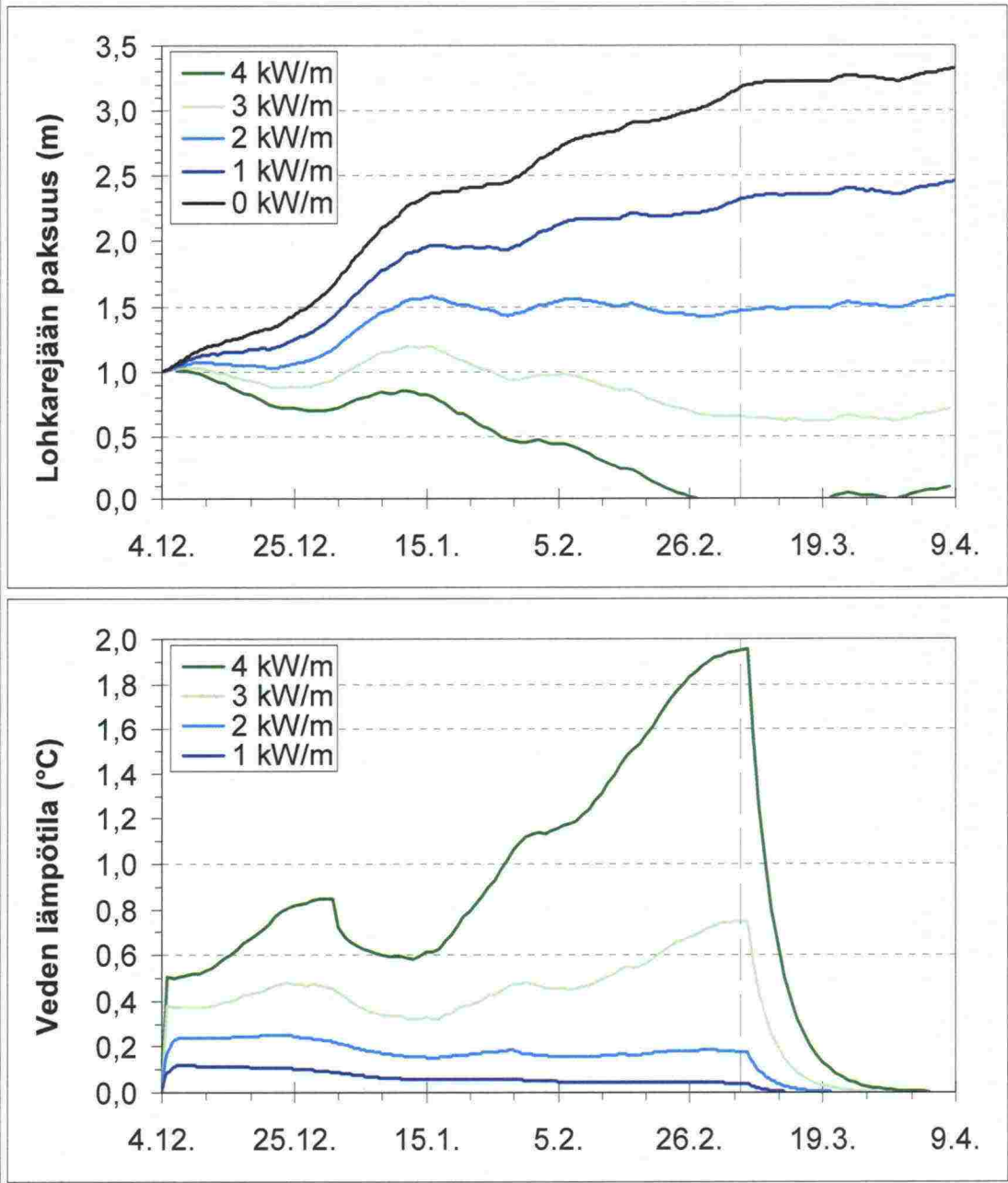
Kuva 29:ssä on simuloitu lohkarajäkerroksen paksuuden ja juoksutusvolyymien vaikutusta veden lämpötilan hiipumiseen (ja siis sulatustehoon) purkupisteen alapuolella matkan funktiona. Nähdään, että jään sulatustehon hiipuminen matkan funktiona ei riipu juuri juoksutusnopeudesta. Sen sijaan lohkarajäkerroksen paksuudella näyttäisi olevan suuri vaikutus veden lämpötilasta suoraan riippuvan sulatustehon hiipumiseen.

Mallin mukaan lohkarajäkerroksen paksuuden ollessa kanavapoikkileikkauksessa keskimäärin 0,8 metriä kilometrin etäisyydellä purkupisteestä sulatustehosta on jäljellä 77 % ja kolmen kilometrin päässä vielä 45 %. Paksuuden ollessa 1,0 metriä sulatustehosta on kilometrin päässä jäljellä 69 % ja kolmen kilometrin päässä 32 %. Paksuuden ollessa 1,5 m sulatustehosta on kilometrin päässä jäljellä vain 55 % ja kolmen kilometrin päässä 15 %.

Lohkarajäkerroksen paksuuden ylittäessä metrin sulatusteho alkaisi siis mallin mukaan heilahdella sallittua enemmän. Mallidynamiikan mukaan kyseessä olisi jopa itseään vahvistava prosessi. Tämä viittaisi tarpeeseen tihentää purkuväliä. Toisaalta edellä oletettiin, että lohkarajäkerros on tasapaksu pituussuunnassa. Todellisuudessa se on purkupisteen alla keskimääräistä ohuempi ja kuluneempi, mikä helpottaa lämmön liukumista alaspäin.

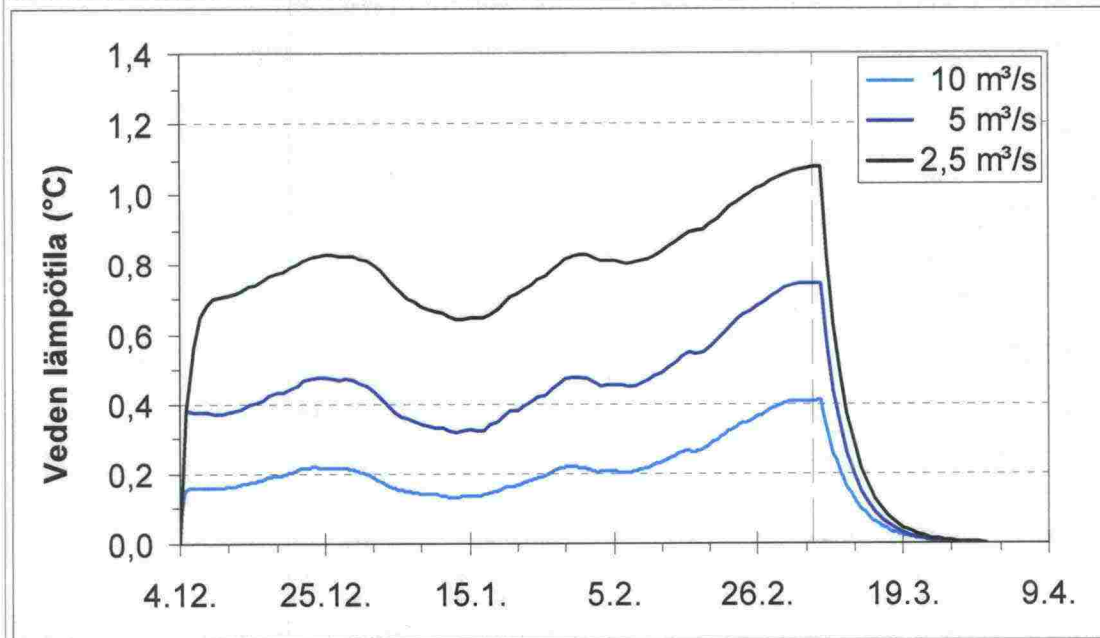
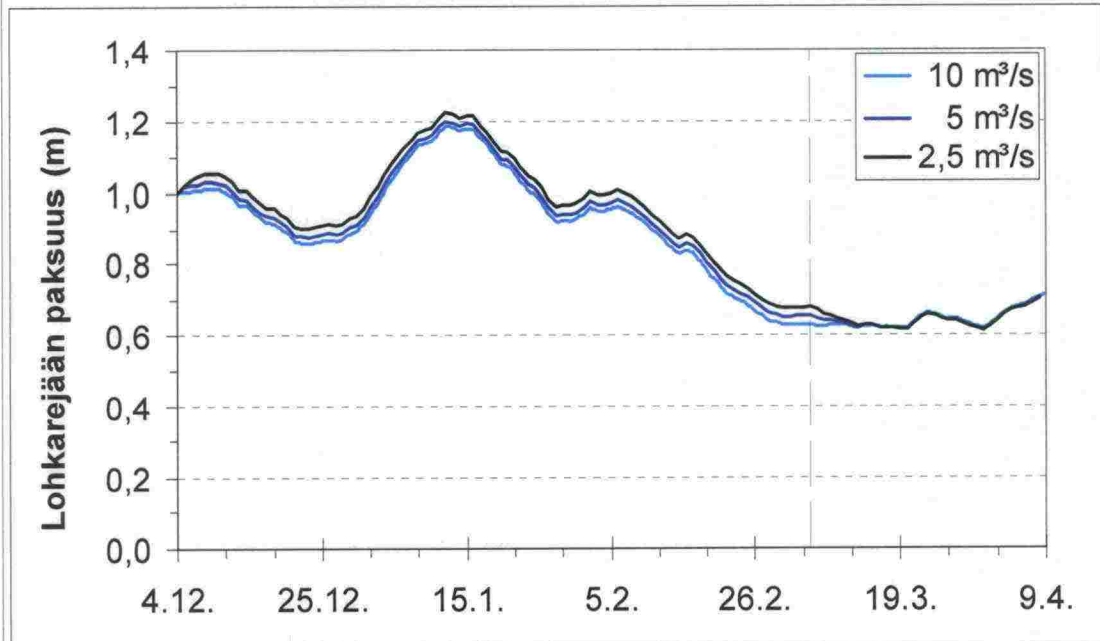


- Ankara talvi 2002-2003
- Liikenne 2 alusta/vrk, aluskerroin 1,75
- Juoksutus 5 m<sup>3</sup>/s
- Lämpösyöttö ja juoksutus 6.3. asti



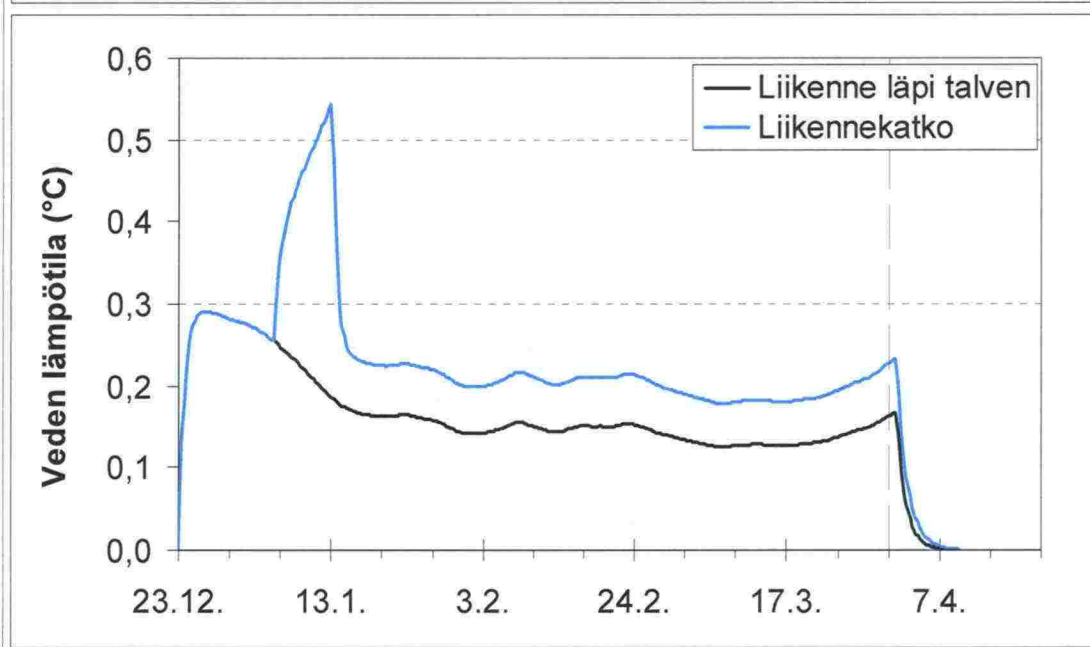
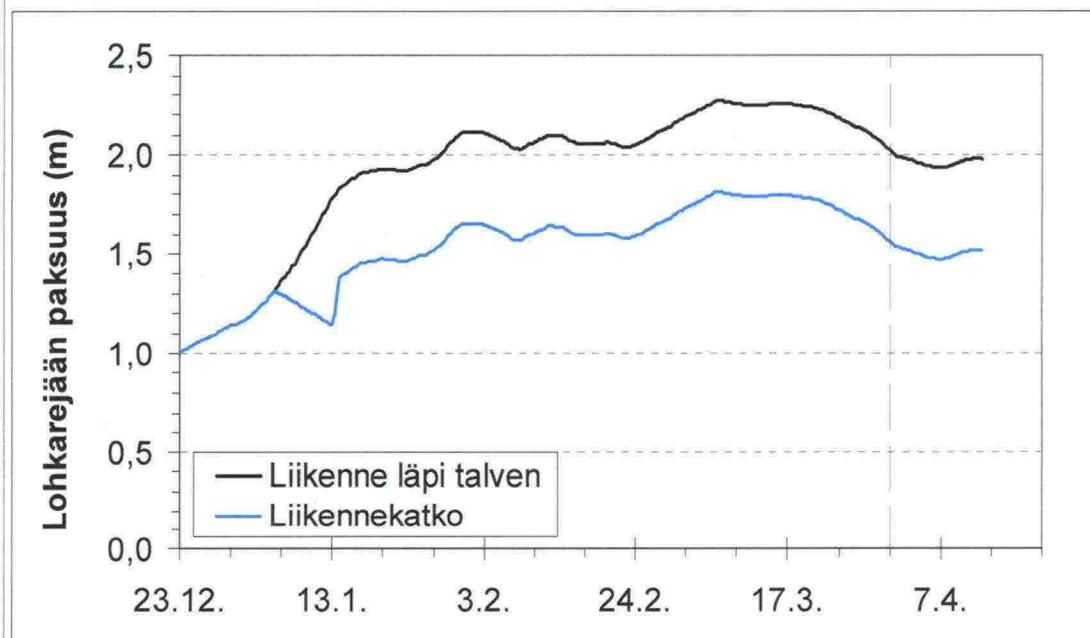
Kuva 25 Lämpösyötön vaikutus lohkarejääkerroksen paksuuteen ja veden lämpötilaan kanavassa.

- Ankara talvi 2002-2003
- Liikenne 2 alusta/vrk, aluskerroin 1,75
- Lämpösyöttö 3 kW/m
- Lämpösyöttö ja juoksutus 6.3. asti



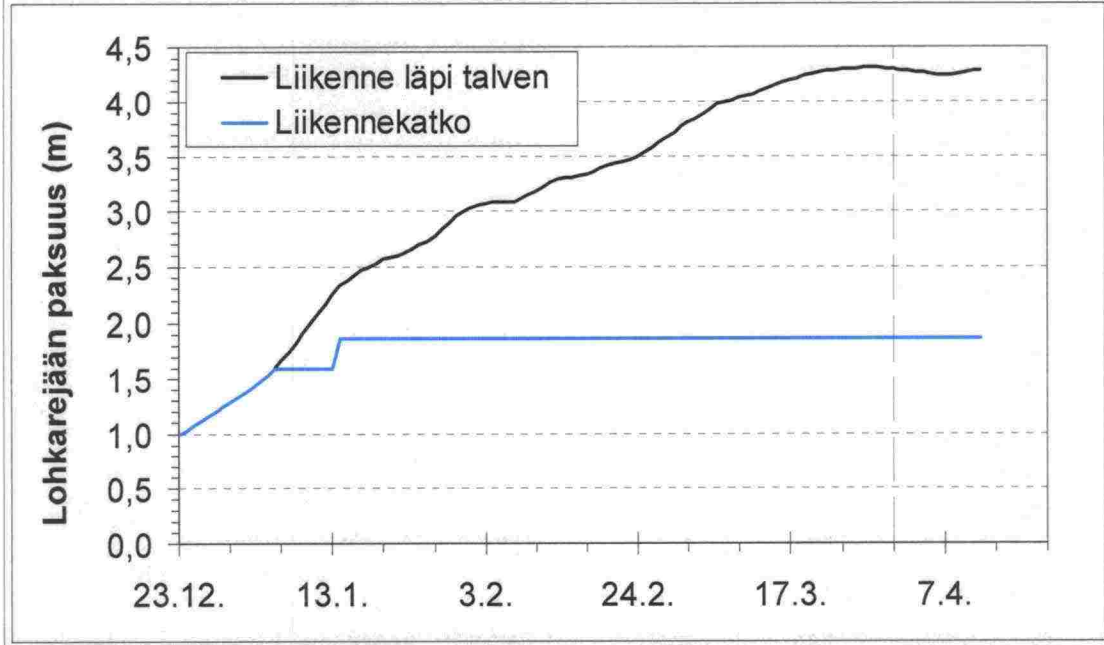
Kuva 26 Juoksutuksen vaikutus lohkarejääkerroksen paksuuteen ja veden lämpötilaan kanavassa.

- Erittäin ankara talvi 1986-1987
- Lämpösyöttö 2,5 kW/m ja juoksutus 4 m<sup>3</sup>/s 31.3. asti
- Liikenne 4 alusta/vrk, aluskerroin 1,75
- Liikennekatko 5.-12.1.



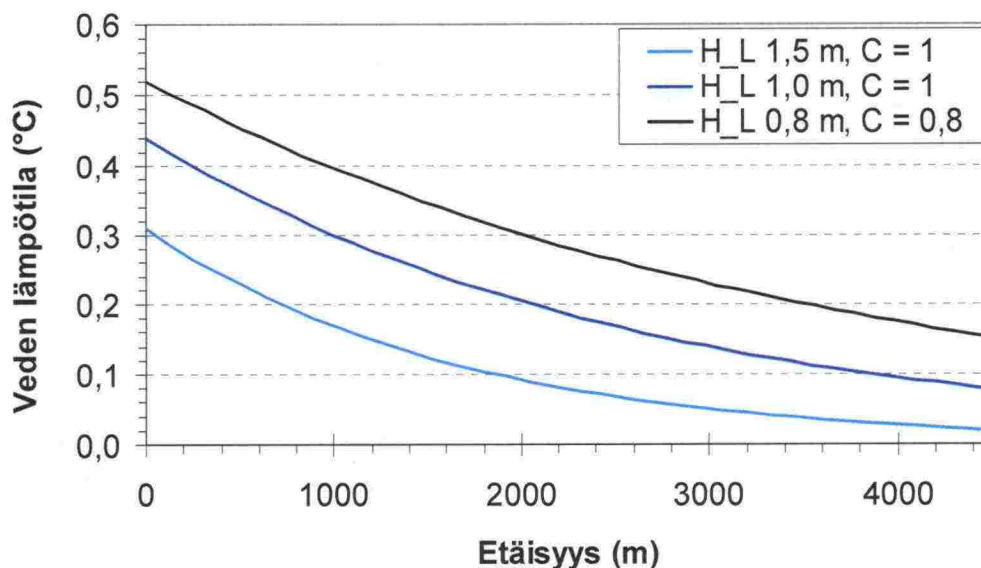
Kuva 27 Liikennekatkon vaikutus lohkarejääkerroksen paksuuden ja veden lämpötilan kehittymiseen kanavassa erittäin ankarana talvena.

- Erittäin ankara talvi 1986-1987
- Lämpösyöttö 0 kW/m
- Juoksutus 4 m<sup>3</sup>/s 31.3. asti
- Liikenne 4 alusta/vrk, aluskerroin 1,75
- Liikennekatko 5.-12.1.
- 13.1. neljä alusta, jonka jälkeen ei liikennettä

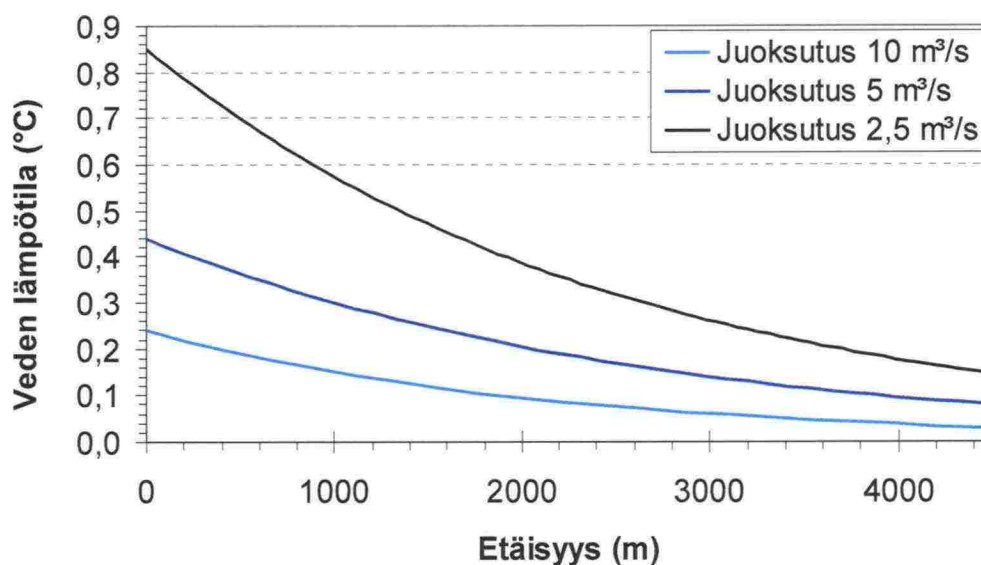


Kuva 28 Lohkarejään teoreettinen paksuuskehitys erittäin ankarana talvena ilman lämpösyöttöä verrattuna liikennekatkon ja liikenteen keskeytyksen synnyttämään tilanteeseen.

- Lohkarejään paksuuden vaikutus
- 2 alusta/vrk ( $k=1,75$ ), juoksutus  $5 \text{ m}^3/\text{s}$



- Juoksutuksen vaikutus
- 2 alusta/vrk ( $k=1,75$ ),  $H_L=1,0 \text{ m}$ ,  $C=1$



Kuva 29 Lohkarejäakerroksen paksuuden ja juoksutuksen vaikutukset veden lämpötilan hiipumiseen purkupisteen alapuolella.

#### 4.4 Transit-simuloinnit

Transit-simuloinnilla tarkoitetaan laskentaa, jossa aluksen nopeus määritetään kullekin jääolosuhteelle kun tunnetaan aluksen kulkuvastus tässä jäänpaksuudessa nopeuden funktiona, sekä aluksen potkurin antama työntö nopeuden funktiona. Transit-simuloinnit

tehtiin MP Vekaran runkomuodolle olettaen että sen koneteho on kasvatettu suomalais-ruotsalaisten jääluokkamääräysten 1A-luokan konetehoa vastaavaksi.

Aluksen kokonaiskulkuvastus laivarännissä muodostuu aluksen avovesivastuskomponentista ( $R_{OW}$ ) sekä rännivastuskomponentista ( $R_{CH}$ ). Avovesikomponentin perustana käytettiin vastaavankokoisten ja tyyppisten alusten avovesivastuskäyrää, jota modifioitiin vastaamaan kanavassa vallitsevaa matalan veden tilannetta. Rännivastus määritettiin lähteen [16] meriolosuhteisiin kehitetyllä rännivastuskaavalla, jota myös modifioitiin lähteen [17] tuloksiin perustuen vastaamaan kanavan rajallista vesisyvyyttä. Laskelmissa käytetty rännivastuskaava on muodoltaan seuraava:

$$R_{CH} = \frac{1}{2} \times \mu_B \times \rho_\Delta \times g \times H_F^2 \times K_P \times \left[ \frac{1}{2} + \frac{H_M}{2H_F} \right]^2 \times \left[ B + 2 \times H_F \times \left( \cos \delta - \frac{1}{\tan \psi} \right) \right] \times (\mu_h \times \cos \phi + \sin \psi \times \sin \alpha) \quad (1)$$

$$+ \mu_B \times \rho_\Delta \times g \times K_0 \times \mu_h \times L_{PAR} \times H_F^2 + \rho_\Delta \times g \times \left[ \frac{L \times T}{B^2} \right]^3 \times H_M \times A_{WF} \times Fn^2$$

- $R_{CH}$  on aluksen rännivastus
- $\mu_B$  on 0,8...0,9
- $\rho_\Delta$  on veden ja jään tiheys
- $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys
- $H_F, H_M, \delta, \psi$  määräytyvät Kuva 30
- $L$  on laivan vesiviivapituus
- $B$  on laivan vesiviivaleveys
- $T$  on laivan syväys
- $L_{PAR}$  on laivan yhdensuuntaisen osan pituus
- $\psi$  on vedenpinnan ja rungon tangentin välinen kulma vesiviivaa vastaan kohtisuorassa, pystysuorassa tasossa
- $\alpha$  on aluksen vesiviivakulma
- $A_{WF}$  on laivan keulaosan vesiviivapinta-ala
- $\phi$  on aluksen keulan vertikaalikulma
- $\mu_h$  on jään ja laivan rungon välinen kitkakerroin
- $Fn$  on Frouden luku  $Fn = \frac{V}{\sqrt{g \times L}}$

Työntö nopeuden funktiona saadaan lähteen [16] kaavasta:

$$T_{PULL} = K_e \times (P_s \times D_p)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

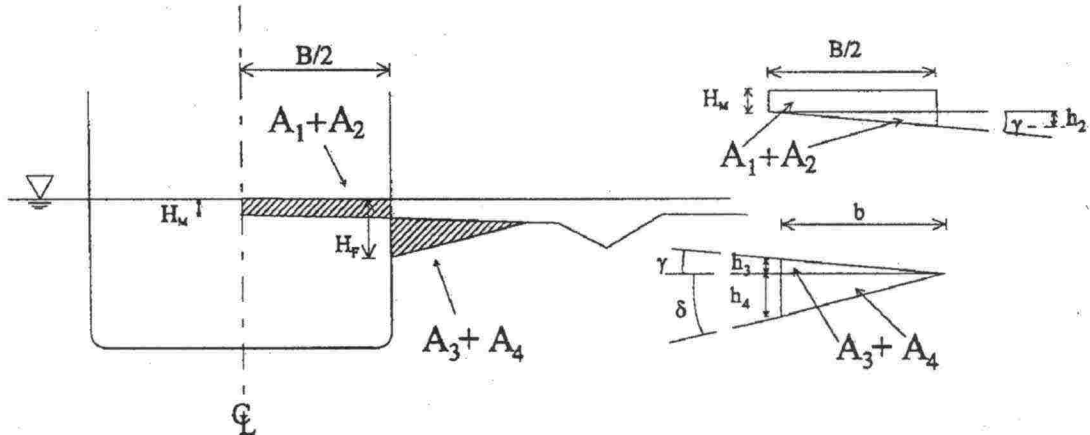
$$T_{NET} = T_{PULL} \times \left( 1 - \frac{1}{3} \times \frac{V}{V_{ow}} - \frac{2}{3} \times \left( \frac{V}{V_{ow}} \right)^2 \right) \quad (3)$$

- $T_{PULL}$  on aluksen paalutyöntö,
- $K_e$  on kerroin, jonka arvo kiinteälapselle kaksipotkurialukselle on  $0,95 \times 0,9 = 0,855$ ,
- $P_s$  on laivan akseliteho,
- $D_p$  on potkurin halkaisija, joka MP Vekaralla on 1,6 m,
- $V$  on aluksen nopeus ja

- $V_{OW}$  on aluksen maksiminopeus avovedessä, joka MP Vekaralle on 12 kn.

Transit-simulointikaava saadaan sijoittamalla kaavaan (4) yllä olevat lausekkeet ja ratkaisemalla nopeus  $V$ .

$$R_{OW} + R_{CH} = T_{NET} \quad (4)$$

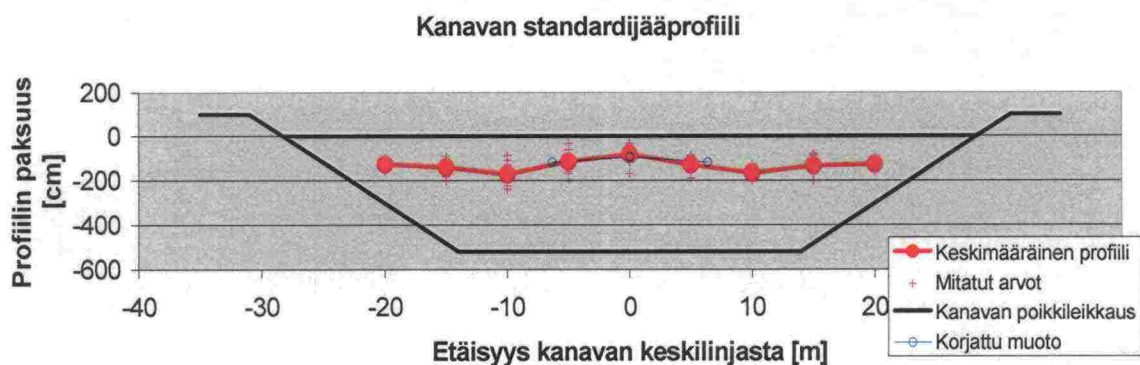


Kuva 30 Rännin geometriaan liittyvät suureet [16].

#### 4.4.1 Perusoletukset

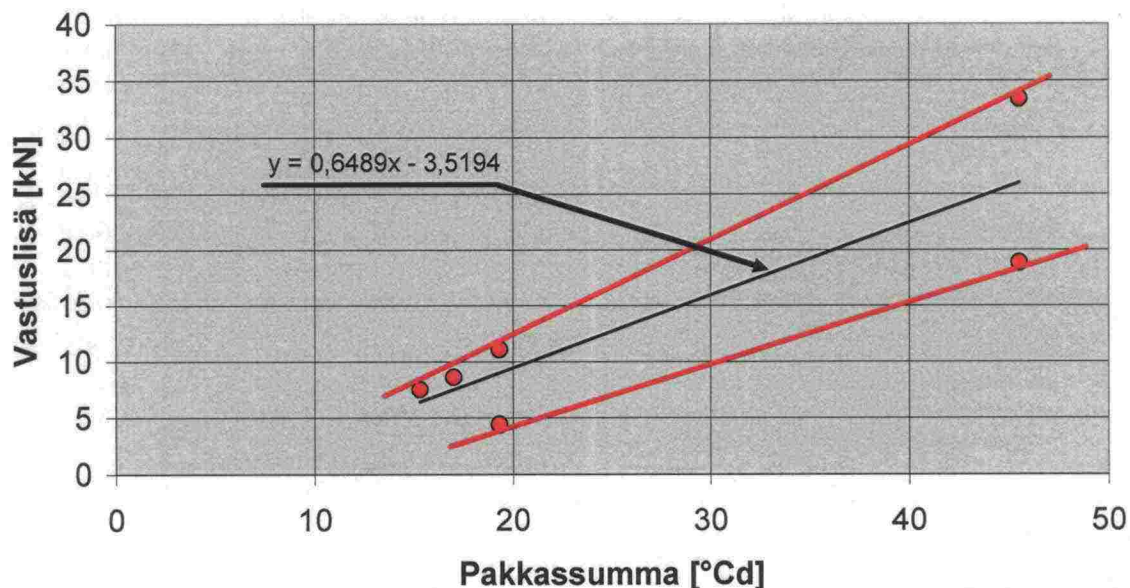
Transit-simulointilaskelmissa tehtiin seuraavat perusoletukset:

- Alusnopeudet laskettiin MP Vekaran runkomuodolle.
- Aluksen tehona käytettiin suomalais-ruotsalaisen jääluokan 1A mukaista konetehoa, joka MP Vekaralle olisi 2181 kW.
- Laskelmat suoritettiin MP Vekaran maksimi syvydelle 4,35 m.
- Laskelmissa käytettiin jäänkehityslaskelmissa määritettyä kanavapoikkileikkauksen jääkerroksen maksimikeskipaksuutta  $H_L$ , joka vastaa juuri ennen lämpimän veden purkupistettä olevaa jääkerroksen keskipaksuutta. Kanavan pituussuunnassa tasoitettuna jääkerroksen keskimääräinen paksuus olisi noin 85 % maksimikeskipaksuudesta  $H_L$ .
- Transit-simulointilaskelmien jäänpaksuustermi  $H_M$ , eli jääkerroksen paksuus kanavan keskilinjalla, on mitattuihin jääprofiileihin perustuen 73 % maksimikeskipaksuudesta  $H_L$ . Jääprofiilin keskimääräinen muoto on esitetty Kuva 31:ssä.
- Yhteen jäätyneestä pintakerroksesta aiheutuva vastuslisä on lineaarisesti riippuva läpimenojen välillä kertyneestä pakkassummasta Kuva 32:n mukaan.
- Avustustarpeen katsotaan alkavan, mikäli aluksen nopeus laskee alle 3 kn.
- Järkevän liikenteen rajajäänpaksuus saavutetaan, mikäli avustetun liikenteen nopeus putoaa alle 2 solmun.



Kuva 31 Saimaan kanavan mitattuihin jääprofileihin perustuva keskimääräisen profiilin muoto.

### Yhteenjäätäneen osan aiheuttama vastuslisä



Kuva 32 Yhteenjäätäneestä pintakerroksesta aiheutuva vastuslisä [6].

#### 4.4.2 Tulokset

Transit-simuloinnit suoritettiin jäänkehityksen simuloinneista saaduille päivittäisille jäänpaksuusarvoille neljänä esimerkkitalvena, jotka olivat:

- 2003–2004, leuto
- 1981–1982, keskimääräinen
- 2002–2003, ankara
- 1986–1987, erittäin ankara
- 1986–1987, erittäin ankara, liikennekatko 5.1.–12.1.

Kaikkina esimerkkitalvina laskelmat suoritettiin tilanteelle, jossa ilman lämpötila vastasi kunkin esimerkkitalven lämpötilaa, ja jäänhallintakeinona käytettiin 2,5 kW/m:n kanavaan

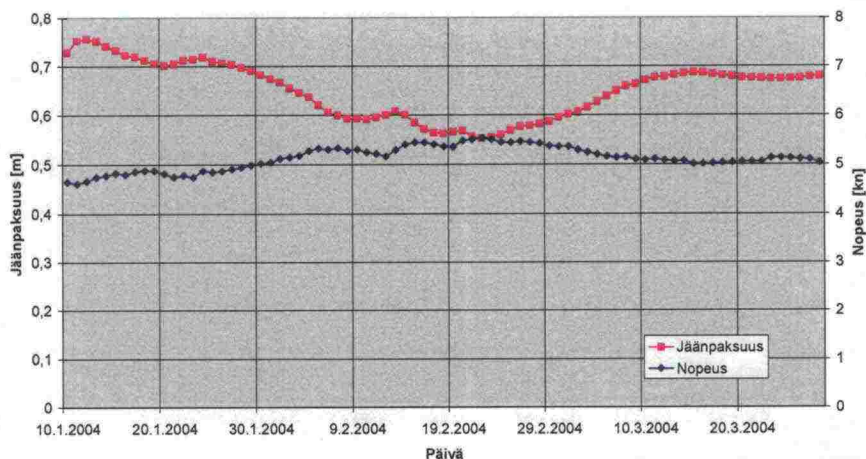
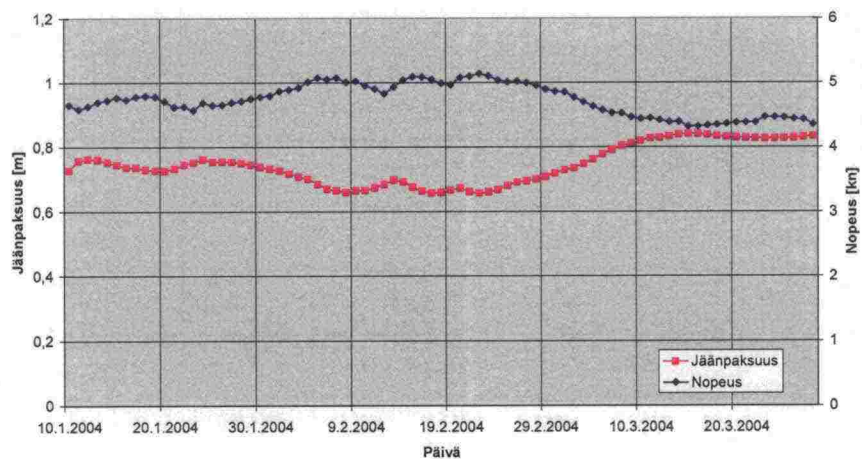
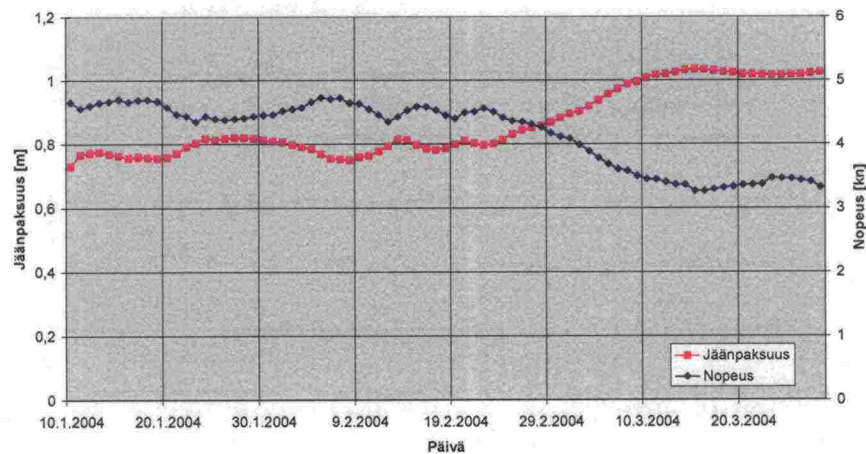


syötettyä lisälämpöä sekä  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ :n juoksutusta kanavan yläjuoksulta. Tarkastellut liikennetilanteet olivat 1, 2 ja 4 alusta vuorokaudessa. Erittäin ankarana talvena 1986–1987 tarkasteltiin myös liikennekatkon vaikutusta tilanteessa, jossa liikennemäärä oli 4 alusta vuorokaudessa ja juoksutus  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , lisälämmön määrä oli sama kuin aikaisemmissa tarkasteluissa.

Transit-simulointien tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 33 - Kuva 37), joista kussakin on yhden talven ja yhden liikennetilanteen jään kehittyminen rännin keskellä sekä MP Vekaran nopeus kulloisessakin jäätilanteessa. Transit-simulointien tulokset on lisäksi kerätty yhteenvetotaulukkoon (Taulukko 3).

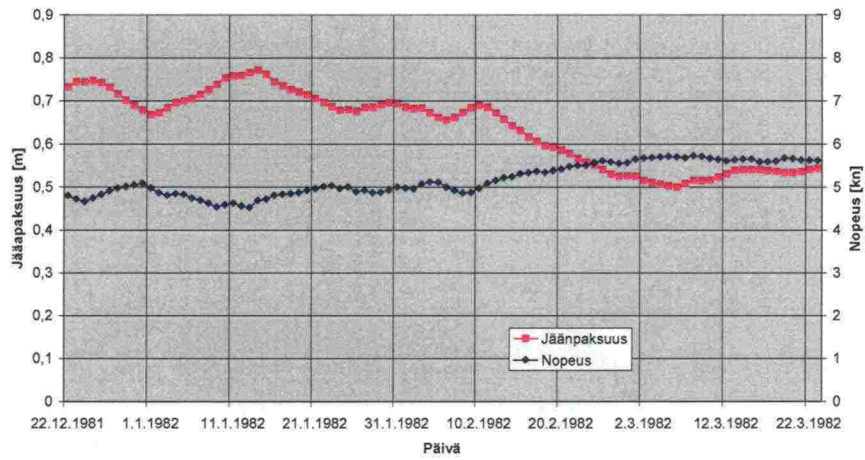
Tulosten perusteella voidaan havaita, että 1A-luokan alus selviää lähes kaikissa esimerkkitalanteissa ilman jatkuvaa jäänmurtaja-avustusta, joskin kanavan kaarrealueet voivat merkittävästi hidastaa aluksen kulkua. Tämän johdosta lisälämmön syöttö olisikin kohdistettava kaarrealueisiin tai muihin vaikeiksi tunnettuihin kohteisiin. Ankarana talvena neljän aluksen liikennemäärällä sekä erittäin ankarana talvena kahden aluksen liikennemäärällä tarvitaan jäänmurtaja-avustusta. Neljän aluksen päivittäisellä liikennemäärällä erittäin ankarana talvena kehittyvä ränniin niin paksu jääkerros, ettei järkevä liikennöinti kanavassa ole enää mahdollista. Ratkaisuna tälle tilanteelle voidaan kylmimmän pakkaskauden aikana käyttää maksimissaan viikon pituista liikenneseisokkia, joka ei vielä aiheuta kuljetusten siirtymistä muille kuljetusmuodoille, mutta aiheuttaa jäätilanteen riittävän keventymisen.

Runsas lumentulo tekee kanavarännin raskaskulkuiseksi jäämassan lisääntyneen koheesion seurauksena. Sen vaikutusta on vaikea huomioda kanavarännin liikennöitävyyden arvioinnissa, koska ilmiöstä ei ole mittaustuloksia. Toisaalta lämmin vesi alentaa huomattavasti rännin jäämassan koheesiota, joka näkyy alusten alentuneena kulkuvastuksena. Tämä havaittiin selkeästi Saimaan kanavalla suoritetussa lämpimän veden purkukokeessa [5], jolloin kanavalla liikkuneiden alusten nopeus kasvoi selvästi purkupaikan kohdalla.

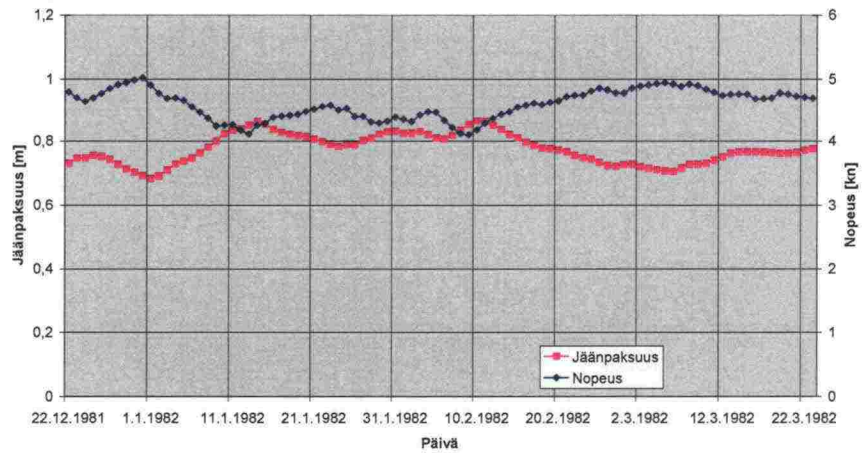
MP Vekara IA  
 2003-2004 1 alus/vrk

 MP Vekara IA  
 2003-2004 2 alusta/vrk

 MP Vekara IA  
 2003-2004 4 alusta/vrk


Kuva 33 MP vekaran nopeus ja jäänpaksuus laivarännin keskellä leutona esimerkkitalvena 2003–2004 kolmelle eri liikennetiheydelle (1 alus, 2 alusta ja 4 alusta vuorokaudessa).

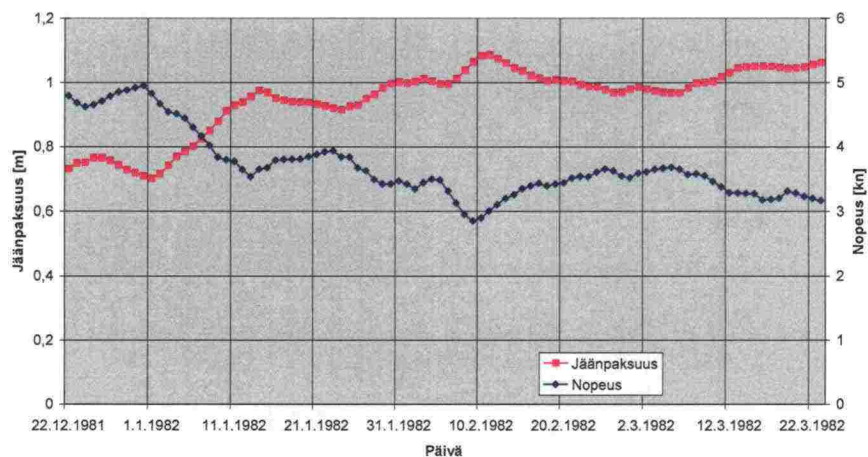
MP Vekara IA  
1981-1982 1 alus/vrk



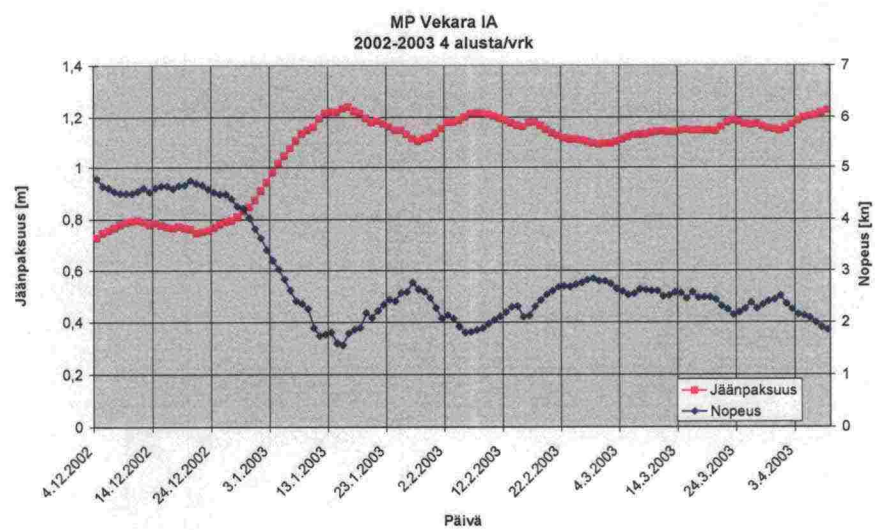
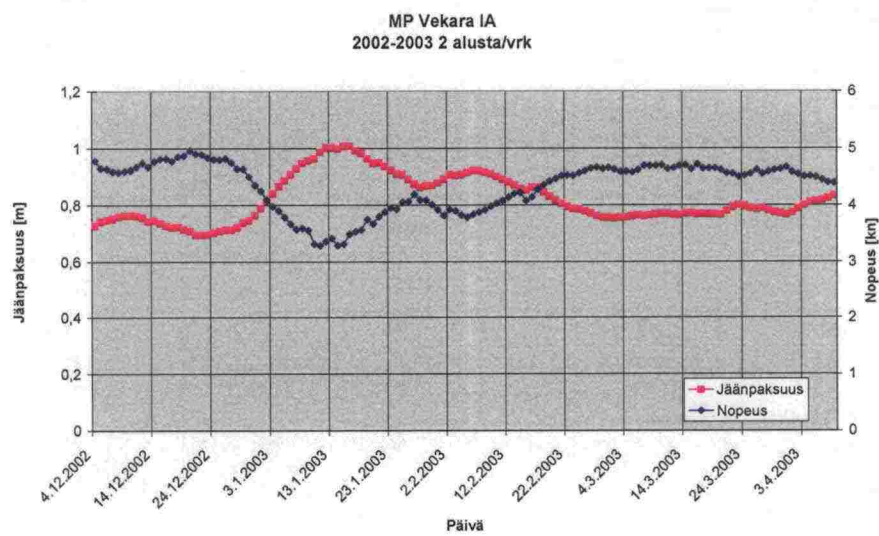
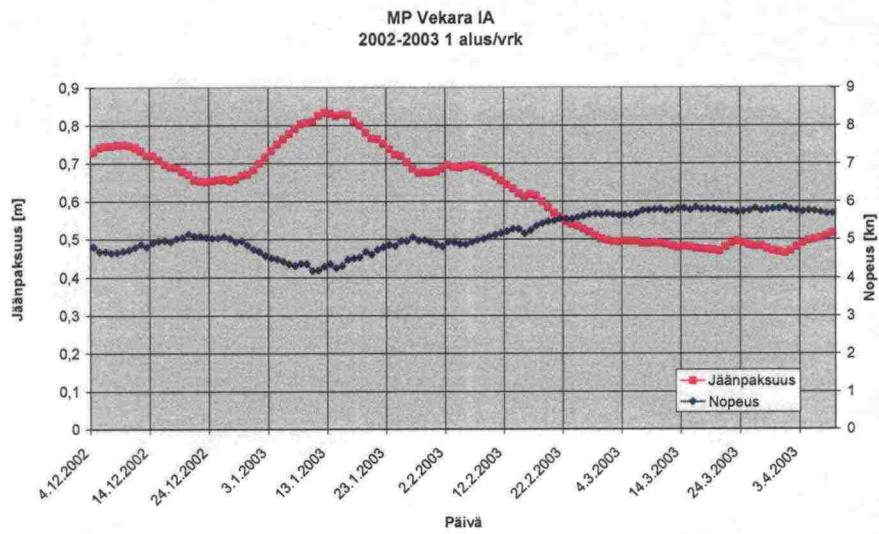
MP Vekara IA  
1981-1982 2 alusta/vrk



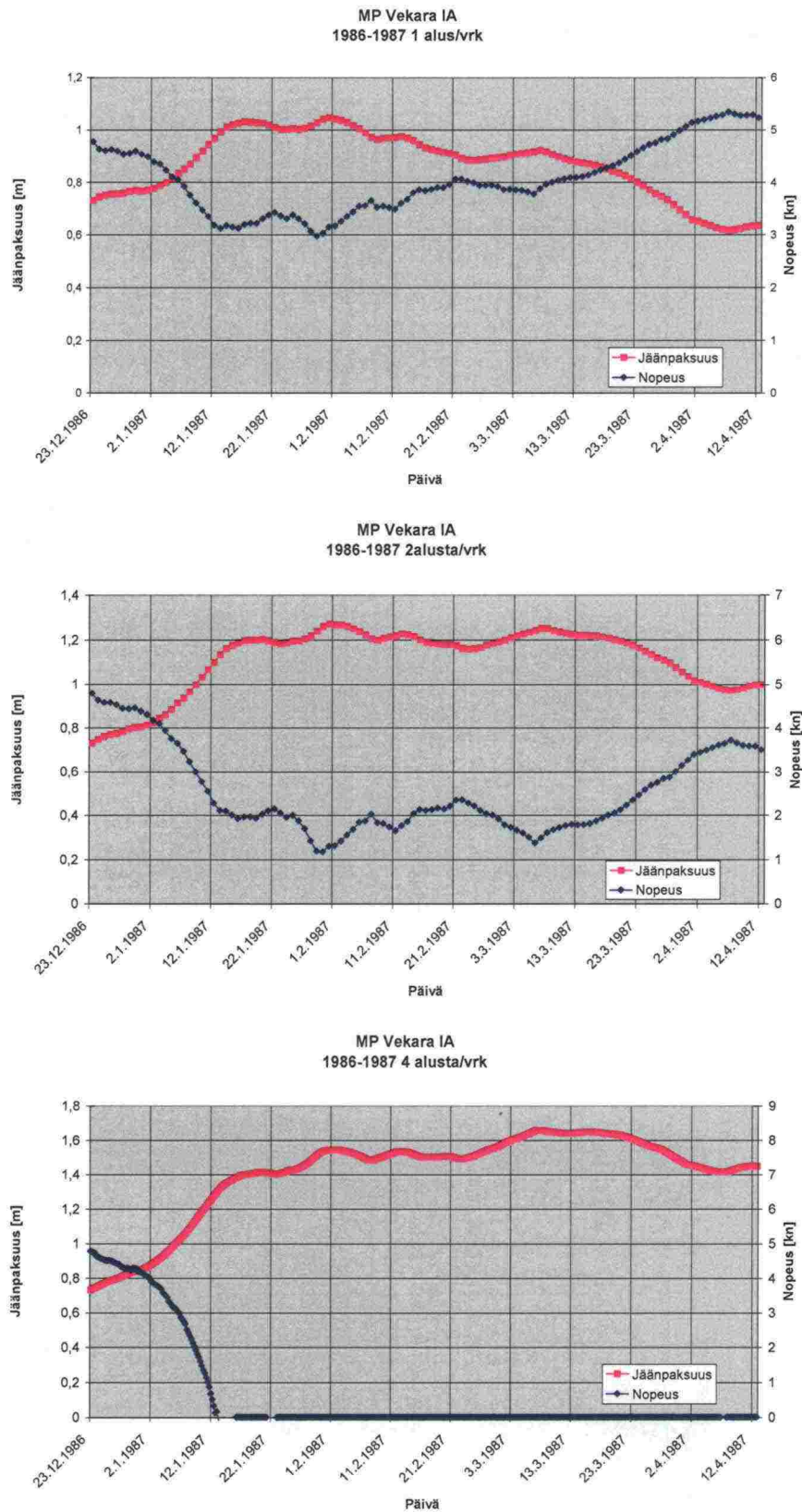
MP Vekara IA  
1981-1982 4 alusta/vrk



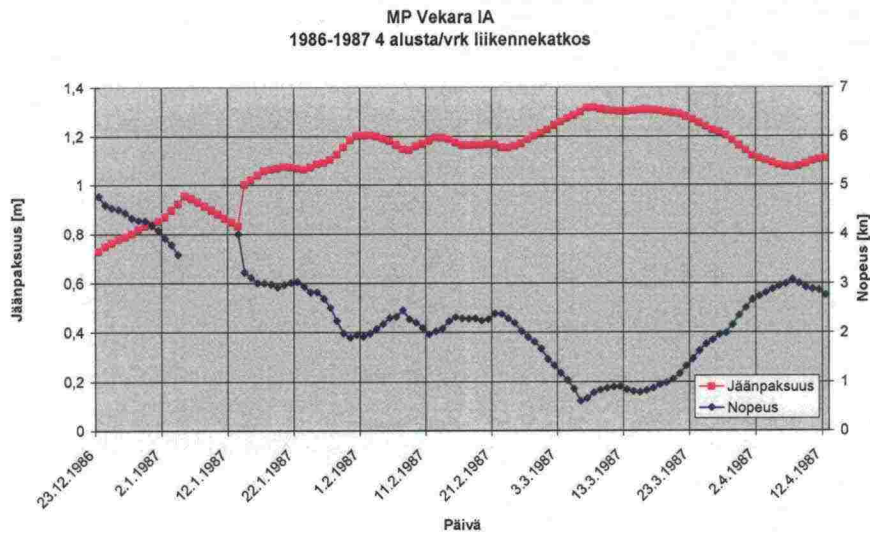
Kuva 34 MP vekaran nopeus ja jäänpaksuus laivarännin keskellä keskimääräisenä esimerkkitalvena 1981–1982 kolmelle eri liikennetiheydelle (1 alus, 2 alusta ja 4 alusta vuorokaudessa).



Kuva 35 MP vekaran nopeus ja jäänpaksuus laivarännin keskellä ankarana esimerkkitalvena 2002–2003 kolmelle eri liikennetiheydelle (1 alus, 2 alusta ja 4 alusta vuorokaudessa).



Kuva 36 MP vekaran nopeus ja jäänpaksuus laivarännin keskellä erittäin ankarana esimerkkitalvena 1986–1987 kolmelle eri liikennetiheydelle (1 alus, 2 alusta ja 4 alusta vuorokaudessa).



Kuva 37 MP vekaran nopeus ja jäänpaksuus laivarännin keskellä erittäin ankarana esimerkkitalvena 1986–1987 kolmelle eri liikennetiheydelle (1 alus, 2 alusta ja 4 alusta vuorokaudessa). Tammikuun alussa oli 7 vuorokauden liikennekatkos.

Taulukko 3 Transit-simulointien yhteenvetotaulukko.

Talvi	Liikenne	Tarkastelu- jakson pituus [vrk]	Keskim. nopeus [kn]	Keskim. jään- paksuus [m]	Avustus alkaa
Leuto talvi 2003–2004	1 alus/vrk	78	5,2	0,65	-
	2 alusta/vrk	78	4,7	0,75	-
	4 alusta/vrk	78	4,2	0,86	-
Keskimäär. talvi 1981–1982	1 alus/vrk	91	5,2	0,64	-
	2 alusta/vrk	91	4,6	0,77	-
	4 alusta/vrk	91	3,7	0,95	-
Ankara talvi 2002–2003	1 alus/vrk	125	5,2	0,63	-
	2 alusta/vrk	125	4,3	0,82	-
	4 alusta/vrk	125	2,8	1,07	5.1.
Erittäin ankara talvi 1986–1987	1 alus/vrk	110	4,1	0,87	-
	2 alusta/vrk	110	2,5	1,11	9.1.
	4 alusta/vrk	110	-	1,41	7.1.
Erittäin ankara talvi 1986–1987, liikennekatkos	4 alusta/vrk	110	2,1	1,12	22.1.

#### 4.4.3 Johtopäätökset

Lähteen [6] mukaan JM Arppe pystyy todennäköisesti liikkumaan kanavassa täydellä koneteholla myös vaikeimmissa olosuhteissa. MP Vekara 1A-luokan koneteholla (2181 kW) pystyisi liikkumaan itsenäisesti noin 130 cm:n jäänpaksuudessa kanavan suorilla osuuksilla, kaarteissa itsenäisen liikkumisen rajapaksuus on noin 100 cm.

Tulosten mukaan liikenne kanavaosuuksilla on syötetyn lisälämmön avulla periaatteessa mahdollista ympäri vuoden, joskin ankarimpina talvina jouduttaneen turvautumaan viikon liikenneseisokkiin, joka vielä sallitaan jotta liikenne katsotaan ympärivuotiseksi. Myös ajo saattueissa kylmimpinä jaksoina helpottaa, koska kehittyvän jään määrä riippuu siitä, kuinka usein vuorokaudessa ränni rikotaan. Jäänkehityksen kannalta on lähes sama onko jäänmurtajan perässä yksi tai useampi avustettava alus. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että

saattueen maksimikoko on jäänmurtaja ja kaksi avustettavaa alusta. Kevyemmissä jääolosuhteissa avustus voidaan toteuttaa ilman, että avustettava alus otetaan hinaukseen. Tällöin jäänmurtaja kulkee aivan rahtilaivan keulan edessä huuhdellen potkurivirrallaan rahtilaivan keulaa ja pienentäen siten rahtilaivan kulkuvastusta. Tähän avustusmuotoon liittyy kuitenkin omat riskinsä, sillä jäänmurtajan nopeuden jostain syystä hidastuessa saattaa avustettava alus törmätä jäänmurtajaan. Turvallisoin avustustapa on kuitenkin ns. haarukkahinaus, jossa avustettava alus otetaan hinaukseen ja sen keula tuetaan jäänmurtajan perässä olevaan hinaushaarukkaan.

Liikenteen sujumista voidaan helpottaa, jos kaarteiden jäätilannetta helpotetaan lisälämmöllä sekä harkitulla jäänmurrolla. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli mahdollista, kaarteet pyritään murtamaan mahdollisimman loiviksi, ja ulkokaarre pyritään säilyttämään mahdollisimman ehjänä. Tällöin saadaan enemmän tilaa täysimittaisten alusten kääntymiselle ja ehjä ulkokaarre ohjaa aluksen keulaa kääntymään vaikka peräsimen teho alhaisella nopeudella liikuttaessa onkin heikko. Käytännössä kaarteita ei voida kuitenkaan voimakkaasti loiventaa, koska sisäkaarten syvyys ei riitä täydessä syvyydessä oleville aluksille, mikäli kaarre murretaan kovin loivaksi. Myös ulkokaarteeseen nojaamiseen liittyy oma turvallisuusriskinsä.

Runsaslumiset talvet voivat merkittävästi vaikeuttaa kanavan laivaliikennettä, koska kanavaränniin satanut lumi kasvattaa rännin jäämassan koheesiota, jota toisaalta kanavaan johdettu lisälämpö pienentää. Näiden seikkojen yhteisvaikutuksen arvioiminen ei ole tällä hetkellä riittävästi tietoja. On huomioitava kuitenkin, että erittäin ankarat talvet ovat harvoin runsaslumisia.

Nuijamaan järvellä on osoittautunut käytännölliseksi käyttää kahta rinnakkaista ränniä samanaikaisesti, jolloin kanavaa ylöspäin kulkeva liikenne käyttää toista ränniä ja alaspäin menevä toista. Tällöin järjestely toimii myös alusten kohtauspaikkana. Jos liikenne on ympärivuotista, on ajettava ensin yhtä ränniä ja kun se käy tiukaksi, on avattava uusi. Kohtaamispaikat on järjestettävä alueille, joissa tilaa on riittävästi.

Viimeaikaisin kehitys on tuonut mukanaan uusia alus- ja propulsiolaiteratkaisuja, jotka toimivat vaikeissa jääolosuhteissa konventionaalisia ratkaisuja paremmin. Perä edellä jäissä kulkevat ns. double-acting -alukset ovat jäämallikokeiden perusteella osoittautuneet erittäin suorituskykyisiksi kyeten liikkumaan itsenäisesti paksussakin rännissä myös vesisyvyyden ollessa rajallinen. Tässä vaikuttaa sama ilmiö kuin edellä kuvatussa potkurivirralla avustamisessa. Propulsiolaitteiden alalla azimuth-propulsio eli ruoripotkuri on osoittautunut erittäin tehokkaaksi jäissä kulkevissa aluksissa. Tämä perustuu siihen, että azimuth-laite antaa yhtä suuren työnnön oli se käännetty mihin asentoon tahansa, jolloin sen ohjausominaisuudet alhaisilla nopeuksilla ovat ylivoimaiset konventionaaliin potkuri-peräsin -ratkaisuihin verrattuna. Azimuth-laitteiden haittapuolena voidaan kuitenkin mainita, että mikäli laitteita käytetään harkitsemattomasti, voidaan voimakkailla potkurivirtauksilla vaurioittaa kanavan penkereitä ja satamien laiturirakenteita. Myös erikoislaivojen ja azimuth-propulsioon kallis hinta hidastavat niiden nopeaa käyttöönottoa Saimaan kanavan liikenteeseen.

Vaikka liikenne Saimaan kanavassa saataisiinkin sujumaan myös ankarina talvina, saattaa liikenne kanavalla pysähtyä Suomenlahden vaikeiden jääolosuhteiden takia. Näin tuleekin tapahtumaan, mikäli riittävää jäänmurtajakapasiteettia ei saada järjestettyä itäiselle Suomenlahdelle ja mikäli ei saada aikaan sopimuksia myös Saimaan kanavalle menevän liikenteen avustamisesta.

## 4.5 Kanavakokonaisuuden tarkastelu

Saimaan kanava ulottuu tässä tarkastelussa kanavan suulta Lavolan kapeikkoon. Kanavan ympärivuotinen liikennöitävyys tarkoittaa sitä, että tälle välille ei synny talvella yhtään tulppaa. Alkupalven liikennöintiin perustuvien kokemusten merkitys on rajallinen silloin, kun ollaan tekemisissä kokemuksiin verrattuna yli kaksikertaisen pakkasmäärän ja vilkkaan liikenteen kanssa.

Kanavan Suomen puoleisella osalla kanavauoma on melko selkeä. Poikkeuksen muodostavat Tuohilampi ja Suikinlampi, mutta nämäkin ovat siksi matalia, että lämpöenergian voi olettaa virtaavan pitkin kanavauomaa.

Lämpöenergian vaikutusten ulottuminen suunnitellusti kanavan suulta ( $3-5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $+1^\circ\text{C}$ ) Mustolan sulun alapuolelle edellyttää jääkannen pysymistä sydäntalvella rännin ulkopuolella kanavanosalla stabiilina. Tämä voi edellyttää varovaista liikennöintiä ja juoksutuksen rajoittamista alkupalvella. Toisaalta suunnitelma sisältää tältä osin varapurkupaikkoja.

Järvijaksoilla väylä on leveä ja niillä voidaan soveltaa kahden rännin strategiaa. Kullekin järvijaksolle valuu lämpöenergiaa tyypillisesti 4-6 MW, kevyessä jäätilanteessa enemmän ja raskaassa vähemmän. Vallitsevan käsityksen mukaan kanavassa virtaava vesi seurailee järvijaksoilla ainakin jossain määrin väylää.

Nuijamaanjärvi ja Bolshoe Cvetotchnoe ovat selkeästi pitkiä järvijaksoja, joilla lämpöenergian voi olettaa pääosin myös kuluvan. Tämä energia voi yhdessä geotermisen energian kanssa helpottaa jossain määrin jäätilannetta järvijaksoilla. Kanavajaksoille tultaessa veden lämpötila on kuitenkin nostettava suunnitelmatasolle sydäntalvella 5-8 MW:n luokkaa olevalla lämpösyötöllä.

Bolshoe Ilistoe ja Maloe Cvetotchnoe ovat lyhyempiä ja kanavamaisempia järvijaksoja, joilla lämpöenergiasta voi saada enemmän hyötyä ja toisaalta sen voi olettaa virtaavan merkittävämmässä määrin järvijaksoa seuraavalle kanavajaksoille. Tässä mielessä arvio 20 MW:n järvijaksoille valuvasta sulatustehosta vaikuttaisi olevan oikeaa suuruusluokkaa tai jopa varmallalla puolella.

Karkean analyysin perusteella kahden rännin strategia muodostaa ankarina talvina järvijaksoille lämpövaikutusten ulottumattomiin suurin piirtein yhtä raskaat rännit kuin kanavajaksoille lämpövaikutusten piiriin.

Yksi potentiaalinen tulppapaikka on Lavolan kapeikko. Tältä osin virtaustiedot ovat puutteelliset. Tuloväylä Novinskin lahdelta Lavolan kapeikkoon on kuitenkin leveä. Erityisesti syvyyttä riittää leveyssuunnassa. Jääkannen alapinnan keskimääräisen karkeuden voi olettaa virtausalueella pieneksi. Tällä perusteella Novinskin lahteen purettavan lämpöenergian voi ajatella liukuvan varsin liukkaasti alaspäin (vähän samaan tapaan kuin Kotkan Sunilasta). Vaikutusten voi ajatella ulottuvan Lavolan kapeikkoon. Jos kapeikossa on tulppa, virtaavan veden termisestä reservistä huomattava osa tarttuu siihen ja kuluu sen sulattamiseen.

Lämpöenergiaa voi olla tarkoituksenmukaista syöttää jo alkupalvesta paikallisesti sulkujen yläpuolelle. Kun sulkuihin tuleva vesi on riittävän lämmintä, sulkujen omat jääongelmat (muurin jääkaulus, sulkuporttien jäätyminen, jäälohkareet porttikomerossa jne. [1]) helpottavat.



Saimaan kanavan jääkontrollisysteemiin näyttää sisältyvän normaalitalvina huomattava tehoreservi. Tämän takia lämmönsyöttöä voidaan säädellä sydäntalvellakin. Toisaalta lämpöä voi muodostua lauhoina jaksoina ylen määrin kanavaan ja sitä voi valua merkittäviä määriä järvijaksoille. Tämä on eräänlaista puskurireserviä kovia pakkasjaksoja ja lumimyrskyjä silmällä pitäen.

Ankarina ja erittäin ankarina pakkastalvina on olemassa liikenteen keskeyttämismahdollisuus viikoksi. Tämä tilanne voi tulla eteen jo sen takia, että kanavaliikenteen ylläpitäminen ei ole tarkoituksenmukaista Suomenlahden itäosassa jäätilanteen ja jäänmurtokapasiteetin rajallisuuden vuoksi. Sulkujen huoltotarpeiden takia tulee joka tapauksessa liikennekatkoja, jotka voi edelleen olla tarkoituksenmukaista ajoittaa sydäntalveen.

Lämmönsyöttöä voi kohdentaa kokemusten ja jäätilanteen perusteella tarkoituksenmukaisella tavalla. Liikennettä voi hoitaa kovina pakkasjaksoina kahden aluksen saattueina, jolloin jään muodostus vähenee. Kaikki mainitut tekijät antavat pelivaraa ympärivuotisen liikenteen ylläpitämiseksi kanavassa suunnitellun lämmönsyötön puitteissa.

## 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 5.1 Talviliikennöintistrategia

Saimaan kanavavan talviliikennöintistrategian on kaavailtu sisältävän uudessa tilanteessa seuraavankaltaisia elementtejä:

- Jääkannen annetaan stabiloitua ennen kuin lämpöä ryhdytään johtamaan kanavaan poikkeuksena sulut, joiden yläpuolelle johdetaan tarpeen mukaan lämmintä vettä;
- Lämpösyötön säätelyllä pyritään ylläpitämään tilanne, jossa jääkansi pysyy stabiilina, mutta alukset kykenevät liikennöimään kanavassa itsenäisesti ilman jäänmurtajan tukea;
- Juoksutus pyritään pitämään minimissä (3–5 m<sup>3</sup>/s) kuitenkin siten, että kanavansuulta juoksutettavan lämpimän veden vaikutukset ulottuvat Mustolan sulun alapuolelle;
- Järvijaksoille avataan tarpeen vaatiessa toinen ränni;
- Jäänmurtaja-avustus ja kanavan jääkannen harkittu murtaminen erityisesti kaarteiden alueella;
- Kaarrealueille suunnataan lisälämpöä jäätilanteen keventämiseksi;
- Ääritilanteissa ja tarpeen vaatiessa sovelletaan joustavuustekijöitä ja järjestelymahdollisuuksia, kuten saattueajo, lämmön kohdentaminen ja liikennekatko;
- Uudet alus- ja propulsiolaiteratkaisut yleistyessään tuovat lisää joustavuutta Saimaan kanavan liikennöintiin.

### 5.2 Tulosten tarkastelu

Suunniteltu lisälämpömäärä 120 MW + 20 MW riittää sulattamaan noin 60 000 m<sup>3</sup> lohkarjäää vuorokaudessa. Tämä tekee vuorokaudessa keskimäärin runsaat 1 m<sup>3</sup> lohkarjäää kanavametriä kohti 46 km:n matkalla kanavan suulta Lavolan kapeikkoon.

Lohkarejään muodostumisen arviointiin käytetty laskentamenetelmä antaa tuloksia, jotka ovat sopuosoinnussa vuosikymmenten aikana Saimaan kanavalla mitatun jään muodostuksen kanssa. Muihin lohkarjään muodostumisen arviointiin käytettyihin algoritmeihin verrattuna tässä yhteydessä käytetty laskentamenetelmä on varmalla puolella. Myös lohkarjään sulamista varten on kehitetty mittaustulosten perusteella menetelmä juoksutetussa ja liikennöidyssä kanavassa.

Talvella 2003–2004 tehtiin Saimaan kanavalla liikennöinti- ja juoksutuskokeita. Kanavan suulta juoksutettiin lämpöenergiaa lämpimän veden muodossa liikennöintikauden aikana yli 80 MW:n ja liikennöintikokeiden aikana aluksi yli 40 MW:n teholla. Lämpimän veden vaikutukset lohkarjääkerroksen paksuuteen ulottuivat kanavan suulta Kansolaan asti. Toisaalta sulatusvaikutukset painoutuivat epätasaisesti. Veden lämpötilan ja lohkarjääkerroksen paksuuden kehitys onnistuttiin simuloimaan kehitetyn jään muodostus- ja sulatusmallin avulla tyydyttävästi tämän selvityksen kannalta relevantilla jaksolla Soskuan sulun alapuolelta Nuijamaalle.

Jään muodostusta simuloitiin kanavassa kehitetyn jään muodostus- ja sulamismallin avulla erilaisina talvina rahtialusliikenteellä 1, 2 ja 4 alusta vuorokaudessa, kun kanavametriä kohti oli käytössä jään sulatukseen 2,5 kW lämpöteho. Suunnitelman mukainen keskiteho on 3 kW/m, mutta tehon on ajateltu vaihtelevan välillä 2,5–3,5 kW/m kilometrin etäisyyksillä sijaitsevien purkupisteiden välillä. Tulosten mukaan jäätilanne pysyi sallituissa rajoissa lukuun ottamatta erittäin ankaraa talvea liikennetiheydellä 4 alusta vuorokaudessa.

Simulaatioiden mukaan sulatusteho vaihtelee kuitenkin suunniteltua enemmän silloin kun kanavapoikkileikkauksessa on paksusti lohkarajäättä. Tämän tilanteen hallitsemiseksi on tarjolla seuraavia jousto- ja järjestelymahdollisuuksia:

- Saattueajo;
- Lämmön syötön kohdentaminen ongelmajaksolle;
- Liikennekatko.

Käytännössä purkupisteitä voidaan lisätä varsin vähäisin kustannuksin, jos detaljisuunnitteluvaiheen tarkentavat selvitykset antavat tähän aihetta. Niitä voidaan lisätä varsin helposti myös jälkikäteen, jos ongelmia ilmaantuu.

1A-jääluokan alus pystyy selviytymään leutoina ja keskimääräisinä talvina Saimaan kanavalla lähes ilman jäänmurtaja-avustusta. Vain erittäin ankarina talvina neljän aluksen vuorokautisella liikennemäärällä liikennöintiin kanavalla ei ole enää realistisia mahdollisuuksia.

Uudet alus- ja propulsiolaiteratkaisut, kuten perä edellä kulkevat double-acting -alukset ja propulsiolaitteiden alalla azimuth-propulsio eli ruoripotkuri saattavat tehdä jatkuvan liikennöinnin kanavalla mahdolliseksi myös erittäin ankarina talvina.

Jos YK:n ilmastopaneelin (IPPC) ennusteet pitävät paikkansa, talvet lauhtuvat myös Saimaan kanavalla. Uudella kanavan vuokra-ajalla tässä raportissa ankarana käsitellystä talvesta tulleeekin tilastollisesti erittäin ankara.

## 5.3 Johtopäätökset

Suunniteltu lisälämpö määrä riittää kehitetyn laskentamallin perusteella Saimaan kanavan ympärivuotisen talviliikennöinnin edellyttämään jäätilanteen hallintaan. Lauhoina ja normaaleina talvina kapasiteettia ei tarvitse ottaa kokonaisuudessaan käyttöön.

Ankarien tai erittäin ankarien talvien poikkeuksellisen kovien pakkasjaksojen aikana vilkkaasti liikennöidyssä kanavassa voi esiintyä ongelmia. Näiden hallitsemiseksi on tarjolla erilaisia järjestely- ja joustomahdollisuuksia.

## Lähdeviitteet

1. Eranti Engineering Oy, 1999. Ympärivuotisen kanavaliikenteen edellytykset Suomessa. Jäänmuodostus kanavassa ja sulun kattaminen. Merenkululaitoksen tilaama raportti.
2. Eranti Engineering Oy, 2000. Lämpöenergian käyttömahdollisuudet jäätilanteen hallintaan Saimaan kanavalla. Merenkululaitoksen tilaama raportti.
3. VTT Valmistustekniikka, 2000. MS Jääkotkan koeajot talvella 1999 – 2000. Merenkululaitoksen tilaama raportti VAL34-001304.
4. Suunnittelukeskus Oy, 2001. Lämpimän veden jakelu Saimaan kanavaan. Esisuunnitelma teknisestä toteutuksesta. Merenkululaitoksen tilaama esisuunnitelma.
5. Lyytinen, Kalle, 2001. Saimaan kanavan jäätilanteen hallinta lämpimän veden avulla. Diplomityö. TKK, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto.
6. VTT Tuotteet ja Tuotanto, 2004. Saimaan kanavan talviliikennöintitutkimus JM Arppella ja MP Vekaralla. Merenkululaitoksen tilaama tutkimusraportti TUO34-044029.
7. Penttinen, M., 1982. Satamien ja kanavien jäätilanteen hallinta. Diplomityö, TKK, Rakennusinsinööri-osasto.
8. Eranti Engineering Oy, 2003. Saimaan kanavan geoterminen lämmöntuotanto ja vuodelle 2003 suunniteltu talviliikennetutkimus. Merenkululaitoksen tilaama raportti.
9. Piironen, S. 2002. Saimaan kanavan jäätilanne. Muistio 20.1.2002.
10. Berenger, D., Michel, B., 1975. Algorithm for accelerated growth of ice in a ship's track. Proc. International Symposium on Ice Problems (IAHR), Hanover, N.H., USA.
11. Eranti, E., G.C.Lee, 1986. Cold Region Structural Engineering. McGraw-Hill Book Company.
12. Sandqvist, J., 1981. Conditions in brash ice covered channels with repeated passage. Proc. International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Quebec, Canada.
13. International Navigation Association (PIANC), 2004. Technical and Economic Problems of Channel Icing. InCom Report of WG 23.
14. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto (RIL), 2004. Pohjanrakennusohjeet. RIL 121-2004.
15. Mellor, M., 1980. Ship resistance in thick brash ice. Cold Regions Science and Technology, 3, s 305 – 321.
16. Riska, K., Wilhelmson, M., Englund, K., Leiviskä, T.. Performance of merchant vessels in ice in the Baltic. Winter Navigation Research Board, Research report No 52.

Finnish Maritime Administration and Swedish Administration of Shipping and Navigation. Espoo 1997.

17. Kvaerner Masa-Yards Technology. Jäämallikokeet sisävesialuksen suorituskyvyn määrittämiseksi kanavassa talviolosuhteissa. MARC report A-276. Helsinki 1999.

