

Virtausmalli lämpöpäästöjen leviämisen arviointiin

Raportin täydennys 15.10.2009
Hydrodynaamisen merimallin kuvaus

*Hannu Lauri, YVA Oy
Tekniikantie 21 B, 02150 Espoo
puh: 09-7001 8680 fax: 09-7001 8682
email: hannu.lauri@eia.fi*

Sisällys

1.	Johdanto.....	3
2.	Laskentamallin kuvaus	3
2.1.	Virtauslaskenta	3
2.2.	Lämpötilan ja suolaisuuden laskenta.....	6
2.3.	Turbulenssin laskenta	8
2.4.	Mallihila ja numeerinen ratkaisumenetelmä	9
2.5.	Avoimet reunat	11
2.6.	Jäämalli.....	11
2.7.	Staatinen ja dynaaminen laskentatapa	11
3.	Mallisovellukset	12
3.1.	Laskentamenetelmät ja parametrit.....	12
3.2.	Mallihilat	12
3.3.	Otto- ja purkupaikat.....	13
3.4.	Laskentajakson valinta	13
3.5.	Avoimet reunat	13
3.6.	Säätiedot	14
3.7.	Jokivirtaamat	14
3.8.	Fennovoiman voimalayksiköt	14
3.9.	Mallitulosten vertailut mittauksiin	15
4.	Simon mallisovellus	15
4.1.	Mallihila	15
4.2.	Säätiedot, Kemi I	18
4.3.	Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat.....	20
4.4.	Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot.....	20
4.5.	Vertailu Perämeren lämpötilamittauksiin.....	20
4.6.	Vertailu Perämeren jäätilanteeseen	23
5.	Pyhäjoen mallisovellus.....	25
5.1.	Mallihila	25
5.2.	Säätiedot, Nahkiainen.....	28
5.3.	Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat.....	30
5.4.	Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot.....	30
5.5.	Vertailu Pohjanlahden lämpötilamittauksiin	30
5.6.	Vertailu Pohjalahden jäätilanteisiin.....	33
6.	Ruotsinpyhtään mallisovellus.....	35
6.1.	Mallihila	35
6.2.	Säätiedot, Orregrund	37
6.3.	Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat.....	40
6.4.	Loviisan voimalayksiköt	40
6.5.	Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot.....	40
6.6.	Vertailu Suomenlahden lämpötilamittauksiin	42
6.7.	Vertailu Suomenlahden havaittuihin jäätilanteisiin.....	45
7.	Pohdinta.....	47
7.1.	Laskennan epävarmuuksista.....	47
7.2.	Mallin kehitystarpeita	48
8.	Lähdeluettelo	49

staattisen oletuksen mukaan syvyys suunnan likeyhtälössä termit painegradienttia ja gravitaatiota lu-
kuun ottamatta ovat pieniä ja jätetään huomiotta. Boussinesq'in approksimaatiossa oletetaan veden ko-
koonpuristumattomuuden perusteella veden tiheysvaihtelut vähemmän merkitseviksi kuin nopeusvaihtelut.
Nämä oletukset ovat käytössä vesistö malleissa yleisesti, eikä niiden katsota aiheuttavan merkittä-
vää virhettä suurempien vesialueiden laskennassa. Oletuksista hydrostaattinen oletus on ehkä rajoitta-
vin, sillä kun siirrytään riittävän pieneen mittakaavaan horisontaalisuunnassa (noin 10 metriä), oletuk-
sen teoreettinen paikkansapitävyys heikkenee.

Turbulenssi esitetään mallissa horisontaalisten ja vertikaalisten pyörreviskositeettikertoimien v_{hor} ja v_{ver}
avulla. Pyörreviskositeettikertoimia käytettäessä turbulenttisen sekoittumisen aikakeskiarvo oletetaan
paikallisesta nopeusgradientista riippuvaksi.

Näillä oletuksilla saadaan virtausyhtälöt kirjoitettua seuraavaan muotoon:

$$(1) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{hor} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{hor} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{ver} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$$

$$(2) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{hor} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{hor} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{ver} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{v}$$

$$(3) \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho$$

$$(4) \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

\mathbf{u} = nopeusvektori (u,v,w) (m/s)

u, v = vaakasuuntaiset virtausnopeuden komponentit (m/s)

t = aika (s)

p = paine (Pa)

f = corioliskerroin

ρ_0 = veden keskimääräinen tiheys (kg/m³)

ρ = veden tiheys (kg/m³)

g = 9.81 m/s²

v_{hor}, v_{ver} = vaaka- ja pystysuuntainen pyörreviskositeettikerroin (m²/s)

Yllä olevat yhtälöt (1) ja (2) kuvaavat vaakasuuntaisen virtauksen muutosta ajan suhteen. Virtauksen
muutos ajan suhteen on summa coriolis-vaikutuksesta, pinnankorkeus- ja tiheyserojen vaikutuksesta,
pyörreviskositeetin vaikutuksesta ja liikemäärän säilymisestä. Yhtälö (3) kuvaa tiheyserojen vaikutusta
pystysuuntaiseen painetermiin, ja yhtälö (4) varmistaa massan säilymisen.

Yhtälöiden (1)–(4) lisäksi, yhtälöiden ratkaisuun tarvitaan reunaehtoja; veden pinnalla paine asetetaan
ilmanpaineen suuruiseksi (5), pohjalla virtausnopeus on nolla, veden pinnalla tuulen leikkausjännitys
on samansuuruinen ja -suuntainen kuin pyörreviskositeettitermi (6), pohjalla pohjakitkan aiheuttama
leikkausjännitys on samansuuruinen kuin pyörreviskositeettitermi mutta vastakkaisuuntainen (7), sekä
reunoilla, jokisuistoissa ja luusuoissa virtausnopeus on annetun virtaaman suuruinen (8).

$$(5) \quad p = p_a(x, y) \quad \text{pinnalla}$$

$$(6) \quad v_{ver} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \boldsymbol{\tau} / \rho \quad \text{pinnalla}$$

$$(7) \quad -v_{ver} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \boldsymbol{\tau}_B / \rho \quad \text{pohjalla}$$

$$(8) \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_{river} \quad \text{jokien suistoissa ja luusuoissa}$$

$$p_a(x, y) = \text{ilmakehän paine veden pinnalla} (N/m^2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \text{tuulen leikkausjännitys veden pinnalla} (N/m^2)$$

$$\boldsymbol{\tau}_B = \text{pohjakitkan aiheuttama leikkausjännitys pohjalla} (N/m^2)$$

$$\mathbf{u}_{river} = \text{jokivirtaamat} (N/m^2)$$

Pinnankorkeuden muutosten laskemiseksi yhtälöt (1–4) syvyyskeskiarvotetaan. Tällöin nopeus- ja painetermit jaetaan syvyyskeskiarvotettuun osaan ja poikkeamaan keskiarvosta. Lisäksi syvyysuuntaiset nopeudet oletetaan pieniksi vaakasuuntaisiin nopeuksiin verrattuna ja vesikerroksen tiheysvaihtelut pieniksi. Näillä oletuksilla saadaan syvyyskeskiarvotetut yhtälöt (9)–(11).

$$(9) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P_a}{\bar{\rho}} + g\eta \right) + fv + \frac{\tau_x + \tau_{Bx}}{H\bar{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$(10) \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P_a}{\bar{\rho}} + g\eta \right) - fu + \frac{\tau_y + \tau_{By}}{H\bar{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$(11) \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

u, v syvyyskeskiarvotetut virtausnopeudet (m/s)

f corioliskerroin

η pinnankorkeus (m)

h syvyys (m)

H $h + \eta$, kokonaissyvyys (m)

τ_x, τ_y tuulen leikkausjännityksen komponentit (N/m²)

τ_{Bx}, τ_{By} pohjakitkan leikkausjännityksen komponentit (N/m²)

$\nu_{xx}, \nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{yy}$ pyörreviskositeettimatriisin elementit (m/s²)

Virtauslaskennan ratkaisu etenee siten, että pinnankorkeuden muutokset lasketaan syvyyskeskiarvotetuista yhtälöistä (9)–(11) käyttäen, jonka jälkeen painetermit ja virtausnopeuksien komponentit voidaan laskea 3D-yhtälöistä (1)–(4) käyttäen.

Tuulen aiheuttama leikkausjännitys veden pinnalla lasketaan tuulen nopeuden neliöstä riippuvana, yhtälöä (12) käyttäen.

$$(12) \quad \begin{aligned} \tau_x &= K_S \rho_a u_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} \\ \tau_y &= K_S \rho_a v_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} \end{aligned}$$

K_S = tuulikitkakerroin

ρ_a = ilman tiheys

u_a, v_a = tuulen nopeuden u- ja v-komponentit 10 metrin korkeudella

Pohjakitkan aiheuttama leikkausjännitys lasketaan virtausnopeuden neliöstä riippuvana. Tuulikitkan leikkausjännitys lasketaan vastaavasti yhtälöä (13) käyttäen.

$$(13) \quad \begin{aligned} \tau_{Bx} &= K_B \rho u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \tau_{By} &= K_B \rho v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned}$$

K_B = pohjakitkakerroin

2.2. Lämpötilan ja suolaisuuden laskenta

Veden lämpötila ja suolaisuus lasketaan mallissa yhdessä veden virtauksen kanssa, sillä molemmat tekijät vaikuttavat veden tiheyteen ja sitä kautta virtaukseen. Lämpötilan ja suolaisuuden, eli tiheysmuuttujien vaikutus, otetaan malliyhtälöissä huomioon siten, että yhtälöissä käytetty veden tiheys riippuu näistä muuttujista. Syvyysuuntainen tiheysero vaikuttaa myös turbulenssin laskentaan.

Tiheysmuuttujat kulkeutuvat vesivirtauksen mukana ja sekoittuvat vaaka- ja syvyysuunnissa turbulentsin sekoittumisen kautta. Tiheysmuuttujien laskenta on kuvattu alla lyhyesti, yksityiskohtaisempi kuvaus löytyy lähteestä (Koponen et al. 1992).

Tiheysmuuttujien kulkeutumista mallinnetaan advektio–diffuusio -yhtälöllä, jonka mukaan aineen pitoisuus sekä kulkeutuu virtauksen mukana, että leviää turbulentsin diffuusion vaikutuksesta. Sekä lämpötilalle että suolaisuudelle ratkaistaan oma kulkeutumisyhtälö. Yhdelle muuttujalle kolmessa dimensiossa yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$(14) \quad \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_h \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + L$$

c = aineen pitoisuus (lämpötila tai suolaisuus)

t = aika, s

u, v, w = tunnetut veden virtausnopeuskomponentit, m/s

D_h = horisontaalinen pitoisuuden diffuusiokerroin, m^2/s

D_v = vertikaalinen pitoisuuden diffuusiokerroin, m^2/s

L = muut prosessit, kuten esimerkiksi sedimentaatio ja hajoaminen

Ensimmäinen termi vasemmalla on pitoisuuden muutos ajan suhteen. Kolme seuraavaa termiä vasemmalla kuvaavat aineen kulkeutumista virtauksen mukana. Kolme ensimmäistä termiä oikealla kuvaavat sekoittumista vaaka- ja pystysuunnissa. Viimeinen termi oikealla riippuu siitä, mitä prosesseja ja reaktiota kulkeutuvalla aineella tapahtuu.

Tiheysmuuttujien kulkeutuminen lasketaan ratkaisemalla edellä mainittu advektio–diffuusio -yhtälö virtaushilassa vastaavantyyppisillä menetelmillä kuin virtausyhtälöt. Yhtälön ratkaisemiseksi tiheysmuuttujien alkupitoisuudet on tunnettava tai arvioitava laskentajakson alkuhetkellä. Reunojen laskemiseen tarvitaan tiheysmuuttujien pitoisuudet mallin reunoilla koko laskentajakson ajalta.

Kulkeutumisen lisäksi lämpötilalle on i laskettava lämpötilatasapaino pintakerroksessa. Lämpötilatasapaino lasketaan ottamalla huomioon tuleva ja lähtevä säteily, haihdunta ja johtumalla tapahtuva lämmönvaihto ilmakehän kanssa. Lämpötilatasapainoa kuvaa yhtälö (15), jonka mukaan lämpö määrän muutos on lämpöä tuovien ja poistavien tekijöiden summa.

$$(15) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = R + LE + H + f + b + a$$

Yhtälössä dQ/dt on veden lämpömäärän muutos aikayksikköä kohden. R on nettosäteily, joka sisältää tulevan lyhytaaltoisen säteilyn (S , näkyvä valo), sekä lähtevän ja tulevan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn (L_{in} ja L_{out}). LE on haihdunnan ja tiivistymisen aiheuttama lämpömäärän muutos ja H ilmakehän ja veden välisen lämmönjohtumisen kautta tapahtuva lämpömäärän muutos. f on tulo- ja menovirtaamien mukana kulkeutuva lämpömäärä ja sadannan aiheuttama lämpömäärän muutos. b on pohjan kautta tapahtuva lämpömäärän siirtyminen. a on ihmisen toiminnan aiheuttama lämpömäärän muutos.

Tuleva lyhytaaltoinen säteily voidaan ottaa joko mittauksista tai laskea päivämäärän, leveysasteen ja havaitun pilvisyyden perusteella. Lähtevä lämpösäteily lasketaan veden pintalämpötilan perusteella yhtälöä (16) käyttäen, tuleva lämpösäteily riippuu ilman lämpötilasta ja kosteudesta yhtälön (17) mukaisesti. Haihdunta ja lämmönjohtuminen riippuvat tuulen nopeudesta, ilman ja veden lämpötilaerosta sekä ilmakehän kosteudesta. Termit lasketaan yhtälöitä (18) ja (19) käyttäen. Laskennan lähtötiedoiksi tarvitaan tuulen nopeus, ilman lämpötila ja ilman kosteus.

$$(16) \quad L_{out} = \varepsilon_w \sigma_B (T_w + 273)^4$$

ε_w = veden emissiivisyys, 0.97

σ_B = Stefan–Boltzmann'in vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$

T_w = veden lämpötila (°C)

$$(17) \quad L_{in} = \varepsilon_a \sigma_B (T_a + 273)^4 (1 + k_a C_l^2)$$

$\varepsilon_a = 0.937 \cdot 10^{-5} (T_a + 273)^2$

T_a = ilman lämpötila (°C)

k_a = pilvisyyserroin, 0.17

C_l = havaittu pilvisyys (0–1)

$$(18) \quad L_e = \rho L (a_e + b_e u_a) (e_w - e_a)$$

a_e, b_e = empiirisiä kertoimia

u_a = tuulen nopeus (m/s)

e_w = vesihöyryn paine veden pinnalla (Pa), $e_w = 6.108 \exp(17.27 T_w / (T_w + 237.44))$

e_a = vesihöyryn osapaine ilmassa (Pa), $e_a = R_h 6.108 \exp(17.27 T_a / (T_a + 237.44))$

R_h = ilman suhteellinen kosteus (0-1)

$$(19) \quad H = 0.61 \frac{p_a}{1000} \left(\frac{T_w - T_a}{e_w - e_a} \right) L_e$$

p_a = ilmanpaine (Pa)

Lämpötilatasapainoon vaikuttavista tekijöistä suurimmat ovat selvästi lyhytaaltoisen säteilyn kautta tapahtuva veden lämpiäminen ja pitkäaaltoisen säteilyn kautta tapahtuva veden viileneminen. Lähtevän lämpösäteilyn lisäksi, veden lämpenemistä tasaavat veden haihtumiseen kuluva lämpö ja lämmön johtuminen ilmakehään. Elon mukaan (Elo 2007) pohjoismaisilla järvillä lämmönjohtumisen ja haihtumi-

sen suhde on noin 1:4; johtumiseen verrattuna, haihdunta on selvästi merkittävämpi vettä viilentävä tekijä. Tosin alkukesästä, kun veden ja ilman lämpötilaero on suuri, voi lämmön siirtyminen johtumalla olla lähes yhtä suuri, kuin lämmön siirtyminen haihdunnan kautta.

Lämpöä voi siirtyä myös vesimassan ja pohjaan välillä, mutta mallissa tämä lämmönsiirto pohjaan on oletettu pieneksi, eikä sitä oteta laskennassa huomioon.

2.3. Turbulenssin laskenta

Turbulenssi lasketaan mallissa vaakasuunnassa Smagorinskyn mallia käyttäen, syvyysuunnassa k-ε mallia käyttäen. Kyseisen tyyppiset mallit ovat käytössä merimalleissa yleisesti.

Smagorinskyn mallin mukaan vaakasuuntainen pyörrediffuusiokerroin lasketaan seuraavasti:

$$(20) \quad \nu_{hor} = (C_s^2 \Delta x \Delta y) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$$

C_s = Smagorinskyn kerroin (~ 0.17)

$\Delta x, \Delta y$ = hilakopin koko x- ja y-suuntiin

K-ε mallissa turbulenssin pyörreviskositeettitermit lasketaan turbulenssin kineettisen energian k ja dissipaation (ts. energiahäviön) ε avulla. Turbulenssin kineettistä energiaa generoituu virtausnopeuseroista, kuten esimerkiksi nopeasti virtaavan veden ja paikoillaan olevan veden rajapinnassa. Turbulenssia voi generoitua myös tiheuseroista, esimerkiksi kun lämmintä vettä viedään kylmän vesikerroksen alle. Turbulenssin kineettinen energia häviää lämmöksi, tyypillisesti sitä tehokkaammin, mitä voimakkaampaa turbulenssi on. Tarkempi kuvaus k-ε mallista löytyy lähteestä (Umlauf et al. 2006).

Virtauslaskennassa käytettävät pyörreviskositeettitermit saadaan yhtälön 21 avulla turbulenssin kineettisen energian k ja turbulenssin pituusskaalan l avulla. Pituusskaala voidaan laskea puolestaan turbulenssin dissipaatiosta yhtälöä (22) käyttäen. Turbulenssin kineettinen energia lasketaan käyttäen yhtälöä (23), jonka mukaan turbulenssin kineettisen energian muutos ajan suhteen riippuu turbulenssia tuottavista lähde termeistä, turbulenssia vähentävästä dissipaatiosta ja turbulenssin diffuusiosta syvyysuunnassa. Turbulenssin dissipaatio lasketaan kineettistä energiaa vastaavasti yhtälöllä (24). Lähde termit P ja G yhtälössä (24) lasketaan yhtälöiden (25) ja (26) avulla.

$$(21) \quad \nu_t = c_\mu k^{1/2} l$$

ν_t = pyörreviskositeetti

k = turbulenssin kineettinen energia

c_μ = vakio

l = turbulenssin pituusskaala

$$(22) \quad l = (c_\mu^0)^3 \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

k = turbulenssin kineettinen energia

c_μ^0 = vakio

l = turbulenssin pituusskaala

$$(23) \quad \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \varepsilon$$

k = turbulenssin kineettinen energia

σ_k = Schmidt-vakio kineettiselle energialle

P = turbulenssin nopeuseroista riippuva lähde-termi

G = turbulenssin tiheuseroista riippuva lähde-termi

ε = turbulenssin dissipaatio

$$(24) \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P + c_{\varepsilon 3} G - c_{\varepsilon 2} \varepsilon)$$

σ_ε = Schmidt-vakio dissipaatiolle

c_{1e}, c_{2e}, c_{3e} = vakiota

$$(25) \quad P = v_t \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(26) \quad G = v_t \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$

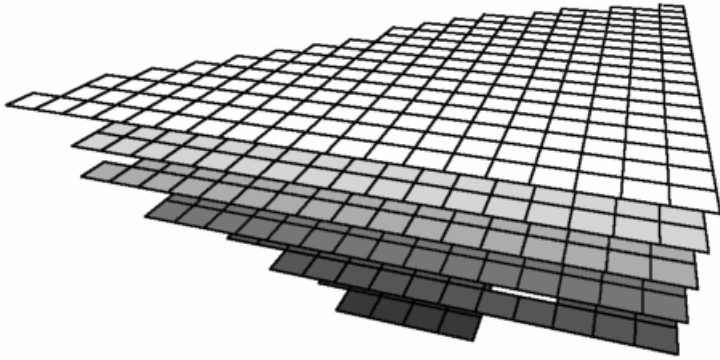
Yhtälöt 21–26 muodostavat yhtälöryhmän, jonka perusteella virtaus- ja kulkeutumisyhtälöissä käytettävät pyörreviskositeettitermit voidaan laskea. Turbulenssimallin ollessa mukana laskennassa, virtausnopeudet lasketaan ensin käyttämällä edellisen aika-askelen pyörreviskositeettiarvoja. Virtausnopeuksien laskennan jälkeen lasketaan turbulenssin kineettinen energia ja dissipaatio yhtälöiden (23) ja (24) perusteella, minkä jälkeen pyörreviskositeettitermit voidaan päivittää seuraavaa virtauslaskennan aika-askelta varten.

2.4. Mallihila ja numeerinen ratkaisumenetelmä

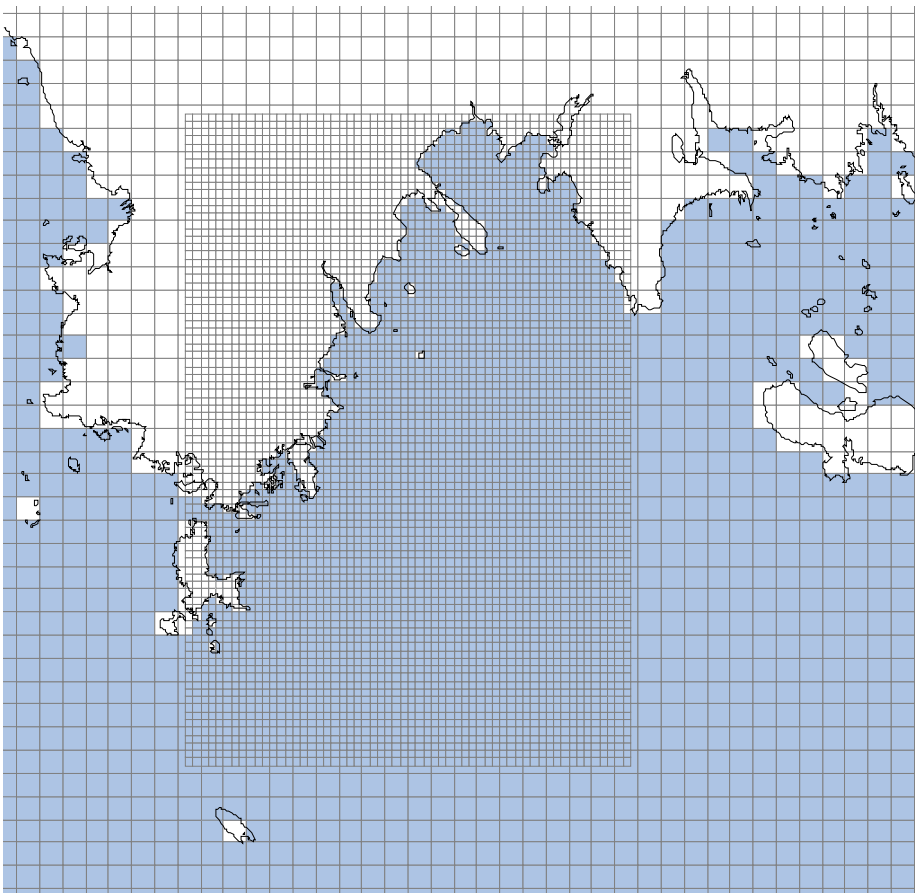
Malliyhtälöt esittävät, kuinka hyvin pieni laatikollinen nestettä käyttäytyy. Jotta yhtälöitä voitaisiin soveltaa käytännön ongelmiin, ne on kirjoitettava muotoon, jossa niiden ratkaiseminen tietokoneella on mahdollista. Tätä varten laaditaan mallihila, jossa yhtälöt ratkaistaan sopivaa numeerista menetelmää käyttäen.

Mallihila on numeerista laskentaa varten laadittu kuvaus mallialueesta, jossa alue jaetaan joukoksi esimerkiksi neliskulmaisia hilakoppeja. Hilakoppien joukon tulee esittää mallialuetta mahdollisimman tarkasti, mutta luonnollisesti hilakoppien koko ja muoto määräävät, kuinka tarkasti alue voidaan kuvata. Mitä pienempiä hilakopit ovat, sitä tarkemmin alue voidaan esittää, mutta sitä enemmän hilakoppeja ja laskentakapasiteettia tarvitaan. Jokainen hilakoppi edustaa kattamaansa aluetta, eli hilakopin sisällä laskettavien suureiden oletetaan pysyvän samana laskenta-askelen ajan ja muuttuvan laskenta-askelesta toiseen malliyhtälöiden määräämällä tavalla. Kehittyneemmissä laskentamenetelmissä voidaan käyttää myös lineaarista tai neliöllistä interpolointia hilakoppien ja aika-askeleiden välillä. Mallihila laaditaan merikortin perusteella siten, että kussakin mallihilan kohdassa veden syvyys vastaa mahdollisimman hyvin todellista vesisyvyyttä hilakopin alueella.

Mallihila on malliyhtälöitä vastaavasti kolmedimensioinen, eli siinä on hilakoppeja molemmissa vaakasuunnissa ja syvyysuunnassa (ks. kuva 1). YVA Oy:n mallissa hila on tyypillisessä mallisovelluksessa sisäkkäinen, eli harvemman hilan sisällä on tiheämpi hila, jonka hila on tarkempi (ks. kuva 2). Tällä tavoin laskentaa voidaan tarkentaa laskennan kohdealueelle ja ottaa samalla myös huomioon suuremman alueen vaikutus tarkennettuun alueeseen.



Kuva 1. Yksinkertainen 3d-hila, syvemmällä olevat tasot on piirretty tummemmalla.



Kuva 2. Sisäkkäinen mallihila ylhäältä päin kuvattuna.

Kun mallihila on rakennettu, malliyhtälöt voidaan ratkaista hilassa. Laskentamalli on formuloitu siten, että kun jollakin ajanhetkellä t laskettavien suureiden arvot hilassa tunnetaan, niin malliyhtälöitä käyttämällä voidaan näistä arvoista ja tunnetuista reuna-arvoista laskea tilanne annetun aika-askeleen Δt päästä. Tuloksena on siten tunnettu tilanne hetkellä $t + \Delta t$.

Yhtälöiden numeeriseen ratkaisuun on olemassa useita menetelmiä. Yleisinä kriteereinä laskentamenetelmille ovat menetelmän teoreettinen tarkkuus, laskennan kesto, stabiilisuus ja konvergenssi. Yleisesti ottaen menetelmän tarkkuus ja laskennan kesto riippuvat toisistaan siten, että mitä tarkempi menetelmä, sen kauemmin laskenta kestää. Lisäksi tarkimman mahdollisimman menetelmän toteutus käytännön sovellukseen voi olla hyvinkin monimutkaista. Menetelmän valinta onkin aina kompromissi halutun tarkkuuden, laskennan nopeuden ja toteutuksen yksinkertaisuuden välillä. Viimeiset kaksi ominaisuutta, stabiilisuus ja konvergenssi, ovat välttämättömiä numeerisen menetelmän ominaisuuksia. Sta-

biilisuus tarkoittaa, että numeerinen menetelmä ei ala tuottaa ylimääräisiä heilahteluja ja ns. ”räjähdä” missään olosuhteissa. Konvergenssi puolestaan tarkoittaa, että menetelmä suppenee kohti tarkkaa ratkaisua, kun hilakokoa pienennetään.

YVA Oy:n mallissa malliyhtälöt ratkaistaan neliöhilassa pääasiassa implisiittisiä differenssimenetelmiä käyttäen. Yhtälöiden eri termit ratkaistaan hieman eri menetelmillä. Esimerkiksi lämpötilan ja suolaisuuden kulkeutuminen lasketaan TVD-superbee -algoritmilla, kun taas liikemäärän kulkeutumisen laskennassa käytetään yleensä yksinkertaisempaa upwind-menetelmää. Menetelmät on pyritty valitsemaan siten, että sovellukseen riittävä tarkkuus saavutetaan käytettävissä olevalla laskenta-ajalla ja -kapasiteetilla. Tarkempi kuvaus laskentamenetelmistä löytyy lähteestä (Koponen et al. 2008).

2.5. Avoimet reunat

Mallihilassa on varsinkin rannikkosovelluksissa usein avoimia reunoja, eli mallihila on katkaistu jostakin kohti vesialuetta. Tällöin hilaan muodostuu avoin reuna, jolle tarvitaan lähtötietoina vähintään vedenkorkeus, lämpötila- ja suolaisuusarvot. Tyypillinen katkaisukohta on kapea salmi tai jokin kohta, josta on saatavilla tiheällä aikavälillä suoritettuja mittauksia. Reuna-alueiden arvot ovat harvoin tarkasti tiedossa, joten ne aiheuttavat tyypillisesti virheitä mallilaskentaan. Pääsääntö on kuitenkin se, että mitä kauempana mallin reuna on mallin kohdealueesta, sitä vähemmän reunan aiheuttama virhevaikutus näkyy mallin kohdealueella.

2.6. Jäämalli

Jäälaskenta on toteutettu Los Alamos'in laboratorion Community Ice Model (CICE) -mallia mukaellen (Hunke et al. 2008). Kyseinen malli on tarkennettu vielä YVA Oy:n mallin kanssa käytettäväksi Itämeren olosuhteisiin. Tämä on tehty säätämällä mallin parametrit niin, että jäälaskenta antaa kullekin sovellusalueelle mittauksia vastaavia jäänpaksuusarvoja. Mallista on jätetty pois jään kulkeutuminen ja deformaatio. Toisin sanoen malli laskee paikallaan pysyvän jään muodostumista ja sulamista.

Jään laskennassa otetaan huomioon tuleva ja lähtevä säteily, lämmönvaihto ilmakehän kanssa, lämmön siirtyminen pinnan ja alempien vesikerrosten välillä, haihdunnan aiheuttama lämmönhukka sekä jään muodostuminen ja sulaminen. Lisäksi jään pinnalla olevan lumen vaikutus on mukana laskennassa.

2.7. Staattinen ja dynaaminen laskentatapa

Virtausmalleja voidaan käyttää laskemaan stabiileja tilanteita, joissa mallin reuna-alueiden virtaamat ja muut olosuhdetiedot pidetään vakiona. Tällä tavalla pyritään kuvaamaan esimerkiksi keskimääräistä virtaustilannetta, valitsemalla olosuhdetiedoiksi keskimääräinen tuuli ja keskimääräiset reunavirtaamat. Stabiilien tilanteiden laskennan etuna on kohtuullisen yksinkertainen laskenta ja useisiin sovelluksiin riittävä tarkkuus. Verrattaessa mittauksia ja stabiilin laskennan tuloksia keskenään, on aina otettava huomioon, että todellinen virtaustilanne on harvoin tai ei milloinkaan stabiileja olosuhteita vastaava.

Virtausmalleja voidaan käyttää myös dynaamiseen laskentaan, jolloin mallilla pyritään simuloimaan jonkin aikaisemman tai tulevan aikajakson virtauksia mahdollisimman tarkasti. Dynaaminen laskenta vaatii lähtötiedoikseen mallialueen lähtötilanteen, mahdollisimman edustavat meteorologiset havainnot tai meteorologisen ennusteen sekä tiedot tai ennusteen mallin reuna-alueiden vedenkorkeuksista ja lämpötiloista valitulta laskentajaksolta. Etuna dynaamisessa laskennassa on se, että mallin tuloksia voidaan verrata suoraan merialueella suoritettuihin mittauksiin (sikäli kun niitä on saatavilla), jolloin mallin laskennan tarkkuudesta saadaan kohtuullisen hyvä kuva. Hankaluutena on mm. dynaamisen laskennan vaatima pitkäaikainen laskenta-aika stabiilien tilanteiden laskentaan verrattuna, mallin tuottaman datamäärän käsittely ja dynaamisen laskennan asettamat staattisten tilanteiden laskentaa tarkemmat vaatimukset mallin stabiilisuudelle.

3. Mallisovellukset

Fennovoiman voimalalle on suunniteltu kolmea vaihtoehtoista sijoituspaikkaa; Simo, Pyhäjoki tai Ruotsinpyhtää. Kullekin sijoituspaikalle laadittiin oma mallisovelluksensa. Sovelluksissa käytettiin yhteistä mallikonfiguraatiota, mallihilan määrittysperusteita, sekä reuna-arvojen määrittelyä. Tässä luvussa on esitetty sovelluksille yhteiset piirteet, seuraavissa luvuissa 4–6 sovellusten paikkakohtaiset tiedot.

3.1. Laskentamenetelmät ja parametrit

Mallisovellusten laskenta suoritettiin YVA Oy:n 3D-virtausmallilla (Koponen et al. 2008). Sovelluksissa käytettiin luvussa kaksi kuvattua mallikonfiguraatiota, jonka olennaiset piirteet ovat:

- Laskennassa käytetään epälineaarisia kolmedimensioisia virtausyhtälöitä.
- Lämpötilan ja suolaisuuden tiheysvaikutukset ovat mukana virtauslaskennassa.
- Vertikaalisuuntaisen turbulenssin laskennassa käytetään k-e turbulenssimallia.
- Vaakasuuntainen turbulenssi lasketaan Smagorinskyn mallilla.
- Veden pintakerroksen lämpötilatasapaino lasketaan tulevan ja lähtevän säteilyn, haihdunnan ja lämmön johtumisen perusteella jokaiselle pintakerroksen hilakopille erikseen.
- Laskenta suoritettiin dynaamisena laskentana vuoden 2003 kesäjakson ja talven 2002–2003 olosuhdetietoja käyttäen.
- Vedenkorkeuden vaihtelu mallin reunalla laskettiin koko Itämeren mallilla.

Valittuja laskentamenetelmiä käyttämällä on pyritty mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavaan virtausten kuvaamiseen nykytason mallitietämyksen ja laskentatehon asettamissa rajoissa.

3.2. Mallihilat

Sovellusten mallihilat konstruointiin digitoidusta kartta-aineistosta. Lähtöaineisto sisälsi syvyyskäyriä, syvyyspisteitä ja rantaviivoja vektorimuodossa. Seuraavat kartta-aineistot olivat käytössä:

- ETOPO2v2, Itämeren alueen syvyystiedot 2 minuutin tarkkuudella (ETOPO2v2, 2006).
- Merenkulkulaitoksen digitaalinen kartta-aineisto kultakin sovellusalueelta (Merenkulkulaitos, 2008), jota käytettiin kohdealueen ja sen lähialueen (noin 40x40 km alue) syvyyksien määrittämiseen.
- Jäähdytysveden otto- ja poistoaukkojen järjestelytiedot.

Kartta-aineisto yhdistettiin yhdelle karttapohjalle, josta sitten muodostettiin syvyysmalli, eli valitulla rasterikoolla oleva syvyysrasteri. Rasteripisteille arvioitiin syvyysarvot lähialueen syvyystiedoista käyttämällä YVA Oy:ssä kehitettyä interpolointialgoritmia. Varsinainen mallihila konstruointiin syvyysmallin perusteella laskemalla keskiarvo hilakopin sisältämistä syvyysmallipisteistä.

Rannikkoalueen mallintamiseen käytettiin alueellisesti tarkennettua hilaa, jossa on useita sisäkkäisiä tasoja. Kohdealueet on pyritty mallintamaan tutkimuksen tavoitteisiin nähden riittävällä tarkkuudella. Karkeampia hiloja käytetään pääasiassa määrittämään kohdealueen hilalle reuna-arvoja.

Kaikissa mallisovelluksissa voimalan lähialue mallinnettiin 80 metrin hilakoolla. Tarkin alue ulottui vähintään 5 kilometrin etäisyydelle suunnitellusta jäädäytysvesien purkupaikasta joka suuntaan. Mallihilan uloin taso ulottui Simon ja Pyhäjoen sovelluksissa Perämeren pohjukasta Merenkurkkuun ja Ruotsinpyhtään sovelluksessa Pietarista Hankoniemeen, hilakoolla 2160 metriä. Kohdealueen ja uloimman alueen väliin tarvitaan lisäksi kaksi hilatasoa, joiden hilakoot olivat 240 metriä ja 720 metriä. Syvyys-suunnassa hila jaettiin kaikissa sovelluksissa 17 syvyystasoon, joiden koko vaihteli pinnan lähellä käytetystä yhdestä metristä, avomerensyvänteissä käytettyyn kahteenkymmeneen metriin. Laskentahilan tarkat parametrit on esitetty kunkin sovelluksen kohdalta luvuissa 4–6. Sovellusten virtaushiloissa oli vaakasuunnassa noin 30 000 laskentapistettä ja korkeussuunta mukaan luettuna noin 300 000 aktiivista hilakoppia.

3.3. Otto- ja purkupaikat

Ydinvoimalaitoksen suorajäähdetykseen tarvittavan jäähdytysveden otto- ja purkuaukkojen leveytenä käytettiin laskennoissa mallin tarkimman hilan resoluutiota, joka oli 80 metriä. Tästä johtuen otto- ja purkuaukkojen kohdalla virtaamien nopeudet eivät vastaa täysin todellisuutta, vaan jakautuvat 80 metrin levyiseen hilakoppiin. Otto- ja purkuaukkojen tarkempi kuvaus vaatisi mallihilan tarkentamista. Käytännössä aukkojen leveydet ovat todennäköisesti muutamia kymmeniä metrejä tarvittavasta jäähdytysvesimäärästä riippuen.

Jäähdytysveden purkupisteen lähiympäristöä on joissakin tapauksissa jouduttu järjestelemään syvyys-tiedoista poikkeavalla tavalla. Laskentamallissa purkupisteen ympärillä on oltava riittävästi maa- aluetta, sillä muuten lämpötila-asetukset vuotavat ympäristön vesialueelle. Lisäksi virtausta ohjaamaan tarvitaan joissakin purkupaikkavaihtoehdoissa ylimääräisiä maakoppeja poistopisteen lähistölle, ohjaamaan laskettu virtaama paremmin suunniteltuun poistosuuntaan.

Hilaresoluutiosta johtuen, mallissa poistosuihkun nopeus on pienempi ja ala suurempi kuin todellisuudessa. Sekä mallissa että todellisuudessa, poistosuihku hajoaa ja hidastuu. Mitä kauemmas poistopisteestä siirrytään, sitä vähemmän poistosuihkun lähtönopeus ja leveys vaikuttavat tuloksiin. Poistosuihkun nopeus on säädetty pohjan syvyyttä muuttamalla mallisovelluksissa niin, että suihkun lähtönopeus on noin 1 m/s.

3.4. Laskentajakson valinta

Mallin avoveden ajan laskentajaksona käytettiin aikaväliä 15.5.2003–15.9.2003. Kesäjakson valintaperusteena oli, että kyseisenä kesänä saavutettiin korkeimmat veden pintalämpötilat aikajakson 2000–2006 ajalta. Lämpimimmän kesän valinnalla pyrittiin saamaan selville yläarvio lämpöpäästön vaikutuksille.

Talvilaskentojen aikajakso oli 1.11.2002–1.2.2003. Jäätalvi 2002/2003 oli Merentutkimuslaitoksen jääpalvelun mukaan keskimääräinen, jään pinta-aloja tarkasteltaessa. Poikkeuksellista oli talven keskimääräistä aikaisempi alku, keskimääräistä pidempi jääpeitteinen kausi (Kallionsaari, 2003) ja keskimääräistä paksumpi jääpeite.

3.5. Avoimet reunat

Simon ja Pyhäjoen sovelluksissa mallialueella on avoin länsi- ja eteläreuna, joka sijaitsee Merenkurkun kohdalla. Ruotsinpyhtään sovelluksessa mallilla on avoin länsireuna, joka sijaitsee Hangon kohdalla.

Avoimien reunojen vedenkorkeudet on laskettu koko Itämeren 10 kilometrin tarkkuuden mallilla. Itämeren malli käyttää lähtötietoinaan NCEP Reanalysis II säätietoja (NCEP 2008). Itämeren mallilla on avoin itä-länsisuuntainen reuna Tanskan pohjoiskärjen kohdalta. Tällä reunalla vedenkorkeuden arvoina käytetään FRV:n (Danish Maritime Safety Administration, <http://frv.dk>) Skagenin asemalla mittaamia vedenkorkeuksia.

Simon ja Pyhäjoen mallisovellusten reunat Merenkurkussa on kuvattu viidellä Itämeren mallin pisteellä, Ruotsinpyhtään sovelluksen reuna Hangosta etelään neljällä Itämeren mallin pisteellä. Reunapistien sijainnit on esitetty kuvassa 3.

Avoimien reunojen lämpötilatiedot asetettiin koko reunalle vaakasuunnassa samaksi. Lämpötila laskettiin lähimmän NCEP Reanalysis -säätietopisteen ilman lämpötilatiedoista seuraavalla menetelmällä:

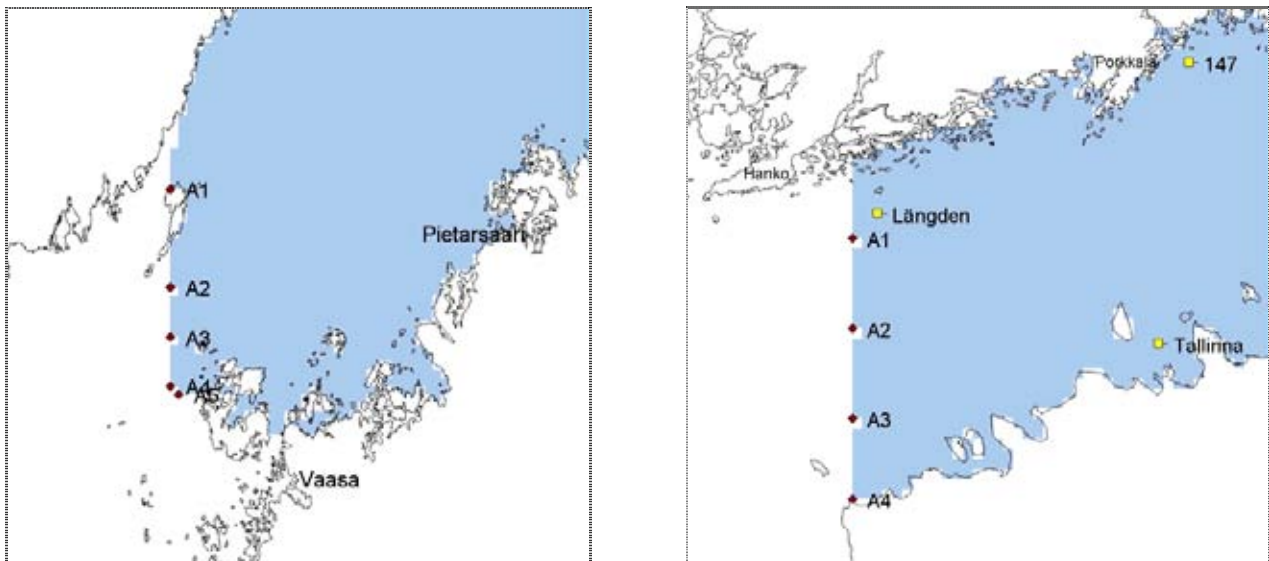
$$T_{ws}(d)=0.99 T_{ws}(d-1)+0.01 T_a(d),$$

$T_{ws}(i)$ = päivän i veden pintalämpötila,
 $T_a(i)$ = päivän i ilman lämpötila,
 d = päivän numero.

Lämpötilat reunan syvemmissä kerroksissa laskettiin arvioidusta pintalämpötilasta seuraavasti:

$T = T_{ws}$ kun syvyys on alle 9 m
 $T = 0.8 T_{ws}$ kun syvyys on 9–15 m,
 $T = 0.6 T_{ws}$ kun syvyys on 15–25 m.

Suolaisuusarvot asetettiin mittausten perusteella koko reunalle alueen keskisuolaisuusarvoja vastaaviksi ja vaakasuunnassa vakioiksi. Suolaisuusarvot on kuvattu tarkemmin sovelluskohtaisissa alkuarvoissa.



□ rantaviiva ■ mallihilan lue ◆ reunapiste ■ vedenlaadun mittauspiste

Kuva 3. Avoimen reunan vedenkorkeuspisteet Merenkurkussa (oikealla) ja Suomenlahdella (vasemmalla). Pisteiden vedenkorkeudet on laskettu Itämeren mallilla.

3.6. Sää tiedot

Olosuhdetietoina käytettiin voimalaitospaikkojen lähialueelta valitulta Ilmatieteen säähavaintoasemalta mitattuja tuuli-, lämpötila- ja kosteustietoja. Sää tiedot on dokumentoitu tarkemmin sovelluskohtaisesti luvuissa 4–6. Laajemman merialueen sää tiedot saatiin globaalista NCEP Reanalysis II -sää datasta (NCEP 2008).

3.7. Jokivirtaamat

Jokivirtaamat on dokumentoitu luvuissa 4–6 sovelluskohtaisesti.

3.8. Fennovoiman voimalaitosyksiköt

Skenaariolaskennoissa voimalaitosyksiköt mallinnettiin sijoittamalla mallialueelle voimalaitoksen otto- ja purkupaikat ja määrittelemällä näihin pisteisiin otto- ja poistovirtaamat. Poistuvan jäähdytysveden lämpötila asetettiin lisäämällä simuloituun ottoveden lämpötilaan voimalaitoksen lämmitysvaikutus. Voimalaitosvaihtoehtojen jäädytysvesivirtaamat ja käytetyt lämmönnotot on esitetty taulukossa 1. Arvot pidettiin koko laskentajakson ajan vakioina. Poistoveden suolaisuus asetettiin samaksi, kuin ottopisteen suolaisuus.

Taulukko 1. Voimalavaihtoehtojen jäädytysvesivirtaamat.

Laitosvaihtoehto	1	2
Lämpöteho mereen (MW)	1670	2740
Jäähd. veden virtaus (m ³ /s)	61	85
Lämpötilan nousu (°C)	12	12

3.9. Mallitulosten vertailut mittauksiin

Vertailu lämpötilamittauksiin

Mallisovellusten varmistamiseksi mallin laskemia ns. nollavaihtoehdon lämpötiloja verrattiin mitattuihin lämpötiloihin. Mittaustiedot poimittiin Suomen ympäristökeskuksen HERTTA-aineistosta. Lämpötila on mitattu vedenlaadun seurannan pisteistä tiheimmillään noin kerran kuukaudessa, tyypillisesti kuitenkin harvemmin. Mittausvertailut on esitetty sovelluskohtaisesti luvuissa 4–6. Keskimäärin malli on laskenut veden pintalämpötilat noin 1.5 asteen tarkkuudella, mutta poikkeavia pisteitä löytyy. Perämeren lämpötilat saatiin laskettua jonkin verran tarkemmin kuin Suomenlahden lämpötilat.

Vertailu havaittuihin jäätilanteisiin

Jäälaskennan vertailutietoina käytettiin Merentutkimuslaitoksen jääpalvelun jääkarttoja jäätalvelta 2002/2003 (Jääpalvelu, 2008). Jääkartat eivät ole kovin tarkkoja, joten vertailua voi pitää lähinnä suunta-antavana. Jäälaskennassa malli simuloi lämmönvaihtoa, jään muodostumista ja sulamista veden pintakerroksessa, mutta ei ota huomioon jäiden kulkeutumista tai ahtojäitä. Tästä johtuen alueilla ja aikajaksoina, joissa jään liikkeet ovat merkitseviä (ts. avomerellä), malli ei pysty toistamaan jäätilannetta todenmukaisesti.

4. Simon mallisovellus

4.1. Mallihila

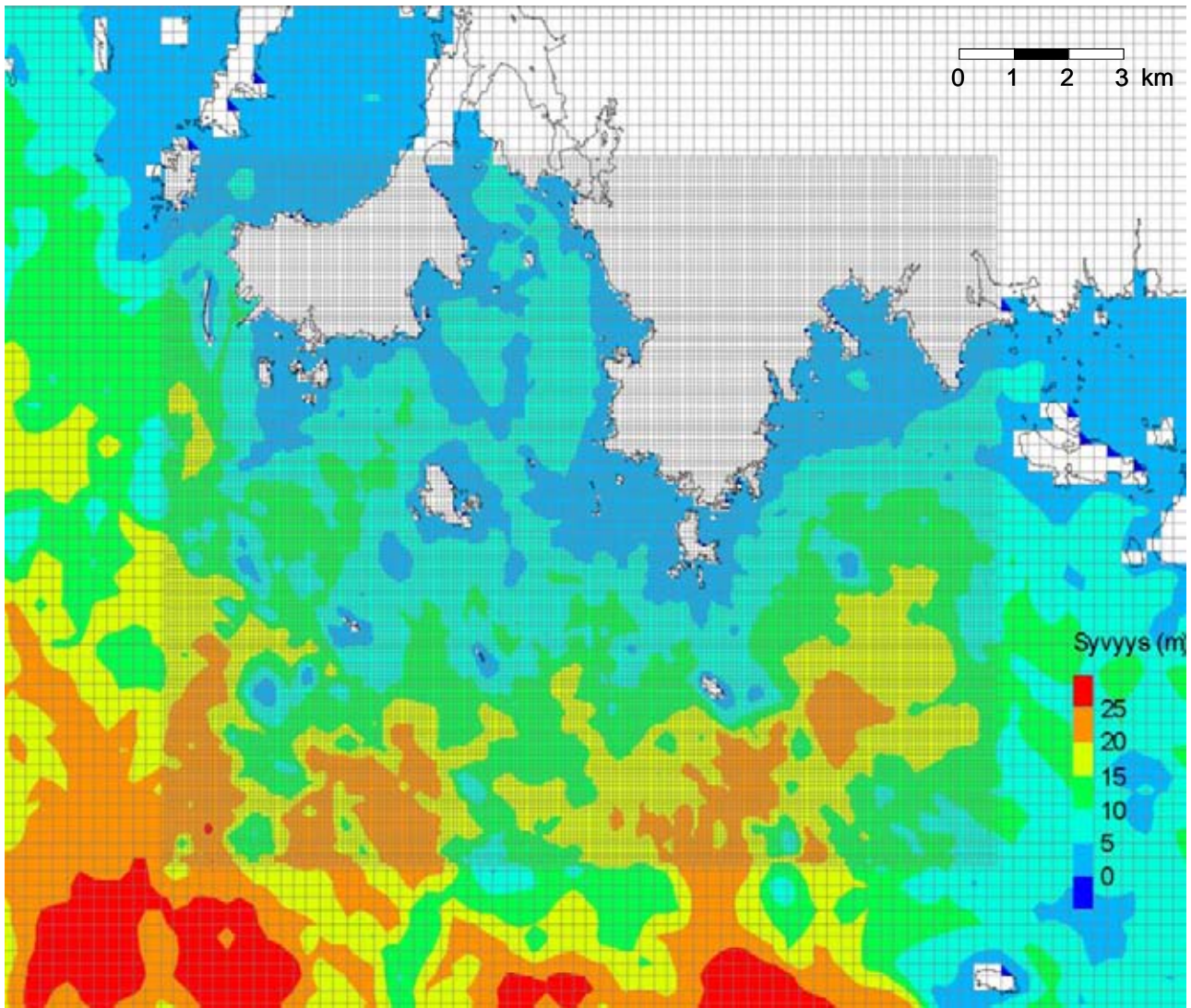
Simon mallisovelluksen hilan parametrit on esitetty taulukoissa 2 ja 3, sekä mallihila syvyystietoineen kuvissa 4 ja 5.

Taulukko 2. Sisäkkäiset hilojen parametrit.

Taso nro	Hilakoppeja vaakasuunta	Hilakoppeja pystysuunta	Hilaruudun koko (m)	Koko, vaaka-suunta (km)	Koko, pystysuunta (km)
1	105	137	2160	229	298
2	78	66	720	57	48
3	117	132	240	28	32
4	186	159	80	15	13

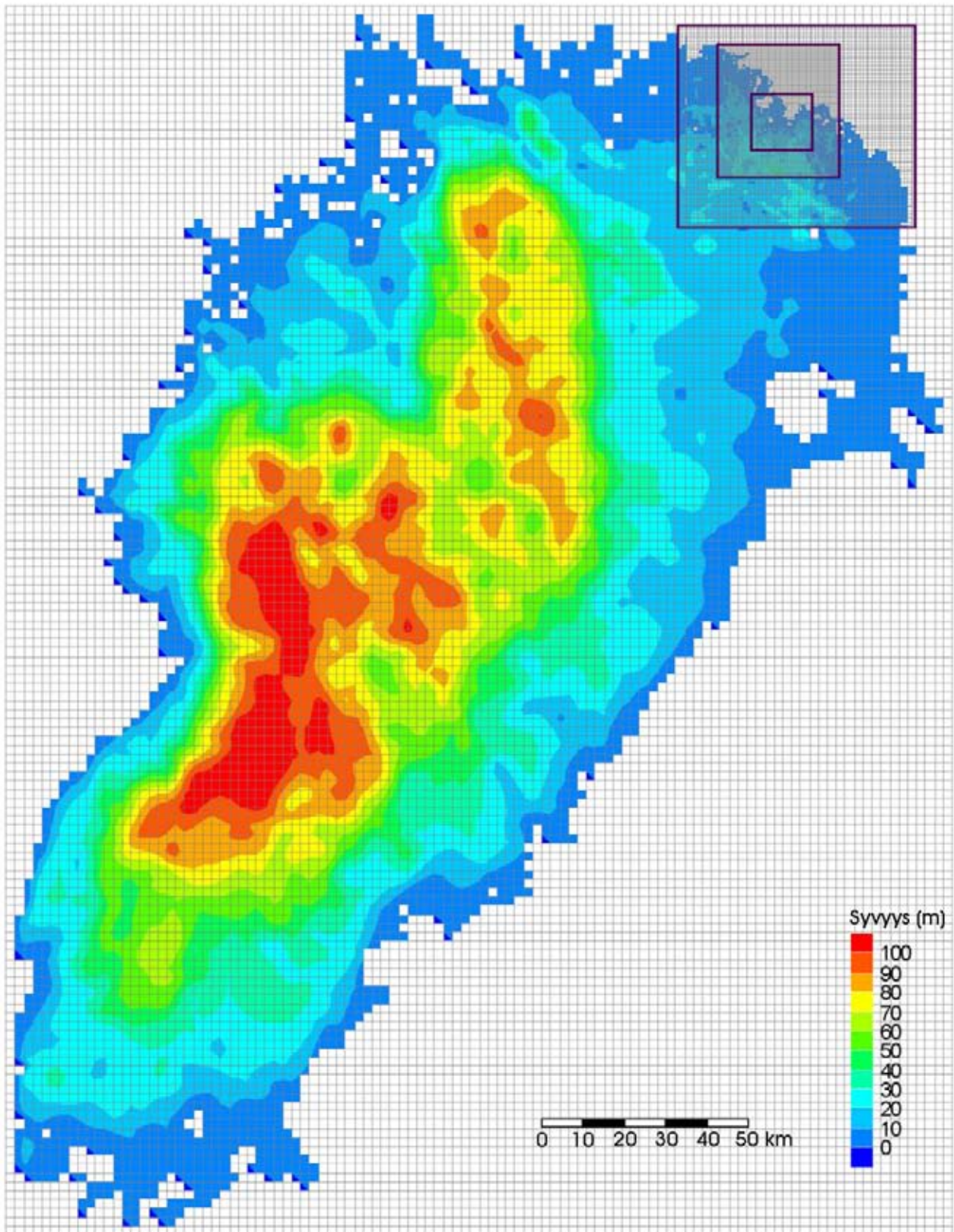
Taulukko 3. Hilakoppien syvyystasot.

Taso	Syvyys (m)	Taso	Syvyys (m)
1	0 – 1	11	20 – 25
2	1 – 2	12	25 – 30
3	2 – 3	13	30 – 40
4	3 – 4	14	40 – 50
5	4 – 5	15	50 – 70
6	5 – 7	16	70 – 90
7	7 – 9	17	90 – 110
8	9 – 11		
9	11 – 15		
10	15 – 20		

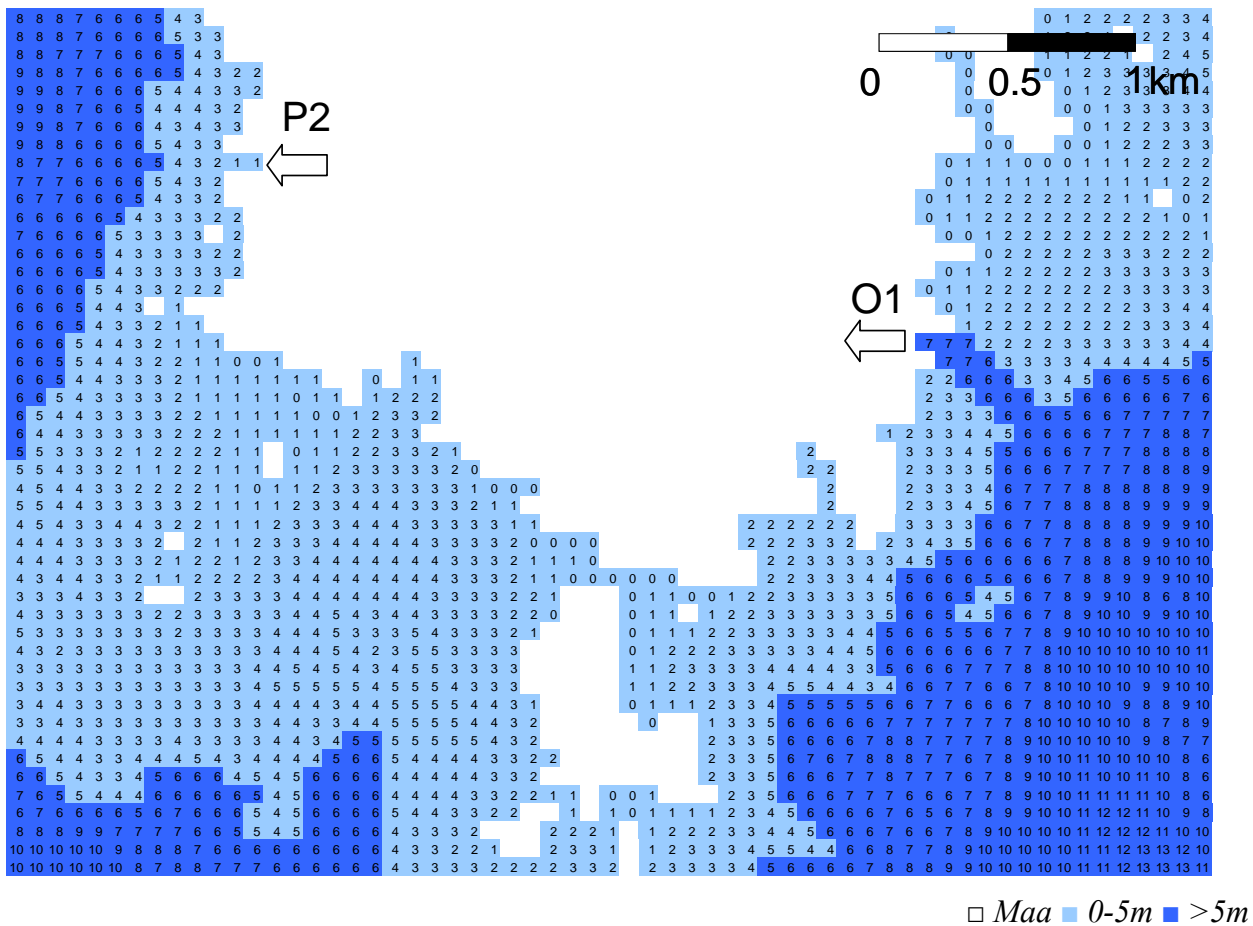


Kuva 4. Simon mallisovelluksen kohdealue, hilakoppien koko karkeammassa hilassa 240 m ja tarkemmassa 80 m.

Simossa vaihtoehtoisia jäähdytysveden ottopaikkoja oli kolme ja poistopaikkoja kaksi. Otot O1 ja O2 konstruointiin malliin siten, että rannassa olevalle ottokanavalle kaivettiin 6 metriä syvä kanava alueelle, jossa syvyys oli yli 6 metriä. Pohjalla olevan oton O3 ympäriltä, pohjan syvyys tasoitettiin vakioksi. Molempien poistojen P1 ja P2 kohdalla poiston edustalle kaivettiin 2 metriä syvä poistosuihkun suuntainen kanava, mikäli syvyys oli tätä pienempi. Mallihilat otolle O1 ja poistolle P2 on esitetty kuvassa 6.



Kuva 5. Simon mallisovelluksen mallihila, jossa sisäkkäistyksen on rajattu tummalla värillä alueen yläreunassa. Hilakoppien koot laajimmasta pienimpään ovat 2160 m, 720 m, 240 m ja 80 m.



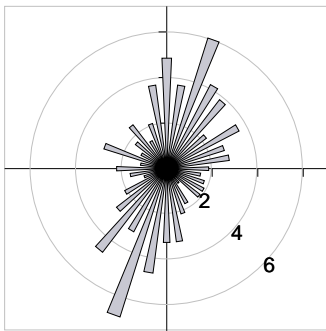
Kuva 6. Simon mallisovelluksen ottopaikan O1 ja poistopaikan P2 läheisen merialueen syvyudet.

4.2. Säätiedot, Kemi I

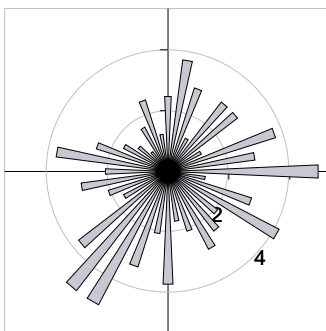
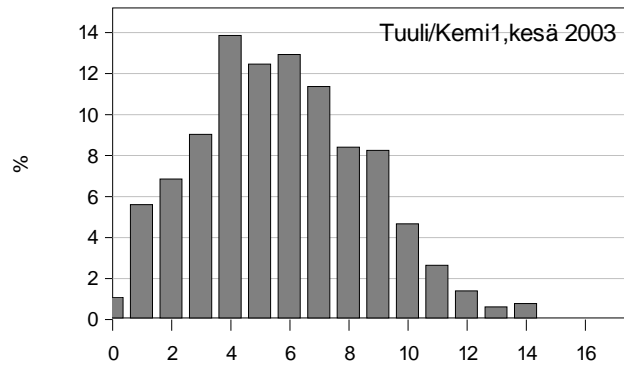
Simon sovelluksessa kohdealueen säätiedot on valittu Kemi I -sääasemalta. Kohdealuetta lähempänä olisi ollut Kemi Ajos -sääasema, mutta Kemi I -aseman katsottiin edustavan paremmin merialueella vallitsevia tuulia ja soveltuvan tämän vuoksi paremmin mallinnuksen lähtötiedoiksi.

Kuvassa 7 on esitetty Kemi1-säähavaintoaseman tuulen suunta- ja nopeusjakaumat aikajaksolta 15.5.2003–15.9.2003. Havaintoasema sijaitsee Perämeren keskellä koordinaattipisteessä lat 65°23' lon 24°06'. Sijainti on noin 40 kilometriä Karsikonniemestä lounaaseen. Valitulla aikajaksolla aseman tuulennopeuden keskiarvo oli 6.0 m/s ja tyypillisin tuulen suunta 200° (6.8 % tuulista). Jaksolla oli jossakin määrin normaalia enemmän pohjoisen puoleisia tuulia, tuulen nopeuksien suhteen jakso oli keskimääräinen.

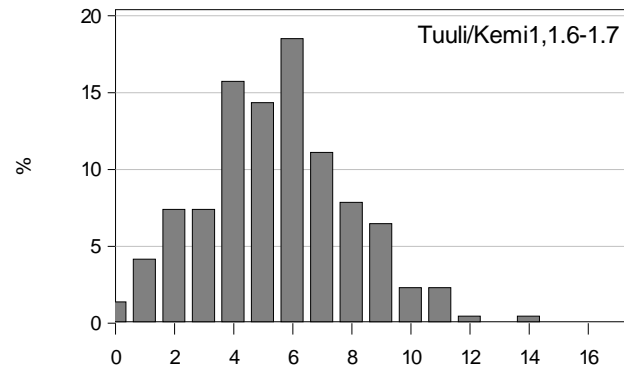
Ilman lämpötilan suhteen vuoden 2003 kesä oli normaalia lämpimämpi heinäkuun osalta, mutta muuten lähellä normaalia. Veden lämpötilan osalta heinäkuun loppu oli hyvin lämmin. Kemi1-sääaseman ja Ke13-vedenlaatupisteen lämpötilat on esitetty kuvissa 8 ja 9.



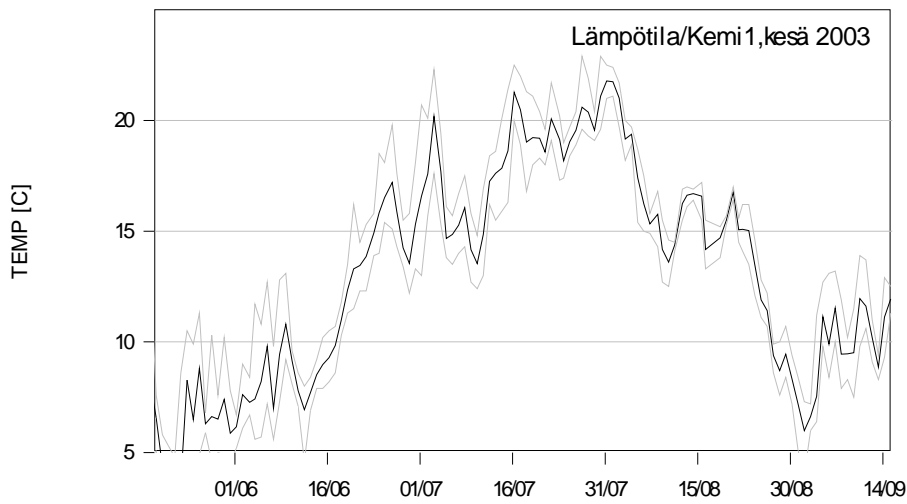
Kesä 2003 (15.5.2003–15.9.2003)



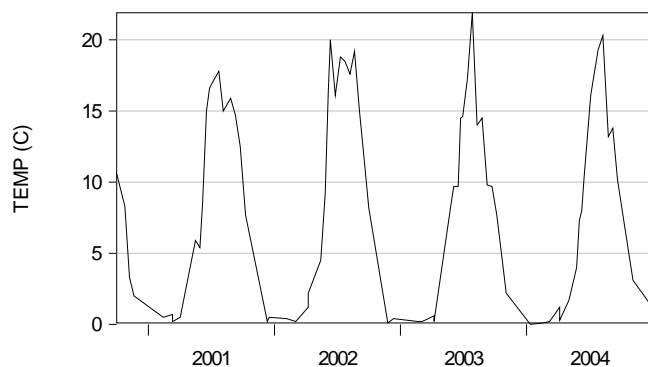
Kesäkuu 2003 (1.6.2003–1.7.2003)



Kuva 7. Tuulen suunta- ja nopeusjakaumat (%) sääasemalla Kemi 1.



Kuva 8. Ilman päivittäiset keski-, minimi- ja maksimilämpötilat jaksolla 15.5.–15.9.2003 Kemi1-sääasemalta laskettuna 3 tunnin välein tehdyistä havainnoista.



Kuva 9. Veden pintalämpötila mittauspisteestä Ke13 vuosilta 2001–2004.

4.3. Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat

Jokivirtaamia Simon mallisovellukseen asetettiin kuusi: Oulujoki, Simojoki, Kemijoki, Tornionjoki, Kalixjoki ja Luleåjoki. Suomen puolella olevien jokien virtaamat saatiin HERTTA-tietokannasta, Ruotsin joille käytettiin kuukausikeskiarvoja. Jokien lämpötilat arvioitiin parempien tietojen puuttuessa ilman lämpötiloista kohdan 3.5 mukaisesti. Jokivesien suolaisuus asetettiin nolllaksi.

4.4. Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot

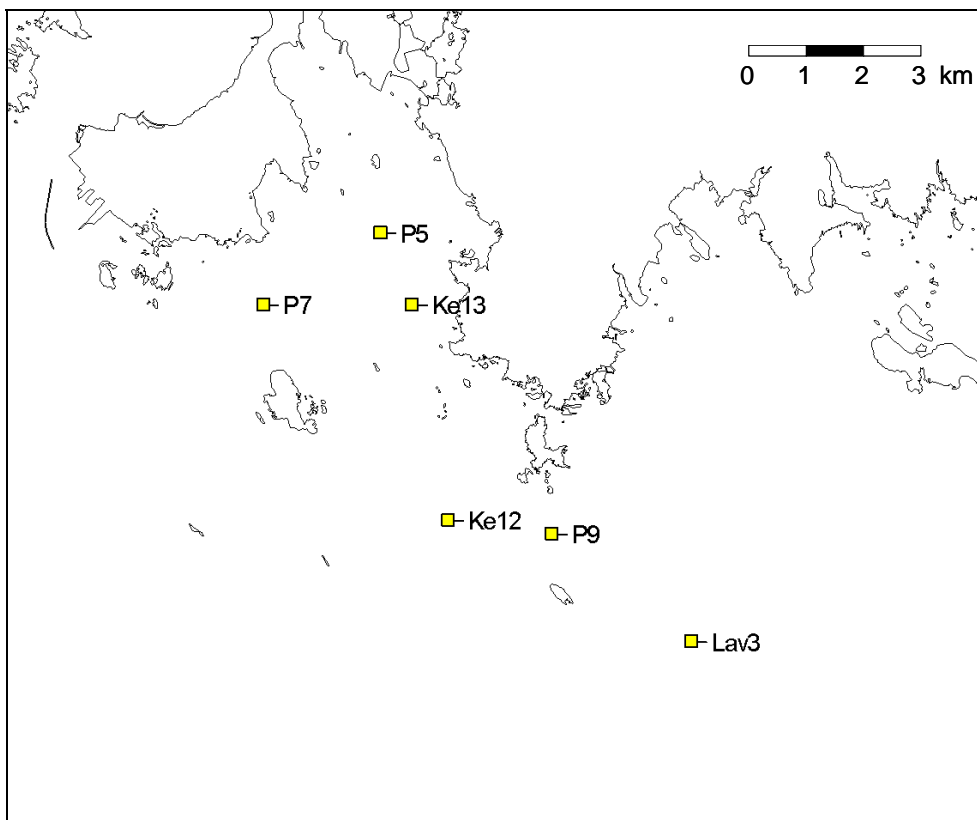
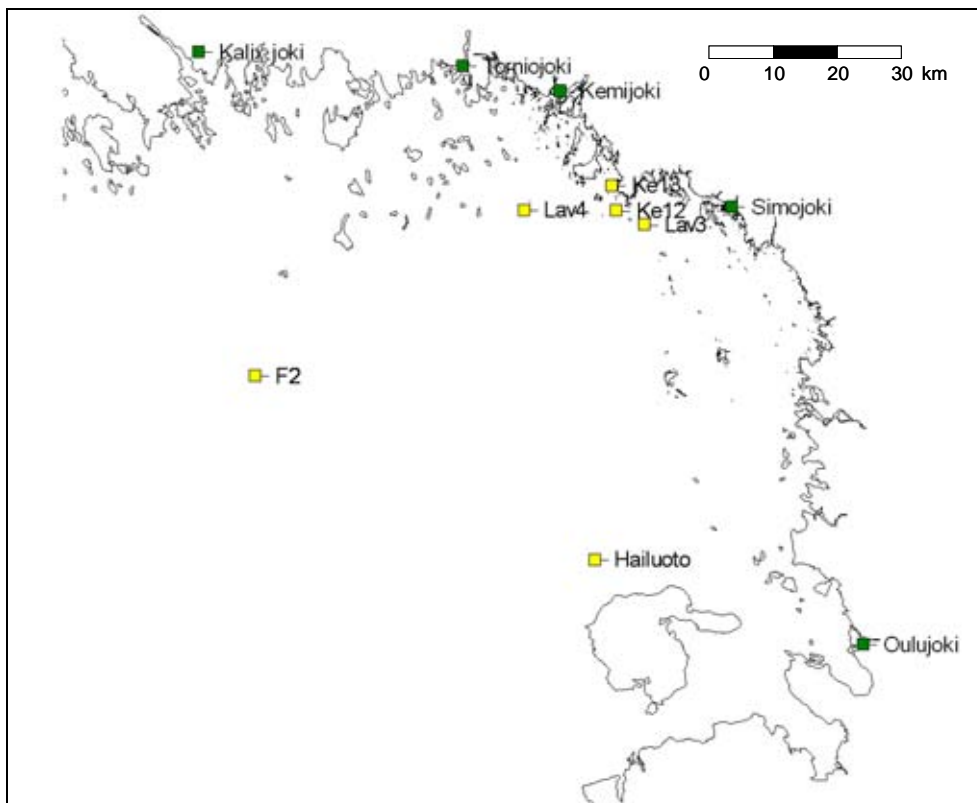
Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvoja asetettaessa hyödynnettiin Merentutkimuslaitoksen FIMR BMP -data-arkistosta saatuja Perämeren mittauspisteistä BO3 ja F2 mittaamia CTD-profiileja. Vuodelta 2003 mittauksia oli suoritettu 2.6., 23.8. ja 27.8. (Olsonen, 2007). Pisteiden BO3 ja F2 sijainti näkyy kuvassa 21.

Avoveden laskentajakso oli 15.5.–15.9.2003. Lämpötilan alkuarvoksi asetettiin yksi aste koko syvyydelle. Suolaisuusarvot asetettiin välille 1.5–4 PSU siten, että pohjalla oleva vesi oli suolaisinta.

Talvijakson 2002–2003 simuloinneissa laskentajakso oli 1.11.–1.2.2003. Veden lämpötilan lähtötilanne simuloinneissa oli vakiolämpötila 4 °C koko mallialueella.

4.5. Vertailu Perämeren lämpötilamittauksiin

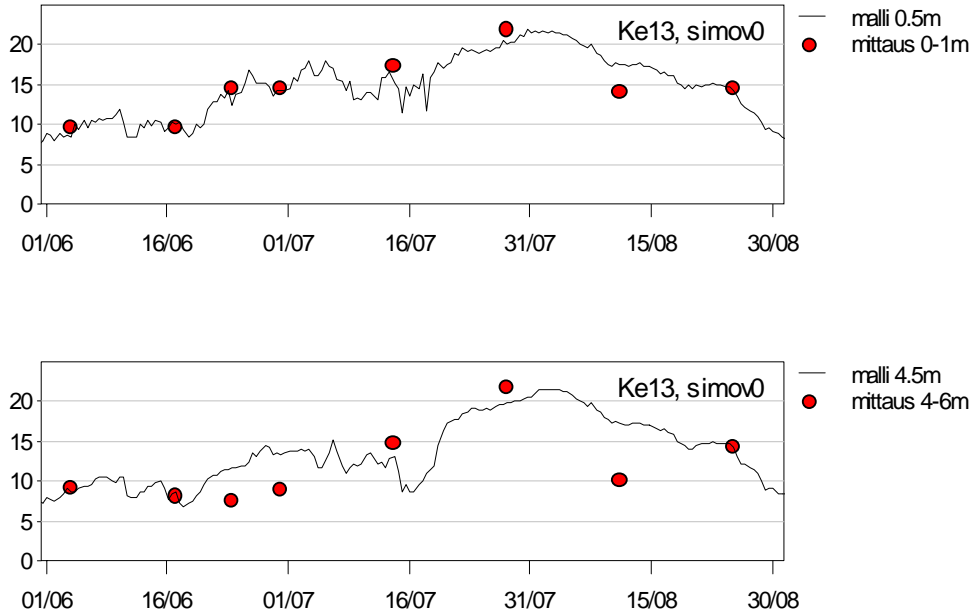
Laskettuja mallituloksia vertailtiin mitattuihin lämpötiloihin. Vertailut suoritettiin pääasiassa vuoden 2003 mittauksiin, jotka poimittiin Suomen Ympäristökeskuksen HERTTA-aineistosta. Hertta-aineiston data on mitattu vedenlaadun seurannan pisteistä tiheimmillään noin kerran kuukaudessa, mutta tyypillisesti harvemmin. Hertta-aineiston mittauspisteiden sijainti näkyy kuvassa 10.



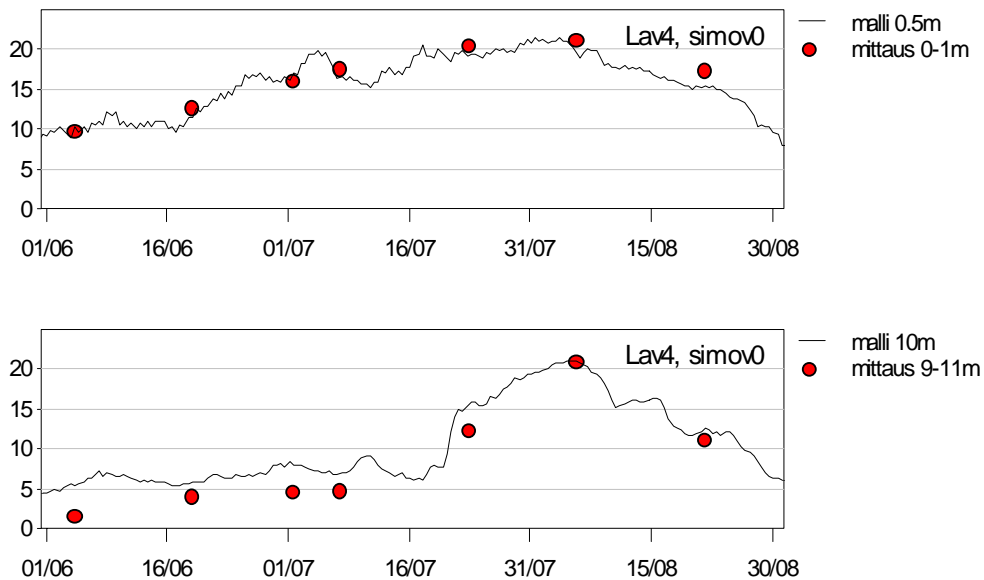
Kuva 10. Mittauspisteiden ja lähialueen aikasarjapisteiden (P^*) sijainti.

Vertailujakson laskenta aloitettiin 15.5.2003, jolloin saatiin kesäkuun alkuun paremmin todellisuutta vastaava veden lämpötilajakauma. Tunnuslukujen laskennassa ja aikasarjakuviissa on käytetty jaksoa 1.6.2003–1.9.2003.

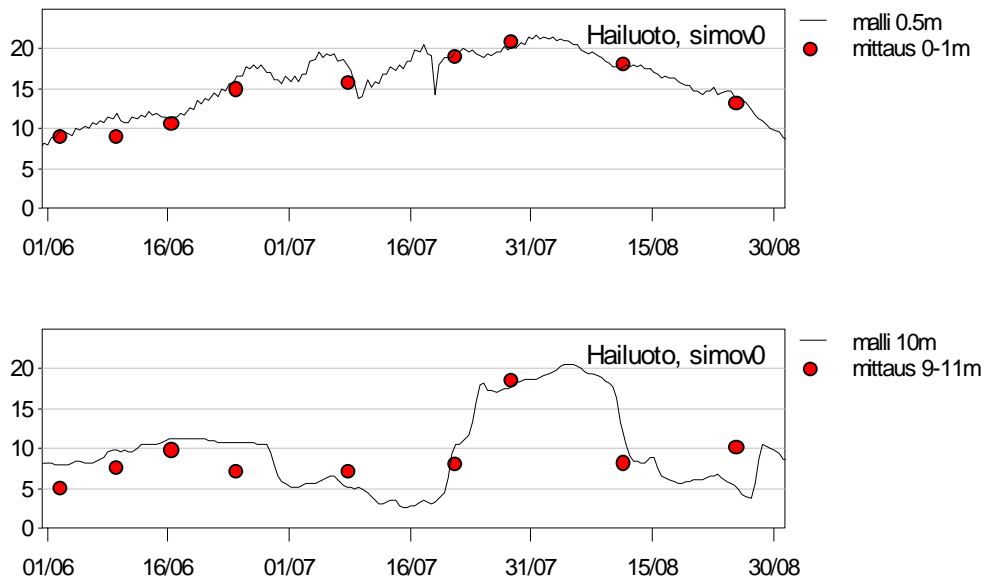
Vertailut HERTTA-tietokannan mittauspisteisiin on esitetty kuvissa 11–13 pisteistä Ke13, LAV4 ja Hailuoto. Vastaavat tilastolliset tunnusluvut on esitetty taulukossa 4. Yleisesti ottaen mittauspisteissä lasketut pintalämpötilat vastasivat havaintoja hyvin. Syvemmillä mallin laskema lämpötila ei aina täysin vastannut mitattuja arvoja, vaan malli yliarvioi lämpötilan keskimäärin noin 1.5 asteella. Pisteet LAV3 ja KE12 olivat myös mallialueella, mutta näissä pisteissä oli mittauksia käytetyllä laskentajaksolla kolme tai vähemmän.



Kuva 11. Piste Ke13, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot.



Kuva 12. Piste LAV4, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot.



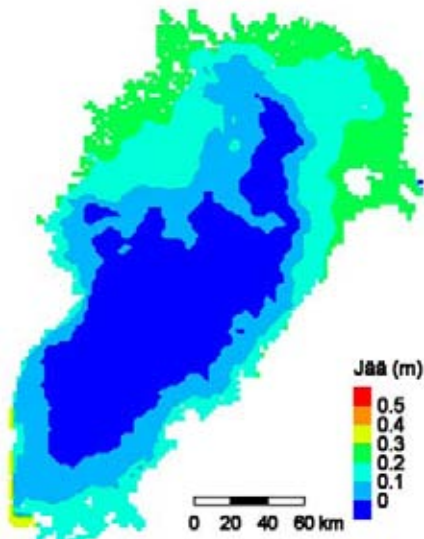
Kuva 13. Piste Hailuoto, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot.

Taulukko 4. Mallituloksen ja mittausarvon erotuksien keskiarvot (k.a) ja keskihajonnat (std.) mittauspisteissä kesäjakson 1.6.–1.9.2003 ajalta.

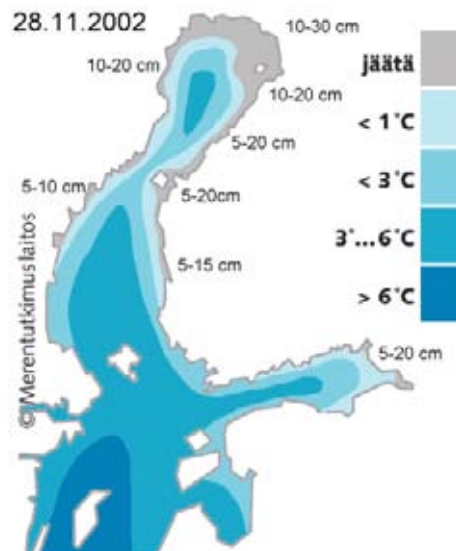
Piste	N	ka (°C)	std (°C)
KE13 pinta	8	-0.32	1.71
KE13 5 m	8	1.55	3.32
LAV4 pinta	7	-0.79	1.06
LAV4 10 m	7	2.29	1.40
Hailuoto pinta	9	0.95	1.12
Hailuoto 10 m	9	0.91	2.92
Pinta yhteensä	24	-0.07	
Pohja yhteensä	24	1.58	

4.6. Vertailu Perämeren jäätilanteeseen

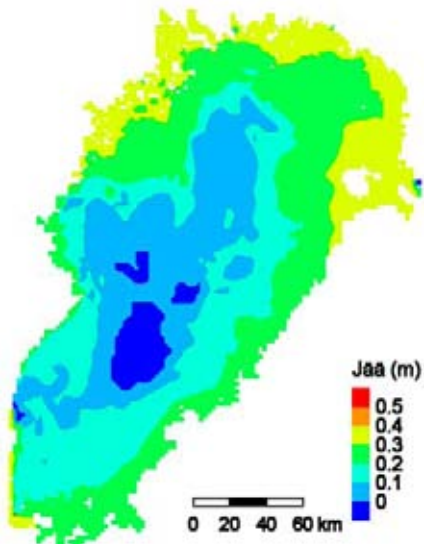
Simuloidut ja havaitut jäätilanteet on esitetty kuvassa 14. Mallilaskennan sopivuus jääkarttoihin on kohtuullisen hyvä. Jäätä muodostuu mallissa mahdollisesti jossakin määrin liian vähän. Tämä näkyy esim. 16.12. kuvassa; mallissa on vielä pieni avoin alue Perämeren keskiosissa, vaikka vertailukartan mukaan alue on jo jäätynyt umpeen.



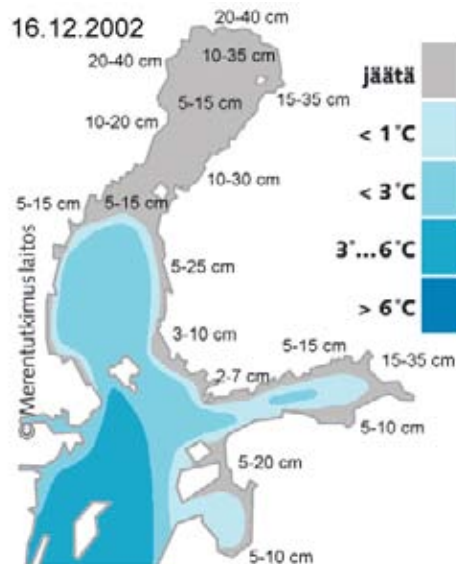
Laskettu jäättilanne 28.11.2002 12:00



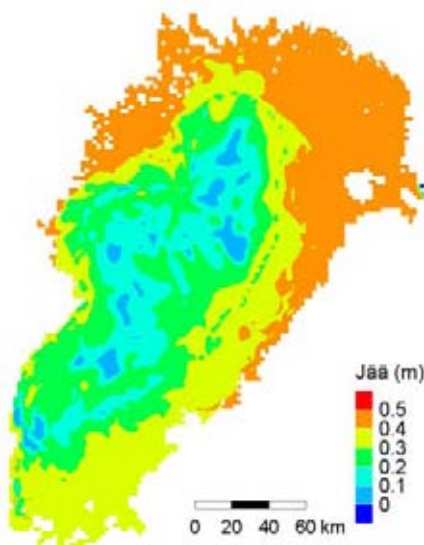
Havaittu jäättilanne 28.11.2002



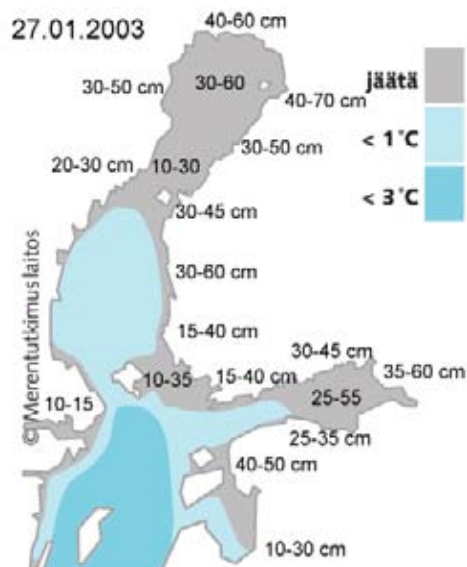
Laskettu jäättilanne 16.12.2002 12:00



Havaittu jäättilanne 16.12.2002



Laskettu jäättilanne 27.01.2003 12:00



Havaittu jäättilanne 27.01.2003

Kuva 14. Lasketut ja havaitut jäättilanteet talvella 2002/2003.

5. Pyhäjoen mallisovellus

5.1. Mallihila

Pyhäjoen mallisovelluksen hilan parametri on esitetty taulukoissa 5 ja 6, sekä mallihila syvyystietoineen kuvissa 15 ja 16.

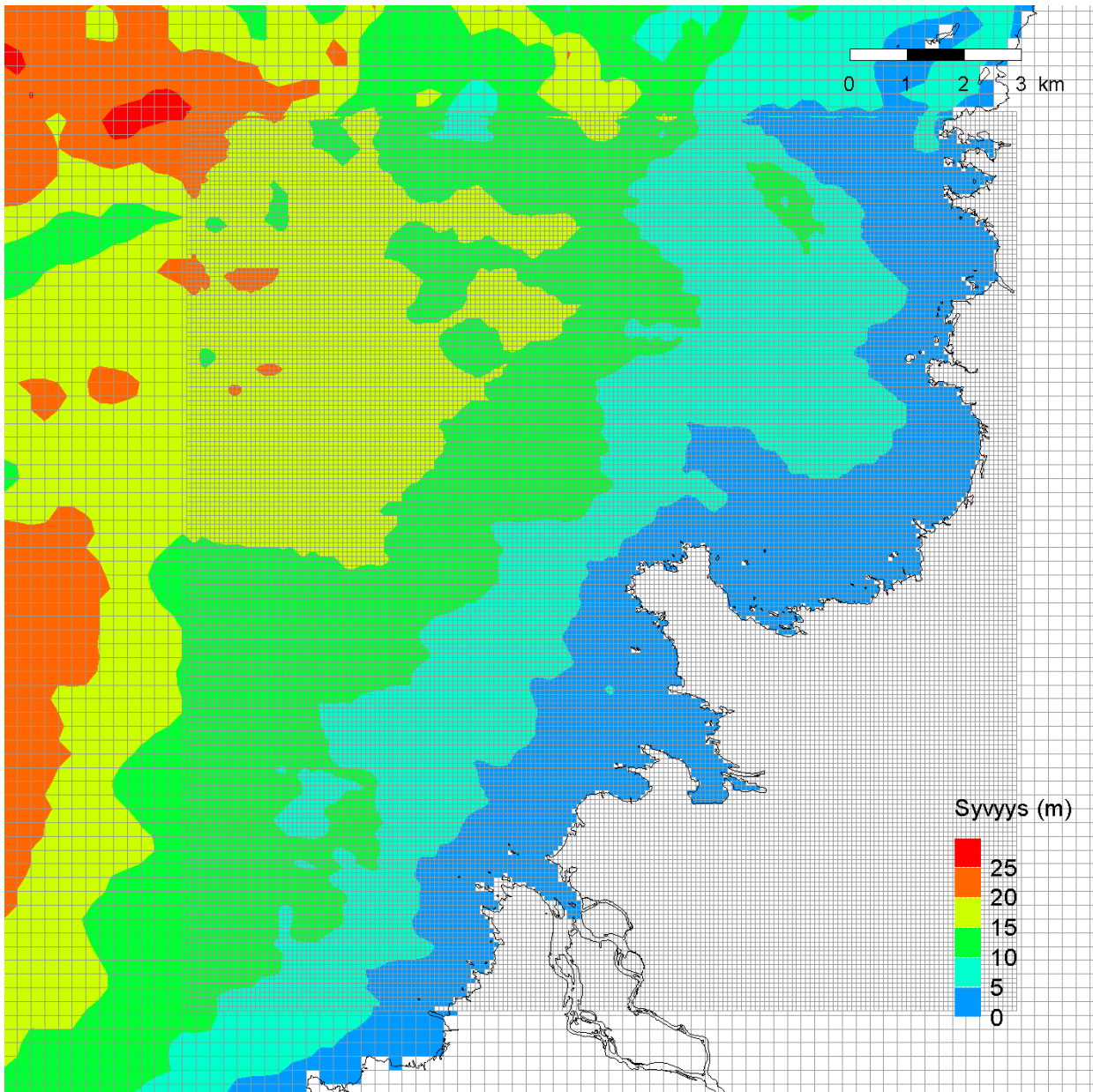
Taulukko 5. Sisäkkäiset hilojen parametrit.

Taso nro	Hilakoppeja vaakasuunta	Hilakoppeja pystysuunta	Hilaruudun koko (m)	Koko, vaakasuunta (km)	Koko, pystysuunta (km)
1	106	139	2160	229	300.2
2	58	85	720	41.8	61.2
3	106	139	240	25.4	33.4
4	181	196	80	14.5	15.7

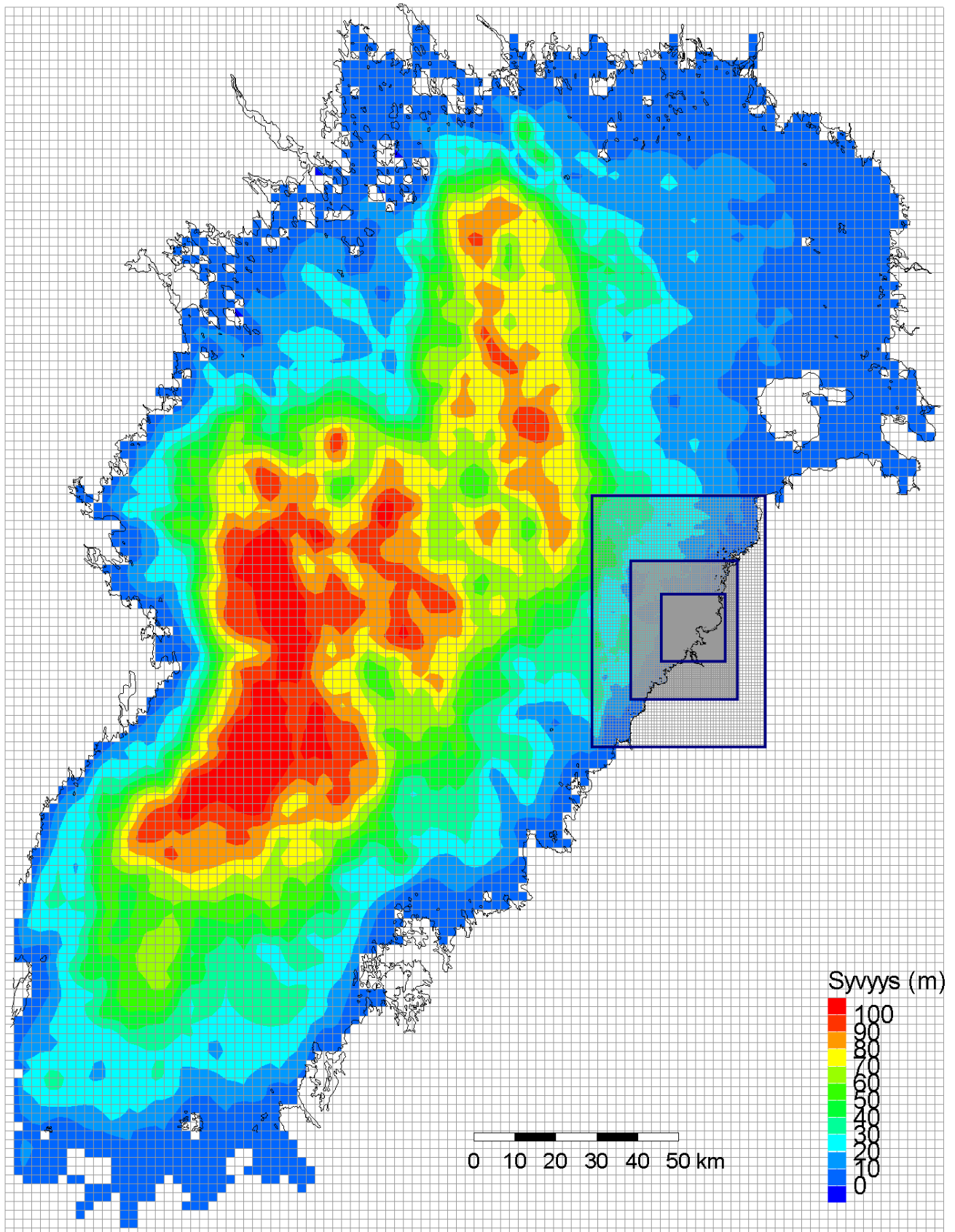
Taulukko 6. Hilakoppien syvyystasot.

Taso	Syvyys (m)	Taso	Syvyys (m)
1	0 – 1	11	20 – 25
2	1 – 2	12	25 – 30
3	2 – 3	13	30 – 40
4	3 – 4	14	40 – 50
5	4 – 5	15	50 – 70
6	5 – 7	16	70 – 90
7	7 – 9	17	90 – 110
8	9 – 11		
9	11 – 15		
10	15 – 20		

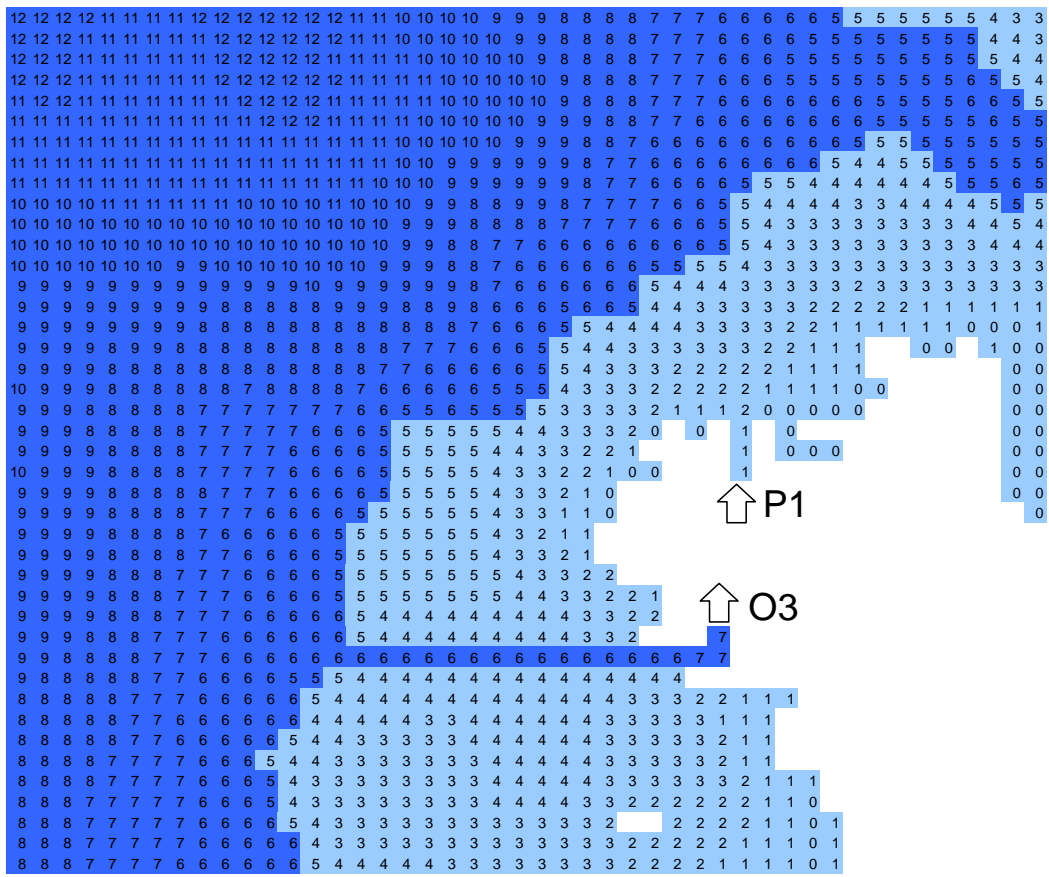
Pyhäjoen sovelluksessa vaihtoehtoisia jäähdytysveden ottopaikkoja oli kolme ja poistopaikkoja yksi. Pohjalla olevat otot O1 ja O2 konstruointiin malliin siten, että oton ympäriltä pohjan syvyys tasoitettiin vakioksi. Rannassa olevalle otolle O3 kaivettiin 6 metriä syvä kanava alueelle, jossa syvyys oli yli 6 metriä. Poiston kohdalla poiston edustalle kaivettiin 2 metriä syvä poistosuihkun suuntainen kanava, mikäli syvyys oli tätä pienempi. Esimerkkinä oton ja poiston sijoituksesta mallihilassa on kuvassa 17 esitetty mallihila otolle O3 ja poistolle P1.



Kuva 15. Pyhäjoen mallisovelluksen lähialue, hilakoppien koko karkeammassa hilassa 240 m ja tarkemmassa 80 m.



Kuva 16. Pyhäjoen mallisovelluksen koko mallihila, jossa sisäkkäistyksen on rajattu tummalla värillä alueen yläreunassa. Hilakoppien koot laajimmasta pienimpään ovat 2160 m, 720 m, 240 m ja 80 m.



□ Maa ■ 0-5m ■ >5

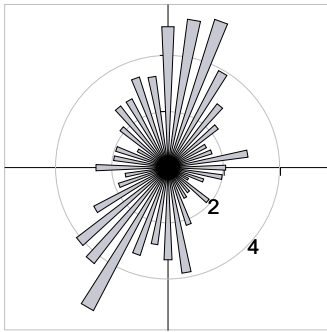
Kuva 17. Pyhäjoen mallisovelluksen ottopaikka O3 ja poistopaikka P1 mallihilassa.

5.2. Säätiedot, Nahkiainen

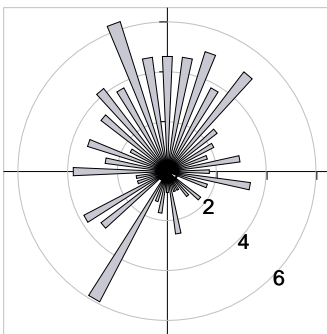
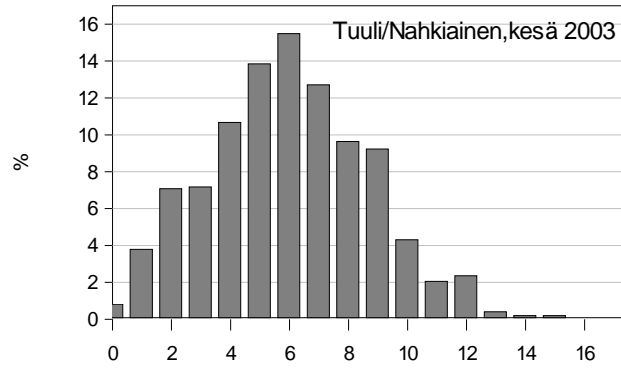
Pyhäjoen sovelluksessa lähialueen säätiedot on valittu Nahkiaisensääsämältä. Nahkiaisensääsämällä puuttuvia kosteusarvoja on täydennetty Ulkokallan havainnoilla.

Kuvassa 18 on esitetty Nahkiaisensääsämällä tuulen suunta- ja nopeusjakaumat aikajaksolta 15.5.2003–15.9.2003. Havaintoasema sijaitsee Perämerellä koordinaattipisteessä lat 64°36' lon 23°54'. Sijainti on noin 18 km Hanhikivestä länsiluoteeseen. Asemankeskituuli oli 15.5.–15.9.2003 5.99 m/s, ja suunnan mediaani 210 astetta (5.74 % tuulista). Lähes yhtä tyypillisiä olivat pohjoisen puoleiset tuulet (suunta 20 astetta, 5.54 % tuulista). Jaksolla oli normaalia enemmän pohjoisen puoleisia tuulia, tuulen nopeuksien suhteen jakso oli lähellä normaalia.

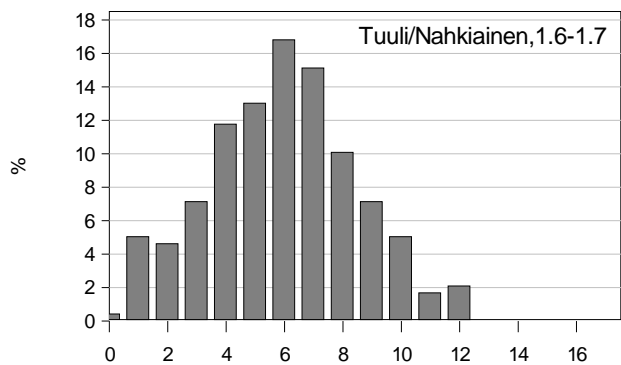
Ilman lämpötilansuhteen vuoden 2003 kesä oli normaalia lämpimämpi heinäkuun osalta, mutta muuten lähellä normaalia. Veden lämpötilansuhteen osalta heinäkuun loppu oli hyvin lämmin. Nahkiaisensääsämällä lämpötilat on esitetty kuvassa 19. Veden lämpötilamittauksia Hanhikivensääsämällä oli saatavilla huonosti. Lähin intensiivipiste oli Hailuodossa, noin 70 km pohjoiskoilliseen. Lähialueella olevista pisteistä Ouyy1, Ouyy2 ja RR8 oli muutamia havaintoja vuosittain. Veden pintalämpötila-havainnot on esitetty kuvassa 20.



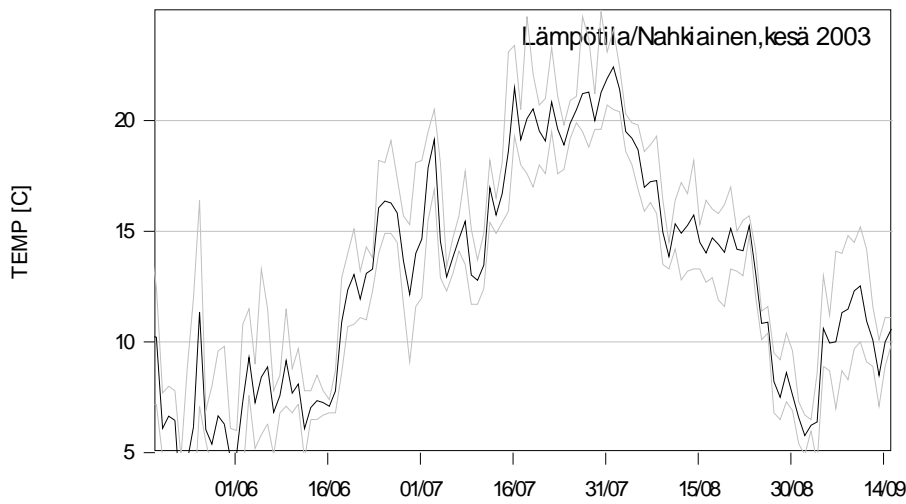
Kesä 2003 (15.5.2003–15.9.2003)



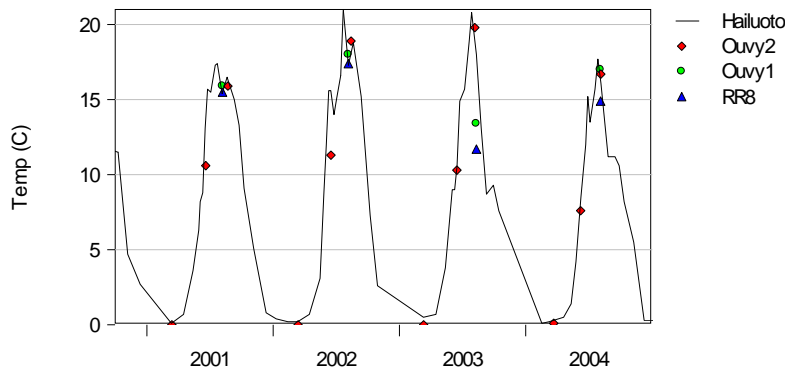
Kesäkuu 2003 (1.6.2003–1.7.2003)



Kuva 18. Tuulen suunta- ja nopeusjakaumat (%) sääasemalla Nahkiainen.



Kuva 19. Ilman päivittäiset keski-, minimi- ja maksimilämpötilat jaksolla 15.5.–15.9.2003 Nahkiaisensääasemalta, laskettuna 3 tunnin välein tehdyistä havainnoista.



Kuva 20. Veden pintalämpötiloja mittauspisteestä Hailuoto, Ovy1, Ovy2 ja RR8 vuosilta 2001–2004.

5.3. Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat

Jokivirtaamia Pyhäjoen mallisovellukseen asetettiin seitsemän: Pyhäjoki, Oulujoki, Simojoki, Kemijoki, Tornionjoki, Kalixjoki ja Luleåjoki. Suomen puolella olevien jokien virtaamat saatiin HERTTA-tietokannasta, Ruotsin joille käytettiin kuukausikeskiarvoja. Jokien lämpötilat arvioitiin parempien tietojen puuttuessa ilman lämpötiloista kohdan 3.5 mukaisesti. Jokivesien suolaisuus asetettiin nolaksi.

5.4. Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot

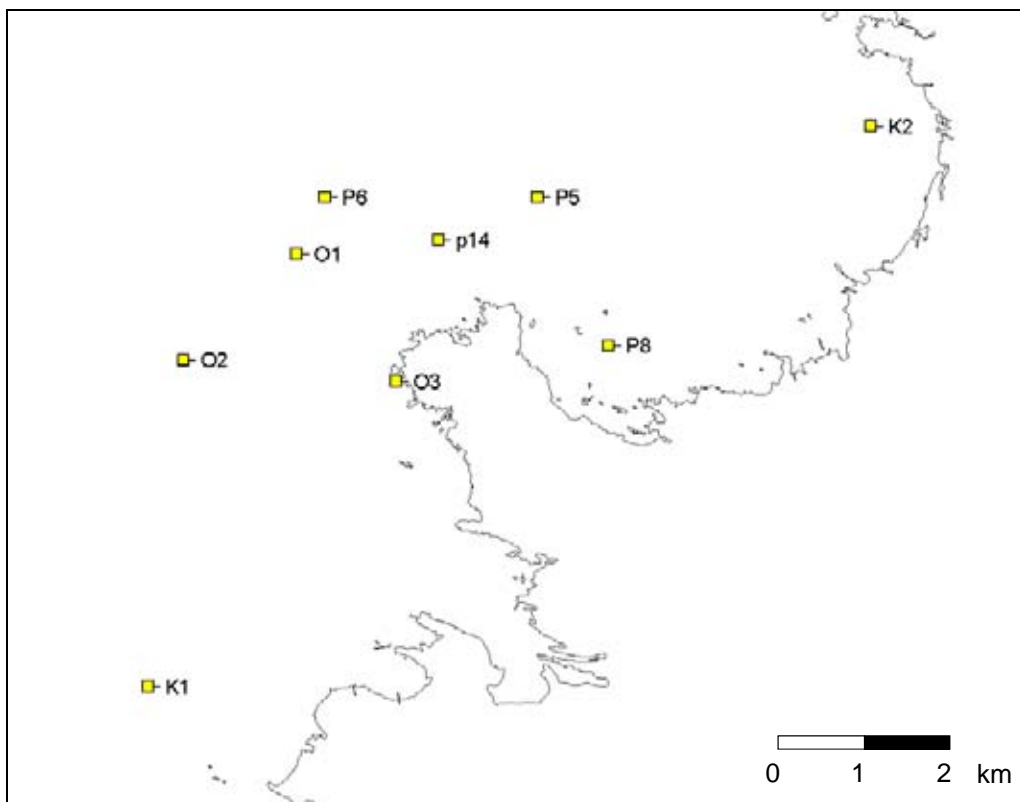
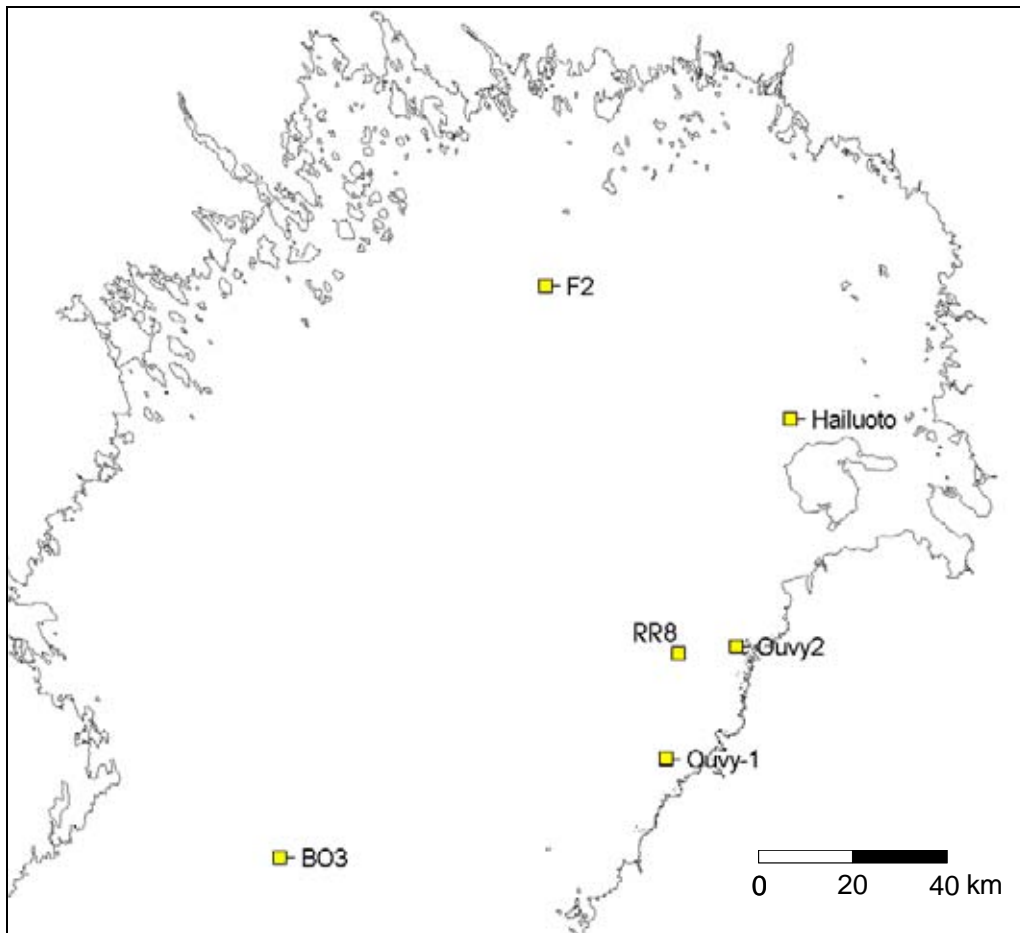
Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvoja asetettaessa hyödynnettiin Merentutkimuslaitoksen FIMR BMP-data-arkistosta saatuja Perämeren mittauspisteiden BO3 ja F2 CTD-profiileja. Vuodelta 2003 mittauksia oli suoritettu 2.6., 23.8. ja 27.8. (Olsonen, 2007).

Avoveden laskentajakso oli 15.5.–15.9.2003. Lämpötilan alkuarvoksi 15.5.2003 asetettiin 1 aste koko syvyydelle. Suolaisuusarvot asetettiin välille 1.5–4 PSU, siten että pohjalla oleva vesi oli suolaisinta.

Talvijakson 2002–2003 simuloinneissa laskentajakso oli 1.11.–1.2.2003. Veden lämpötilan lähtötilanne simuloinneissa oli vakiolämpötila 4 °C koko mallialueella.

5.5. Vertailu Pohjanlahden lämpötilamittauksiin

Laskettuja mallituloksia vertailtiin mitattuihin lämpötiloihin. Vertailut suoritettiin pääasiassa vuoden 2003 mittauksiin, jotka poimittiin Suomen Ympäristökeskuksen HERTTA-aineistosta. Hertta-aineiston data on mitattu vedenlaadun seurannan pisteistä tiheimmillään noin kerran kuukaudessa, mutta tyypillisesti harvemmin. Pisteiden sijainnit näkyvät kuvassa 21.

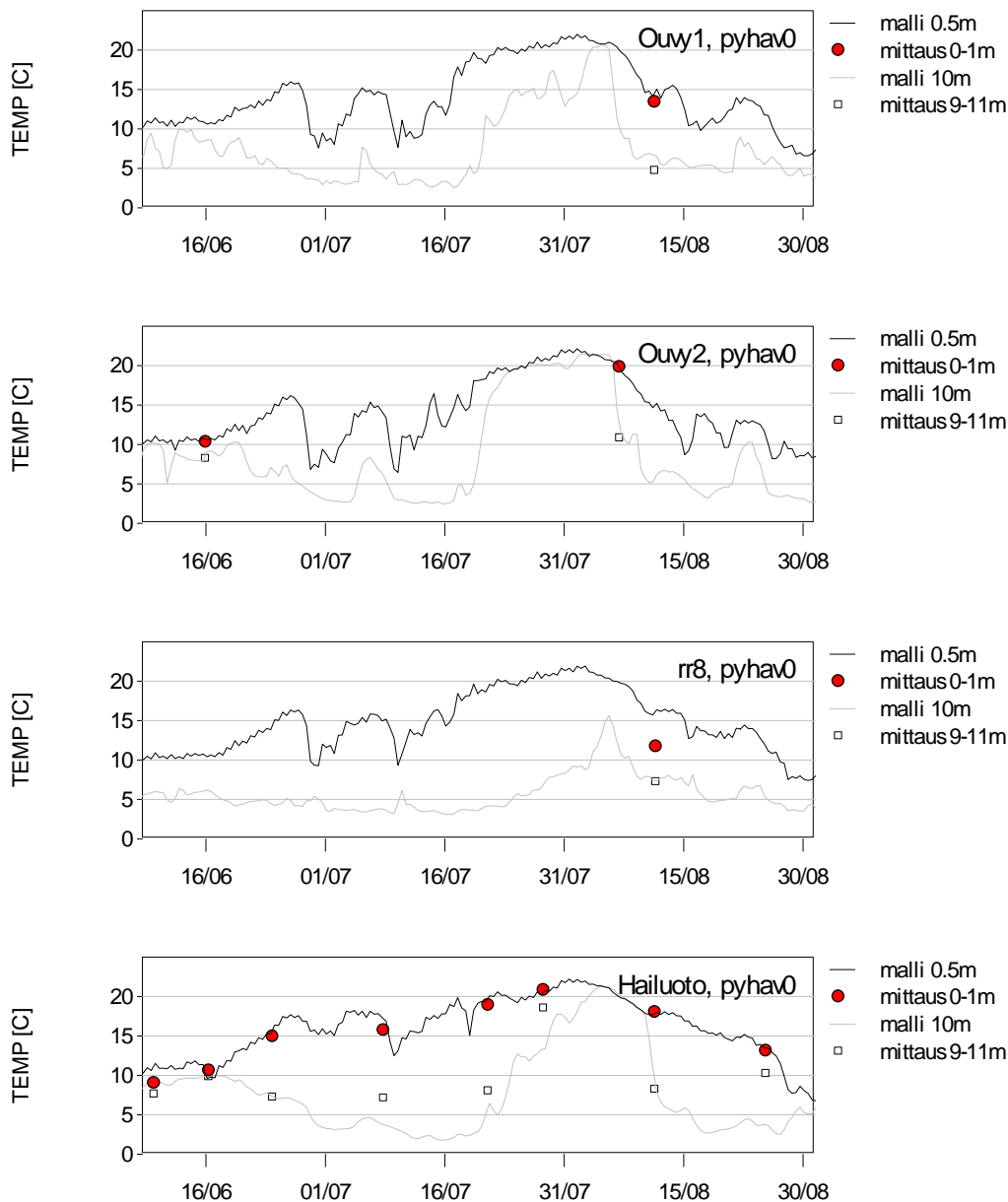


Kuva 21. Mittauspisteiden ja lähialueen aikasarjapisteiden (P^* , O^* , K^*) sijainti.

Mitattujen ja laskettujen lämpötilojen vertailua varten laskettiin vuoden 2003 kesäjakso. Vertailujakson laskenta aloitettiin 15.5.2003, jolloin saatiin kesäkuun alkuun paremmin todellisuutta vastaava veden

lämpötilajakauma. Tunnuslukujen laskennassa ja aikasarjakuviissa on käytetty jaksoa 1.6.2003–1.9.2003. Hanhikiven lähialueella ei ole vedenlaadun mittauspisteitä, ja kauemmissakin pisteissä mittausta on harvassa. Kesän 2003 simulointijaksolta mittausta on yhdestä kahteen pistettä kutakin mittausta paikkaa kohti (Hailuotoa lukuun ottamatta). Malli on laskettu samoilla parametriasetuksilla kuin Simon mallisovellus, joka pystyttiin varmentamaan paremmin.

Vertailut HERTTA-tietokannan mittauspisteisiin on esitetty pisteistä Ouyy1, Ouyy2, RR8 ja Hailuoto. Yleisesti ottaen mittauspisteissä lasketut pintalämpötilat vastasivat havaintoja hyvin, lukuun ottamatta pisteen RR8 yhden havainnon pintalämpötilaa. Lämpötilavertailut on esitetty kuvassa 22 ja vastaavat tilastolliset tunnusluvut taulukossa 7. Vertailun mukaan malli arvioi lämpötilat noin asteen verran liian korkeiksi sekä pinnalla että 10 metrin kerroksessa.



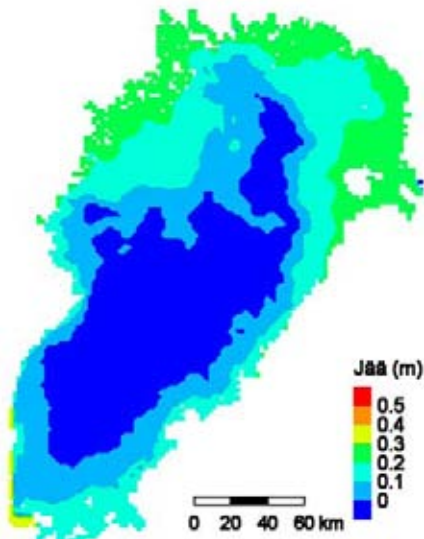
Kuva 22. Pisteet Ouyy1, Ouyy2 ja Hailuoto, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot pinnalla ja 10 metrin syvyydellä.

Taulukko 7. Mallilaskennan ja mittausarvon erotuksien keskiarvot (k.a) ja keskihajonnat (std.) mittauspisteissä kesäjakson 1.6.–1.9.2003 ajalta.

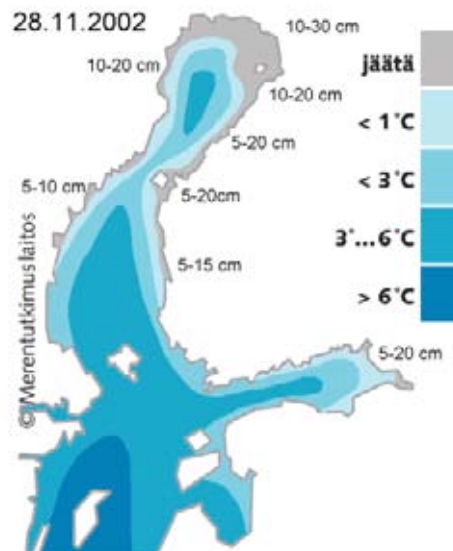
Piste	N	k.a. (°C)	std (°C)
Ouvy1 pinta	1	1.24	-
Ouvy1 10 m	1	2.06	-
Ouvy2 pinta	2	0.09	-
Ouvy2 10 m	2	0.9	-
RR8 pinta	1	4.58	-
RR8 10 m	1	0.07	-
Hailuoto pinta	9	0.62	0.96
Hailuoto 10 m	9	1.26	3.16
Pinta yhteensä	13	0.89	
Pohja yhteensä	13	1.17	

5.6. Vertailu Pohjalahden jäätilanteisiin

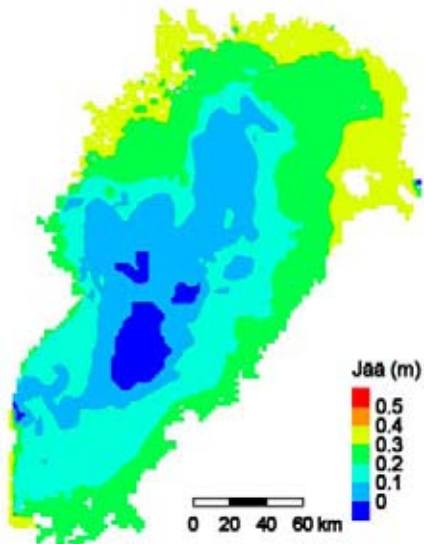
Simuloidut ja havaitut jäätilanteet on esitetty kuvassa 23. Mallilaskennan sopivuus jääkarttoihin on kohtuullisen hyvä. Yleisenä piirteenä on, että jäätä muodostuu mallissa jossakin määrin liian vähän, mikä näkyy esim. 16.12. kuvassa. Tällöin mallin laskemassa jäätilanteessa on vielä pieni avoin alue Perämeren keskiosissa, vaikka vertailukartan mukaan alue on jo jäätynyt umpeen.



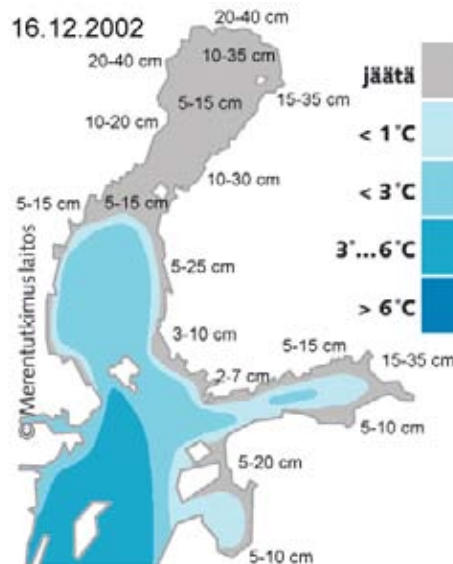
Laskettu jäättilanne 28.11.2002 12:00



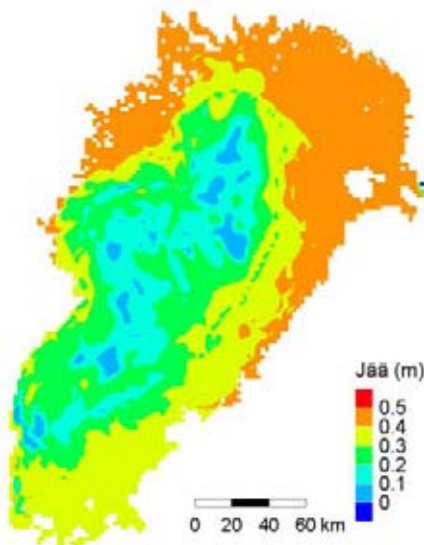
Havaittu jäättilanne 28.11.2002



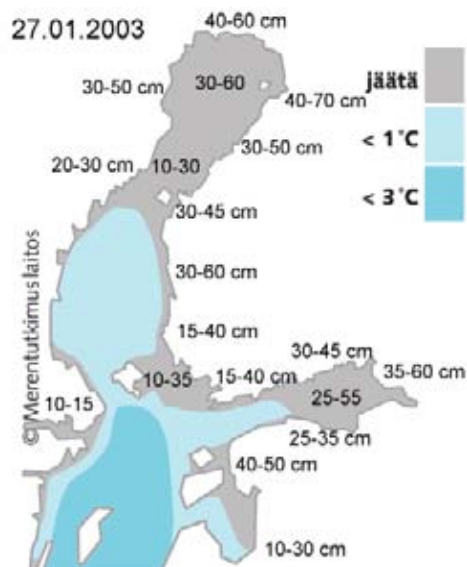
Laskettu jäättilanne 16.12.2002 12:00



Havaittu jäättilanne 16.12.2002



Laskettu jäättilanne 27.01.2003 12:00



Havaittu jäättilanne 27.01.2003

Kuva 23. Lasketut ja havaitut jäättilanteet talvella 2002/2003.

6. Ruotsinpyhtään mallisovellus

6.1. Mallihila

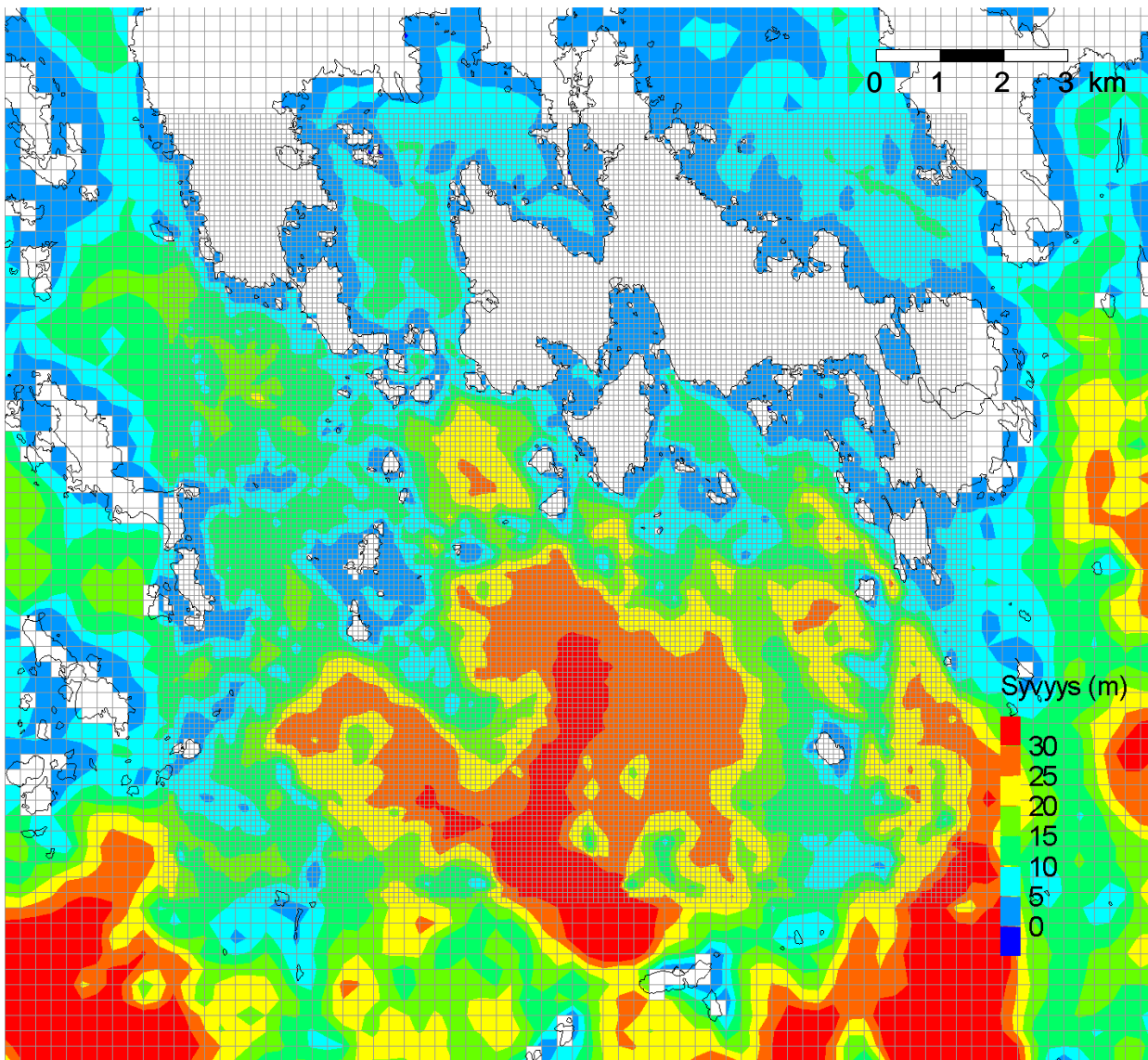
Ruotsinpyhtään mallisovelluksen hilan parametri on esitetty taulukoissa 8 ja 9, sekä mallihila syvyys-tietoineen kuvissa 24 ja 25.

Taulukko 8. Sisäkkäiset hilojen parametrit, Ruotsinpyhtään sovellus.

Taso nro	Hilakoppeja vaakasuunta	Hilakoppeja pystysuunta	Hilaruudun koko (m)	Koko, vaakasuunta (km)	Koko, pystysuunta (km)
1	189	90	2160	408	194
2	61	55	720	44	40
3	109	106	240	26	25
4	157	154	80	12.6	12.3

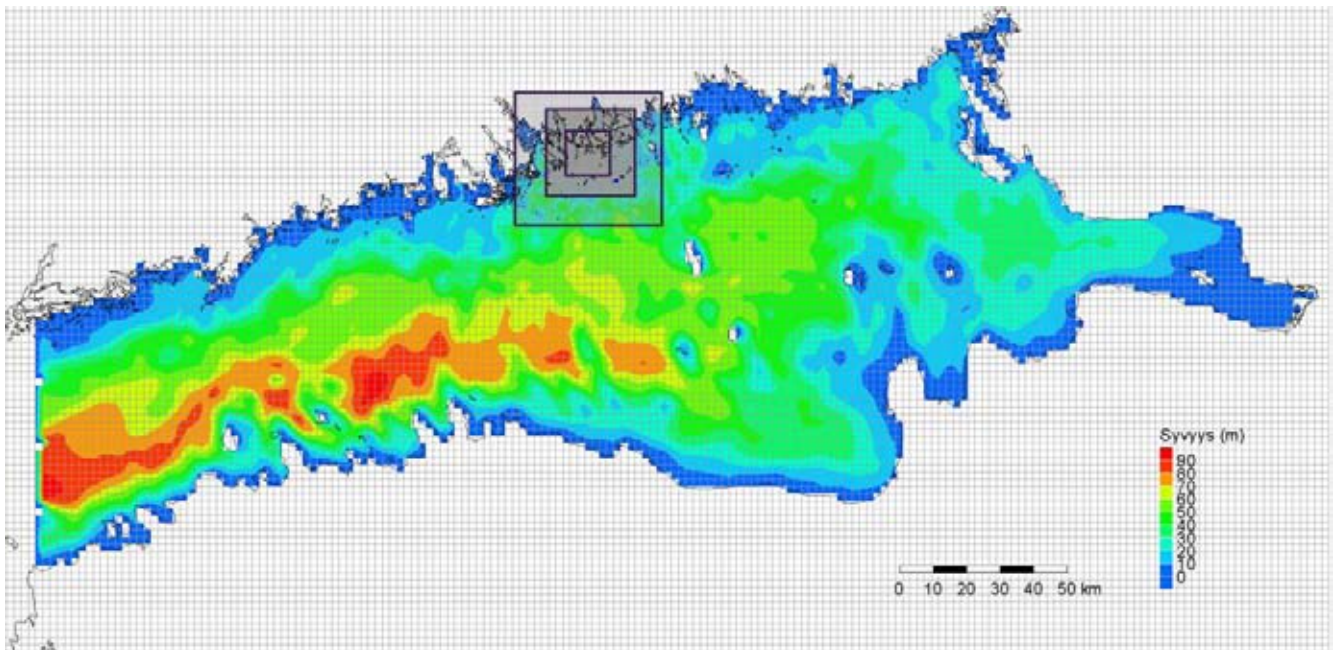
Taulukko 9. Hilakoppien syvyystasot Ruotsinpyhtään sovelluksessa.

Taso	Syvyys (m)	Taso	Syvyys (m)
1	0 – 1	11	20 – 25
2	1 – 2	12	25 – 30
3	2 – 3	13	30 – 40
4	3 – 4	14	40 – 50
5	4 – 5	15	50 – 60
6	5 – 7	16	60 – 80
7	7 – 9	17	80 – 100
8	9 – 11		
9	11 – 15		
10	15 – 20		

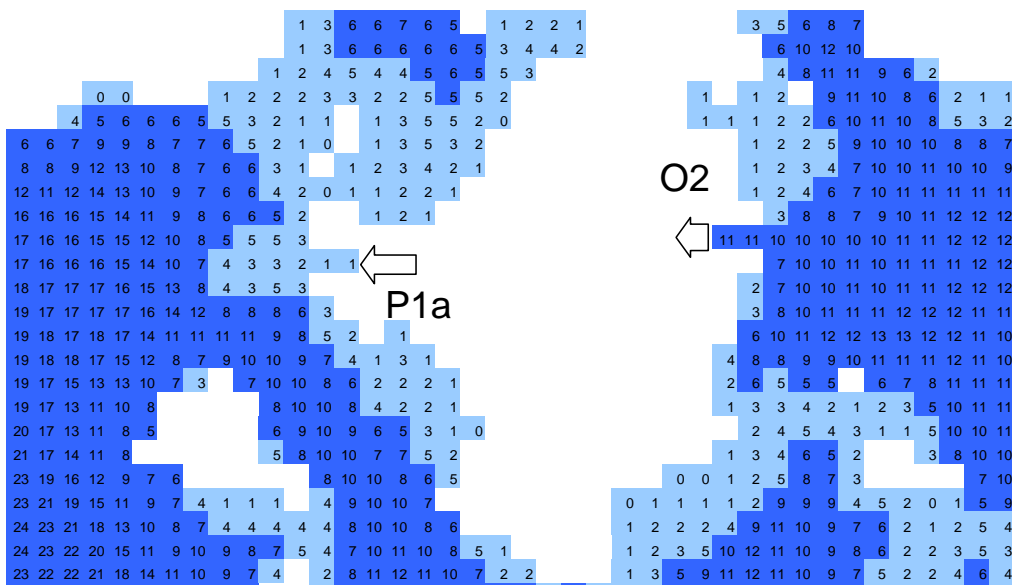


Kuva 24. Ruotsinpyhtään sovelluksen kohdealue, hilakoppien koko karkeammassa hilassa 240 m ja tarkemmassa 80 m.

Ruotsinpyhtäällä vaihtoehtoisia jäähdytysveden ottopaikkoja oli kolme O1–O3, vaihtoehtoisia purkupaikkoja myös kolme P1, P2 ja P3. Otto- ja purkupaikkojen sijainnit on esitetty tarkemmin raportissa (Lauri 2008). Rantaotot O2 ja O3 konstruointiin malliin siten, että rannassa olevalle ottokanavalle kaivettiin 10 metriä syvä kanava alueelle, jossa syvyys oli yli 10 metriä. Pohjalla olevalle otolle O1 kaivettiin 25 metriä syvä kanava alueelle, jossa pohjan syvyys oli yli 25 metriä. Poistojen P1, P2 ja P3 kohdille poiston edustalle kaivettiin 2 metriä syvä poistosuihkun suuntainen kanava, mikäli syvyys oli tätä pienempi. Esimerkkinä oton ja poiston sijoituksesta mallihilassa on kuvassa 26 esitetty mallihila tapaukselle, jossa otto on kohdassa O2 ja poisto kohdassa P1a.



Kuva 25. Ruotsinpyhtään sovelluksen koko mallihila, jossa sisäkkäistyksen on rajattu tummalla värillä alueen yläreunassa. Hilakoppien koot ovat laajimmasta pienimpään 2160 m, 720 m, 240 m ja 80 m.



Kuva 26. Otto O2 ja poisto P1a mallihilassa.

□ Maa ■ 0-5m ■ >5m

6.2. Sää tiedot, Orrengrund

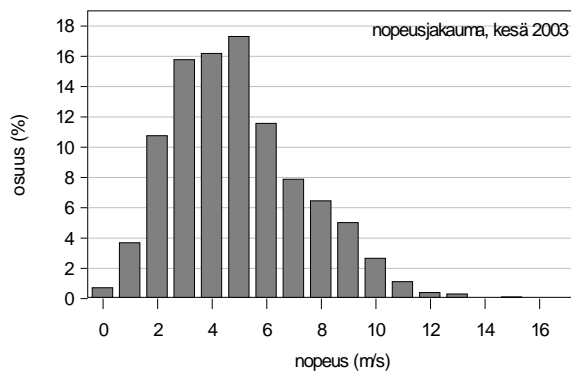
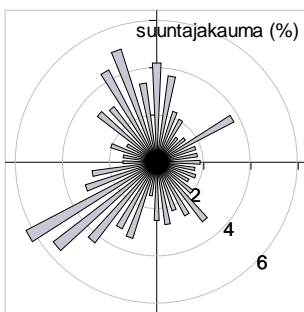
Ruotsinpyhtään sovelluksessa lähialueen sää tiedot on valittu Orrengrundin sää asemalta. Orrengrundin sää asema oli lähinnä suunniteltua voimalayksikön sijoituspaikkaa, Loviisan ydinvoimalan sää asemaa lukuun ottamatta. Ydinvoimalan asemalta ei kuitenkaan ollut valitun aikajakson tuulia saatavana. Orrengrundin sää aseman voi katsoa kuitenkin edustavan hyvin Ruotsinpyhtään merialueella vallitsevia tuulia.

Kuvassa 27 on esitetty Orrengrundin sää havaintoaseman tuulen suunta- ja nopeusjakaumat aikajaksolta 15.5.2003–15.9.2003. Havainto asema sijaitsee Loviisan edustan ulkosaaristossa koordinaattipisteessä lat 60°16' lon 26°26'. Aseman sijaintipaikka on noin 10 km Kampuslandetin sijoituspaikasta etelään. Valitulla aikajaksolla aseman tuulennopeuden keskiarvo oli 4.9 m/s ja tyypillisin tuulen suunta 240°

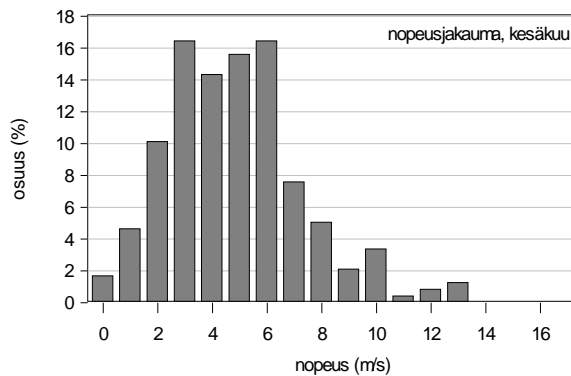
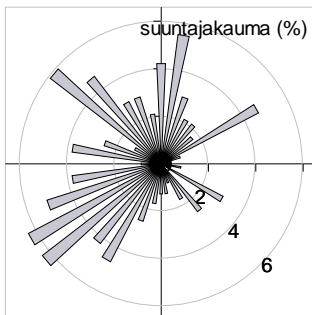
(6.3 % tuulista). Kesäjaksolla oli jossakin määrin normaalia enemmän pohjois- ja luoteistuulia, tuulen nopeuksien suhteen jakso oli keskimääräinen.

Ilman lämpötilan suhteen vuoden 2003 kesä oli normaalia lämpimämpi heinäkuun osalta, jolloin keskilämpötila Helsingissä oli yli kolme astetta keskimääräistä korkeampi. Kesäkuu oli noin asteen keskimääräistä kylmempi, elokuu noin asteen lämpimämpi. Veden lämpötilan osalta heinäkuun loppu oli hyvin lämmin. Orrengrundin sääaseman ilman lämpötilat ja vedenlaatupisteen Ängsö lämpötilat on esitetty kuvissa 28 ja 29.

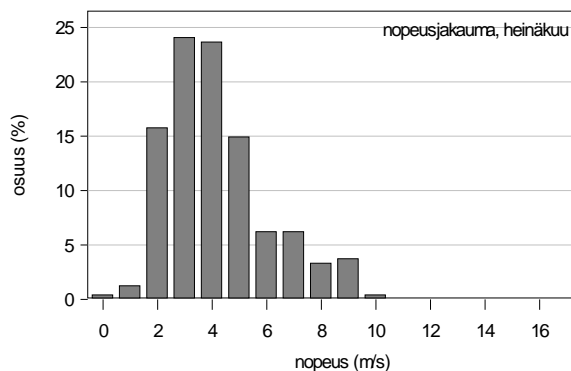
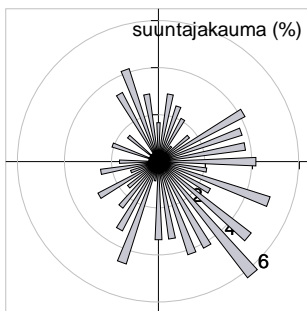
Säätilan puolesta vuoden 2002 marraskuu oli selvästi keskimääräistä kylmempi. Marraskuun keskilämpötila oli Orrengrundin sääasemalla -1.5 astetta, kun se keskimäärin on noin +1 astetta. Myös joulukuu ja vuoden 2003 tammikuu olivat hieman keskimääräistä kylmempiä. Ilman lämpötila oli joulukuun alusta lähtien lähes koko simulointijakson ajan alle nollan. Tammikuun puolenvälin paikkeilla oli noin kahden viikon mittainen lämpimämpi jakso, jonka jälkeen sää taas kylmeni. Orrengrundin sääasemalta mitatut ilman lämpötilat talven 2002–2003 osalta on esitetty kuvassa 30.



Tuuli Orrengrund, koko kesä 2003 (15.5.2003-15.9.2003)

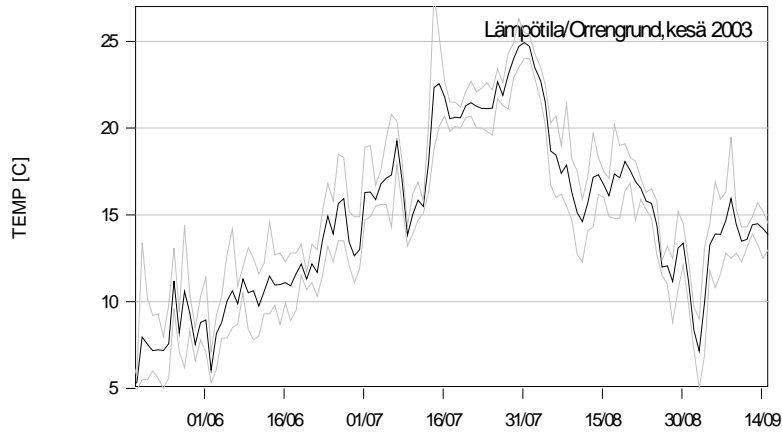


Tuuli Orrengrund, kesäkuu 2003 (1.6.2003-1.7.2003)

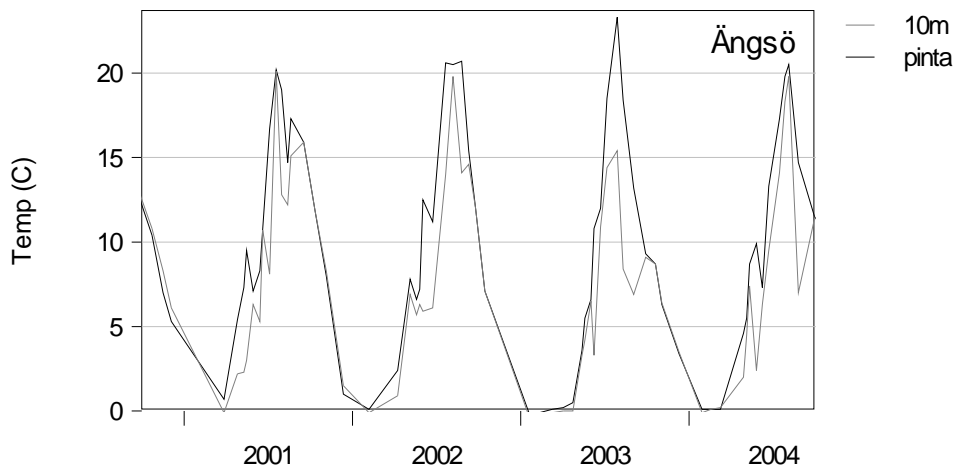


Tuuli Orrengrund, heinäkuu 2003 (1.7.2003-1.8.2003)

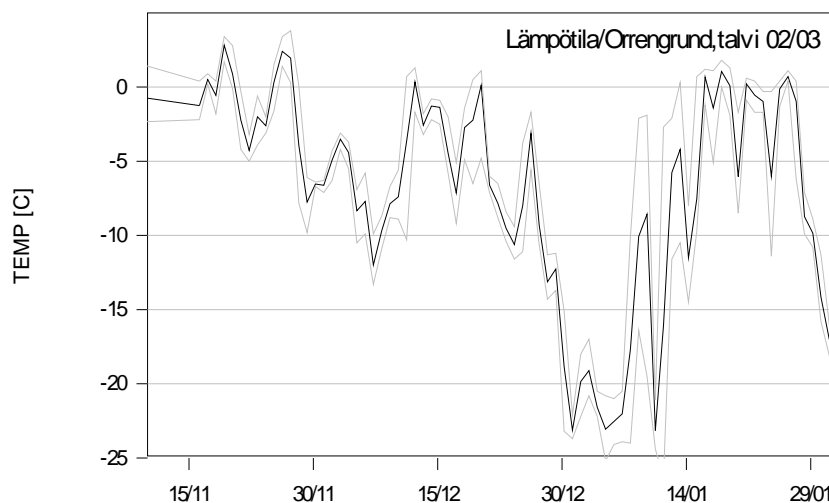
Kuva 27. Tuulen suunta- ja nopeusjakaumat (%) Orrengrundin sääasemalla kesällä 2003.



Kuva 28. Ilman päivittäiset keski-, minimi- ja maksimilämpötilat jaksolla 15.5.–15.9.2003 Orregrundin sääasemalta laskettuna 3 tunnin välein tehdyistä havainnoista.



Kuva 29. Veden pintalämpötila ja 10 m lämpötila mittauspisteestä Ängsö vuosilta 2001–2004.

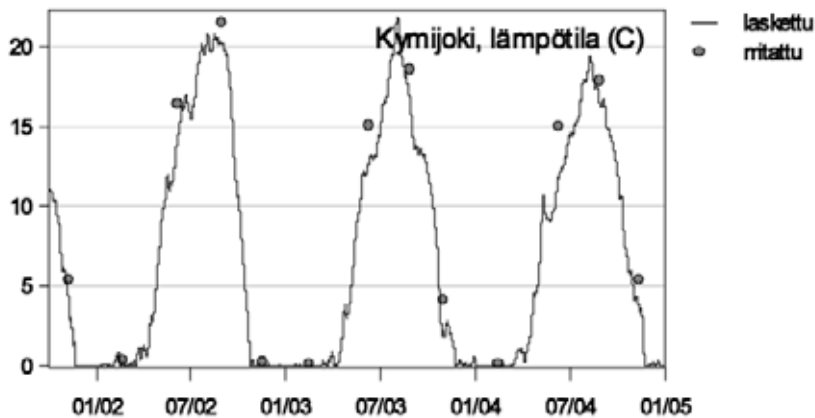


Kuva 30. Ilman päivittäiset keski-, minimi- ja maksimilämpötilat jaksolla 1.11.2002–1.2.2003 Orregrundin sääasemalta laskettuna 3 tunnin välein tehdyistä havainnoista.

6.3. Jokivirtaamat ja jokivesien lämpötilat

Jokivirtaamia Ruotsinpyhtään mallisovellukseen asetettiin kolme: Kymijoen länsi- ja itähaara sekä Neva. Kymijoen virtaamat saatiin HERTTA-tietokannasta (pisteet Kymijoki länsihaara, Koivukoski ja Korkeakoski), Nevan virtaamille käytettiin parempien tietojen puuttuessa kuukausikeskiarvoja. Kymijoen vuoden 2003 virtaamat olivat normaalia pienempiä johtuen erittäin kuivasta kesästä.

Jokien lämpötilat arvioitiin ilman lämpötiloista, sillä päivittäisiä lämpötilamittauksia ei ollut käytettävissä vuodelle 2003. Kuvassa 31 on esitetty Kymijoen arvioidut ja mitatut veden lämpötilat vuosille 2002–2004.



Kuva 31. Kymijoen arvioitu ja mitattu veden lämpötila Kymijoen Hirvikoskelta.

6.4. Loviisan voimalayksiköt

Hästholmenilla sijaitsevat Loviisan ydinvoimalaitoksen voimalaitosyksiköt LO1 ja LO2 olivat mukana laskennassa. Voimalayksiköiden vedenotto sijoitettiin 7 – 9 metrin syvyyteen Hästholmenin länsirannalle, purku 0 – 2 metrin kerrokseen Hästholmenin itärannalle. Otto- ja purkuvirtaamalle käytettiin arvoa 40 m³/s, purun lämmönousulle arvoa 12 °C. Otto- ja purkuvirtaamat sekä lämmönousu pidettiin koko laskentajakson ajan vakioina. Poistoveden suolaisuus oli sama kuin ottoveden suolaisuus.

6.5. Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvot

Lämpötilan ja suolaisuuden alkuarvoja asetettaessa hyödynnettiin Merentutkimuslaitoksen FIMR BMP -data-arkistosta saatuja Suomenlahden mittauspisteistä LL7 ja LL3A mitattuja CTD-profiileja. Vuodelta 2003 mittauksia oli suoritettu pisteestä LL3A 26.5. ja 5.8., pisteestä LL7 6.6. ja 7.8. (Olsonen, 2007).

Avoveden laskentajakso oli 15.5.–15.9.2003. Veden lämpötilan lähtötilanne asetettiin siten, että pintakerros oli 3 °C, pohja 3.5 °C ja väli 30–40 metriä 1 °C. Merentutkimuslaitoksen mittauspisteessä LL3a Suomenlahden keskellä 26.5.2003 mitattu lämpötilaprofiili antaa kerroksen 0–15 metriä lämpötilaksi noin 4.9 °C, josta lämpötila laskee siten, että 30 metrin syvyydellä lämpötila on 1.3 astetta. Syvemmälle mentäessä lämpötila nousee siten, että 50 metrin syvyydellä se on 3.2 astetta, 50–65 metrin syvyyksillä noin 3.6 astetta. Laskennan alkujakso, noin kesäkuun alkuun asti, kuuluu alkutilanteen vaikutuksen tasoittumiseen.

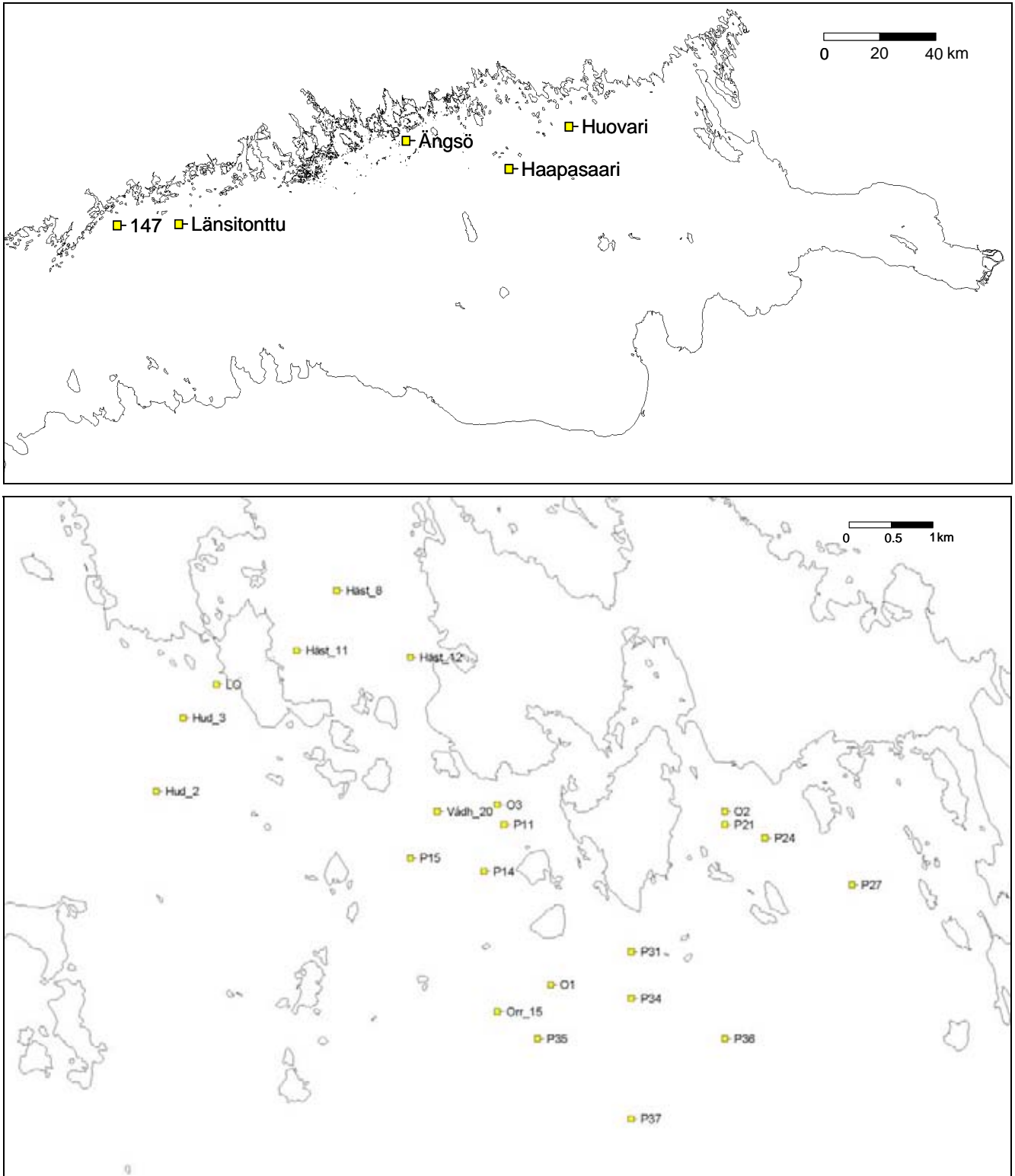
Suolaisuusarvot asetettiin välille 5.7–8.5 PSU, siten että pintakerroksen suolaisuus 20 metriin asti oli 5.7 PSU, 20–50 metrin välillä suolaisuus kasvoi tasaisesti arvosta 5.7 PSU arvoon 7.5 PSU. Yli 50 metrin syvyyksillä suolaisuus asetettiin arvoon 8.5 PSU.

Talvijakson 2002–2003 simuloinneissa laskentajakso oli 1.11.–1.2.2003. Veden lämpötilan lähtötilanne simuloinneissa oli 7 °C 30 metrin syvyyteen asti ja syvemmällä 4 °C koko mallialueella. Lähtötilanteen suolaisuusarvot välillä 0–20 metriä asetettiin arvoon 4.8 PSU. Välillä 20–50 metriä suolaisuus

kasvoi tasaisesti arvosta 4.8 PSU arvoon 7.5 PSU. Yli 50 metrin syvyyksillä suolaisuus asetettiin arvoon 8.5 PSU.

6.6. Vertailu Suomenlahden lämpötilamittauksiin

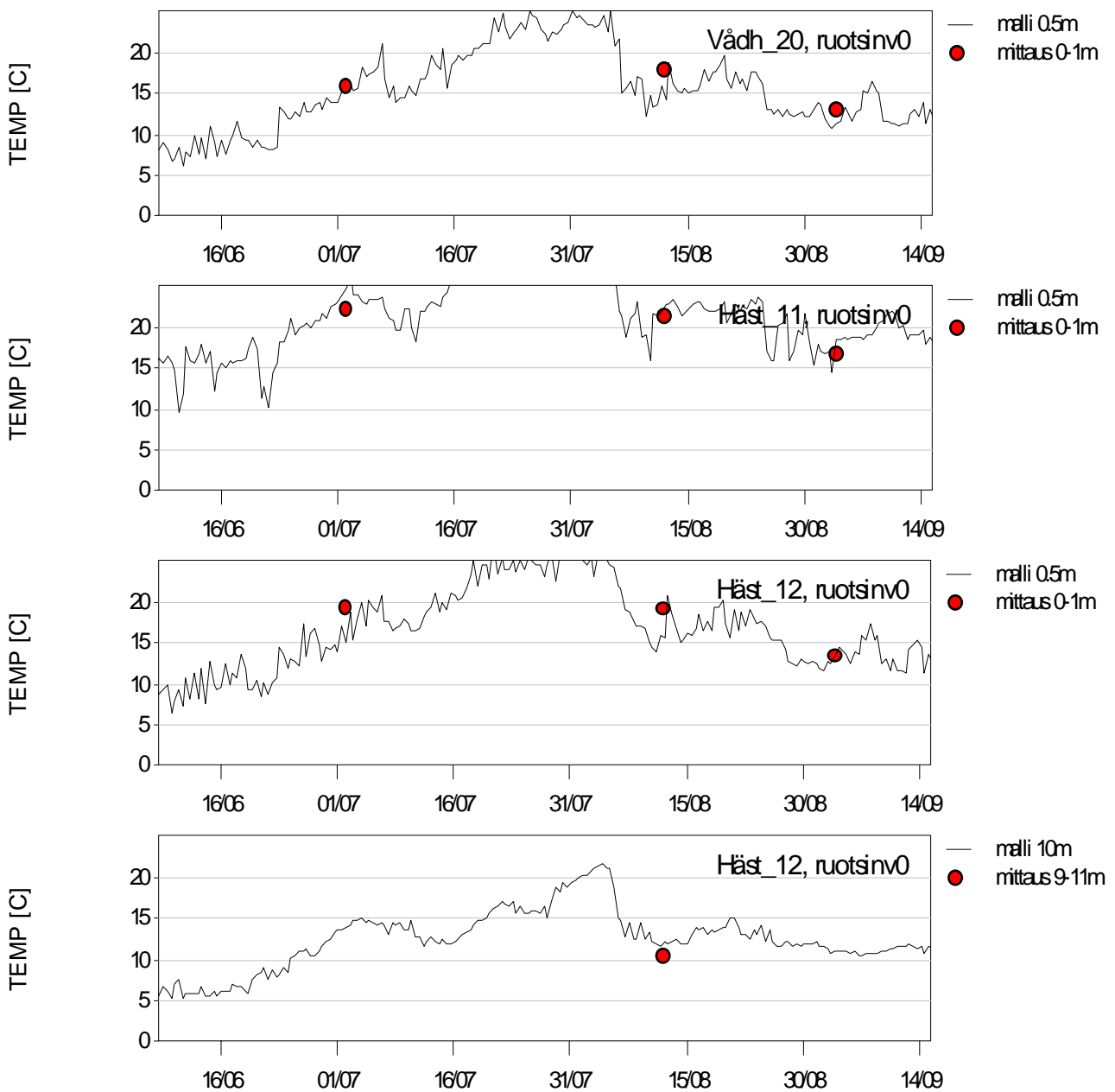
Ruotsinpyhtään mallisovelluksella laskettuja arvoja vertailtiin mitattuihin lämpötiloihin. Vertailut suoritettiin pääasiassa vuoden 2003 mittauksiin, jotka poimittiin Suomen ympäristökeskuksen HERTTA-aineistosta. Hertta-aineiston data on mitattu vedenlaadun seurannan pisteistä tiheimmillään noin kerran kuukaudessa, mutta tyypillisesti harvemmin. Pisteiden sijainnit näkyvät kuvassa 32.



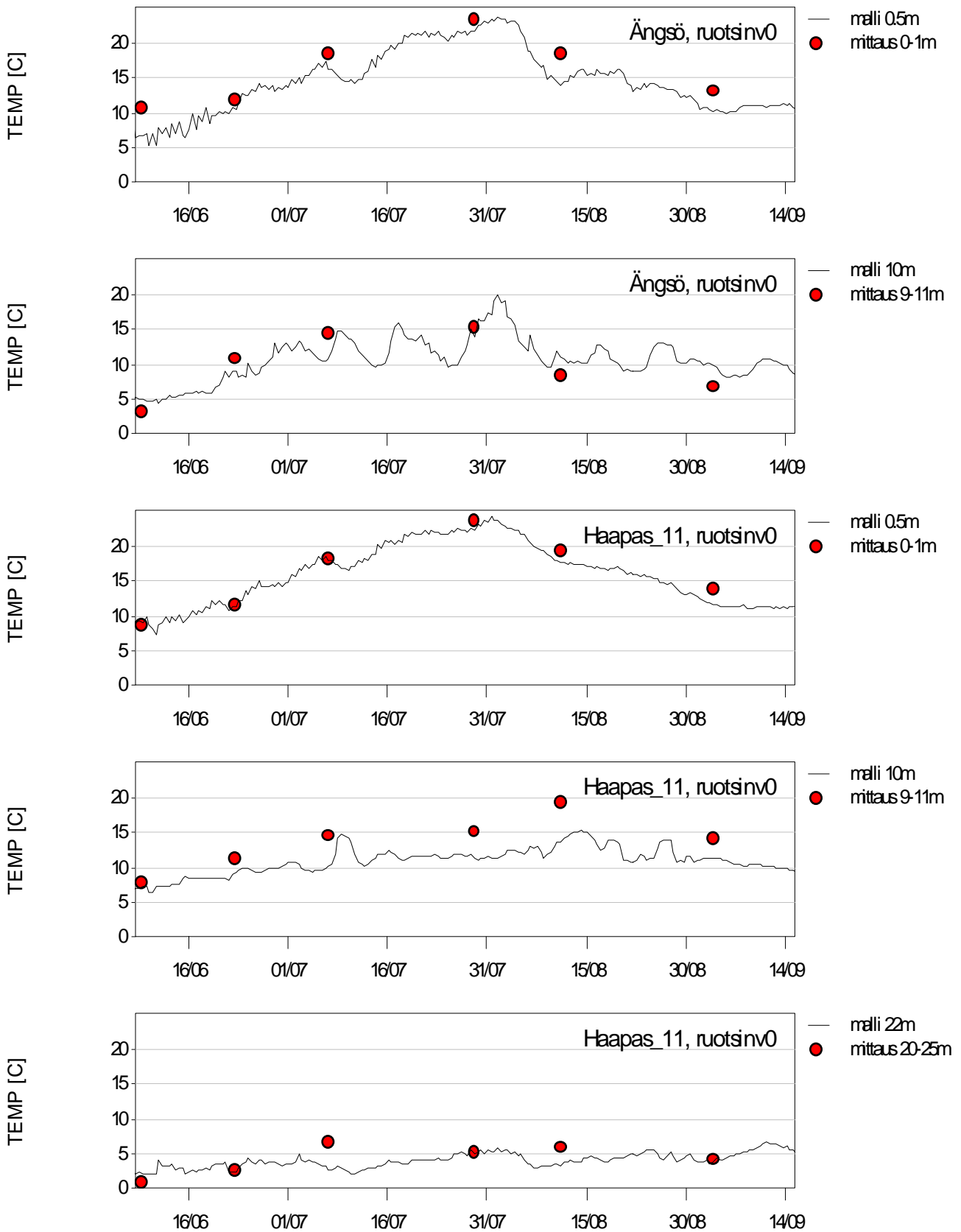
Kuva 32. HERTTA-mittauspisteiden ja lähialueen aikasarjapisteiden (P*, O*) sijainti.

Mitattujen ja laskettujen lämpötilojen vertailut on laskettu vuoden 2003 kesäjaksolta. Vertailujakson laskenta aloitettiin 15.5.2003, jolloin saatiin kesäkuun alkuun paremmin todellisuutta vastaava veden lämpötilajakauma. Tunnuslukujen laskennassa ja aikasarjakuviissa on käytetty jaksoa 1.6.2003–15.9.2003.

Vertailut HERTTA-tietokannan mittauspisteisiin on esitetty kuvissa 33 ja 34. Vertailut on tehty pisteistä Vådholm_20, Hästholm_12, Ängsö ja Haapasari_11. Vastaavat tilastolliset tunnusluvut on esitetty taulukossa 10. Yleisesti ottaen mittauspisteissä lasketut pintalämpötilat vastasivat havaintoja kohtuullisesti. Pintalämpötila on keskimäärin 1.4 astetta liian pieni, 10 metrin lämpötila 1.3 astetta liian pieni. Lisäkalibroinnin ja reunaehtojen tarkentamisen avulla lämpötilat on todennäköisesti mahdollista saada paremmin todellisuutta vastaaviksi. Tässä saavutettu tarkkuus oli kuitenkin kohtuullisen hyvä kompromissi eri mittauspisteiden ja mittaussyvyyksien lämpötilojen osalta.



Kuva 33. Pisteet Vådholm_20, Hästholm_11, Hästholm_12, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot pinnalla ja 10 metrin syvyydellä.



Kuva 34. Pisteet Ängsö ja Haapasaari, veden lämpötilan lasketut ja mitatut arvot pinnalla, 10 metrin ja 20 metrin syvyyksillä.

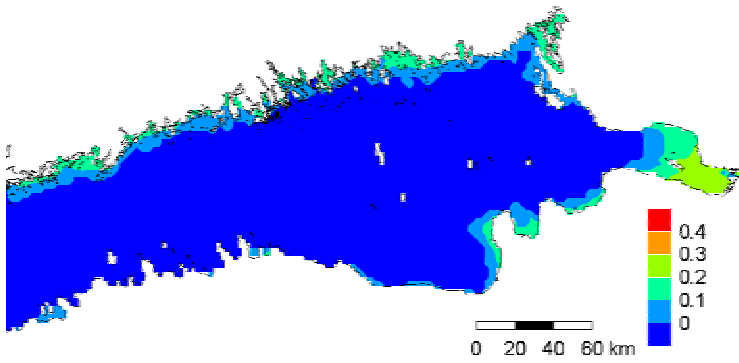
Taulukko 10. Mittauksien ja mallituloksen (mittaus-malli) erotuksien keskiarvot (ka) ja keskihajonnat (std.) mittauspisteissä kesäjakson 1.6.–15.9.2003 ajalta.

Piste	N	ka (°C)	std (°C)
Vådholm_20 pinta	3	1.97	1.32
Hästhalm_11 pinta	3	-2.49	0.54
Hästhalm_12 pinta	3	2.70	1.59
Hästhalm_12 10m	1	-1.62	-
Ängsö pinta	7	2.55	1.49
Ängsö 10m	7	0.20	2.68
Haapasaari pinta	7	0.91	0.91
Haapasaari 10m	7	2.78	1.79
Haapasaari 20m	7	0.80	1.76
pinta yhteensä	23	1.34	
10m yhteensä	15	1.28	

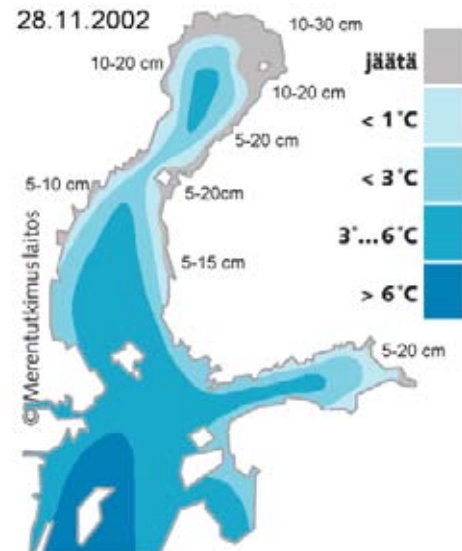
6.7. Vertailu Suomenlahden havaittuihin jäätilanteisiin

Jääpalvelun mukaan jäätyminen alkoi Suomenlahdella noin 15.11. ja jatkui siten, että tammikuun 2003 alussa koko Suomenlahti oli jäätynyt umpeen. Jään peittäessä vedenpinnan tuuli ei enää vaikuta virtauksiin, ja virtaukset määräytyvät jokivirtaamien, mallin reunan vedenkorkeuden vaihtelun, sekä lämpötila- ja suolaisuuserojen perusteella.

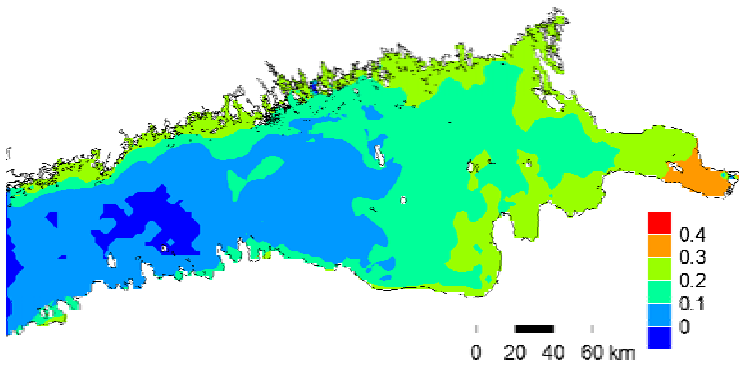
Simuloidut ja havaitut jäätilanteet on esitetty kuvassa 35. Mallilaskennan sopivuus jääkarttoihin ei ole erityisen hyvä, vaan jäätä muodostuu mallissa liian nopeasti avomerelle Suomenlahden länsipäähän ja keskiosaan. Tämä johtuu todennäköisesti mallin länsireunan veden lämpötilan reunaehdosta, joka perustuu ilman lämpötilasta laskettuun viivästettyyn keskiarvoon ja on tulosten perusteella oletettavasti todellista veden lämpötilaa kylmempi. Lämpimämpää vettä näyttää kulkeutuvan Suomenlahdelle Itämeren pääaltaasta. Mitattuja veden lämpötiloja löytyi laskentajakson ajalta vain yksi kappale (6.11.2002 Längdenin asemalta), joten reunaehto ei voitu tarkentaa mittausten perusteella.



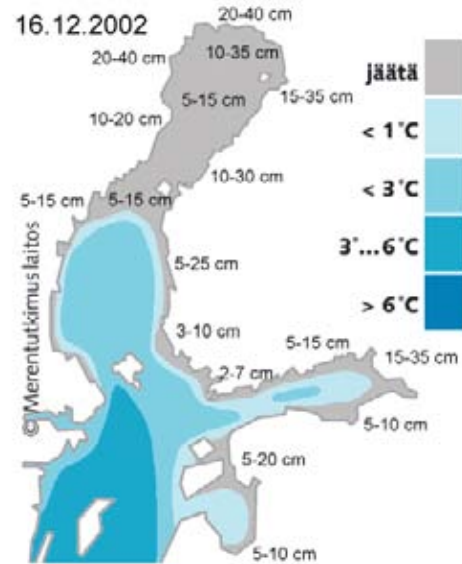
Laskettu jäättilanne 28.11.2002 12:00



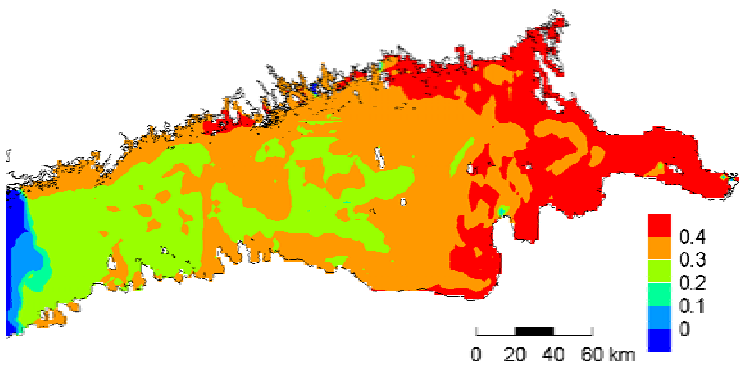
Havaittu jäättilanne 28.11.2002



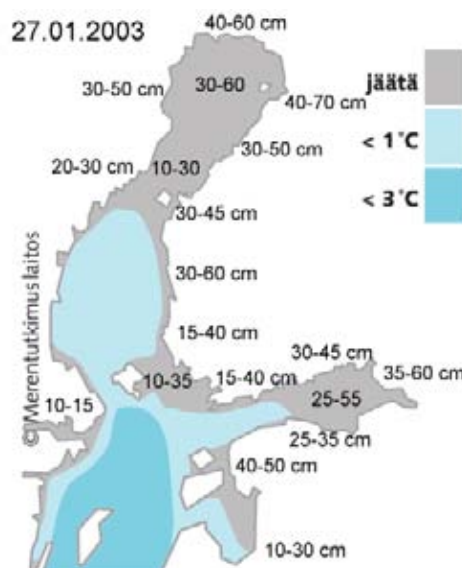
Laskettu jäättilanne 16.12.2002 12:00



Havaittu jäättilanne 16.12.2002



Laskettu jäättilanne 27.01.2003 12:00



Havaittu jäättilanne 27.01.2003

Kuva 35. Lasketut ja havaitut jäättilanteet talvella 2002/2003.

7. Pohdinta

7.1. Laskennan epävarmuuksista

Virtausmallisovellukset ovat monimutkaisia kokonaisuuksia, joissa on useita mallituloksiin virheitä aiheuttavia tekijöitä. Tästä huolimatta mallit ovat hyvä ja usein myös tarkin tapa jonkin suunniteltavan vesistön virtauksiin ja/tai lämpötilatasapainoon vaikuttavan muutoksen vaikutusten arvioitiin. Malleja on useita, ja niitä on mahdollista soveltaa monella eri tavalla. Niinpä laskennallisia malleja käytettäessä on mallin valinta ja konfigurointi tehtävä niin, että malli sopii kyseessä olevan ongelman ratkaisuun. Laskentatehtävään sopivaa mallia on lisäksi käytettävä siten, että käsillä olevaan mallinnusongelmaan saadaan riittävän tarkka ratkaisu.

Virheitä mallilaskentaan aiheutuu useista syistä. Pääasiallisesti virheet voidaan jakaa kahteen osaan: 1) laskentamallista johtuvat virheet ja rajoitukset ja 2) sovelluskohtaiset virheet. Laskentamallin virhelähteitä ovat esimerkiksi mallissa tehdyistä yksinkertaistuksista aiheutuvat virheet ja numeerisen laskennan aiheuttamat virheet. Sovelluskohtaisia virheitä ovat puolestaan esimerkiksi mallihilan ja reuna-arvojen epätarkkuudet. Mallisovelluksessa käytettävien lähtötietojen tarkkuus on suurin mallin tarkkuutta rajoittava tekijä hyvin laaditussa mallisovelluksessa (hyvin laadittu mallisovellus huomioi mallisovelluksen osalta tärkeimmät virtauksiin vaikuttavat tekijät ja toimii numeerisesti riittävän tarkasti). Esimerkiksi vesisyvyyksien, tuulitietojen, tulevan säteilyn sekä ilman lämpötilan arvojen poikkeamat vallinneista olosuhteista aiheuttavat vähintään paikallisia eroja mallituloksen ja todellisen tilanteen välille.

Vesistömallinnuksessa vallitsevan tai jonkin historiallisen tilanteen mallinnus on tyypillisesti haastava ongelma. Tilanteeseen vaikuttavia ympäristömuuttujia, kuten säätilaa, jokien tulovirtaamia ja mallinnuksen alkutilannetta ei yleensä tunneta niin hyvin, että luonnossa esiintynyt tilanne olisi edes mahdollista laskea tarkasti. Esimerkiksi YVA Oy:n mallilla päästään pintalämpötilan osalta keskimäärin 1–2 asteen tarkkuuteen mitattuihin lämpötiloihin verrattuna. Vesistöalueelle tehtävän muutoksen vaikutusten arvioinnin voi kuitenkin katsoa antavan tarkempia tuloksia muutosvaikutuksen osalta. Syynä tähän on se, että mallinnettava muutos tunnetaan tyypillisesti hyvin, jolloin se voidaan esittää mallisovelluksessa tarkasti.

Ydinvoimalaitoksen lämpöpäästön laskennassa ehkä olennaisin mallinnusongelma on lämpötilakerrostuneen virtauksen laskenta poistopaikan edustalla ja ottojen lähialueilla sekä lämmön siirtyminen veden pintakerroksesta joko ilmakehään tai sekoittumalla syvempiin vesikerrokseen. Tässä esitetyssä mallisovelluksessa laskennassa on otettu olennaisesti lämpöpäästön leviämiseen vaikuttavat asiat huomioon. Laskennassa on mukana 3D-virtaus, lämpötilakerrostuneisuus, lämpötilan vaihtuminen ilmakehän kanssa hilakoppikohtaisesti, päästövirtauksen turbulenttinen sekoittuminen sekä laajemman merialueen vaikutus paikallisiin virtauksiin. Lämpötilalaskenta on myös varmennettu vertaamalla mallituloksia saatavilla olleisiin mitattuihin vedenlämpötiloihin kesän 2003 osalta. Mallihilan tarkkuus on pyritty saamaan hyväksi riittävän suurella alueella lämpöpäästön ympärillä (tarkin alue on noin 6 km joka suuntaan lämpöpäästön kohdalta lukien) kuitenkin siten, että laskenta onnistuu käytössä olevalla laskentakapasiteetilla järkevässä ajassa.

Dynaamisen laskennan tuloksia on raportoiduissa tuloksissa keskiarvotettu vähintään viiden päivän jaksolta. Näin toisaalta pyritty järjeistämään mallin tuottamaa datamäärää sekä toisaalta vähentämään reuna-arvojen yksittäisten virheiden vaikutusta lopputulokseen. Keskiarvotuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että hetkelliset ääriarvot voivat poiketa suurestikin lasketusta keskiarvosta. Laskentatuloksista on esitetty myös edustavista pisteistä lämpötilan aikasarjat, joista näkyy laskentatulosten vaihteluväli sekä hetkelliset ääriarvot.

7.2. Mallin kehitystarpeita

Vesistömallinnuksen sovelluksissa on yleensä aina kehittämisen varaa. Fennovoiman mallisovelluksissa näitä kehityskohteita voisivat tulevaisuudessa tarkempia arvioita tehtäessä olla ainakin seuraavat asiat:

- Useamman laskentavuoden käyttäminen (esim. 5 eri laskentavuotta), jolloin saadaan tietoa mallin toiminnasta eri olosuhteissa ja lämpöpäästön leviämisestä erilaisissa kerrostumis- ja lämpötilaolosuhteissa.
- Aallokon vaikutusten huomioiminen. Aallokon pintakerrosta sekoittavia vaikutuksia ei ole tässä mallissa eksplisiittisesti huomioitu. Tämä saattaa vaikuttaa veden pintakerroksen sekoittumiseen lämpöpäästön läheisyydessä.
- Ilmakehän stabiilisuuden huomioon ottaminen lämmönvaihdon laskennassa. Tällä saattaa olla joissakin tilanteissa vaikutusta siihen, kuinka nopeasti lämpö siirtyy vedestä ilmaan.
- Veden ja ilmakehän lämmönvaihdon tarkempi laskenta tilanteissa, joissa lämpöpäästö veteen vaikuttaa ilman käyttäytymiseen.
- Turbulenssilaskennan tarkentaminen siten, että kineettisen energian ja dissipaation kulkeutuminen horisontaalisuunnassa otetaan huomioon.
- Tarkemmat tiedot paikallisista tuuliolosuhteista, esimerkiksi ottamalla tuulitiedot jostakin tiheän tarkkuuden (esimerkiksi 5 km) meteorologisesta mallista. Tämä saattaisi parantaa mallinnustuloksia tilanteissa, joissa esiintyy merituulta.
- Paremmat syvyystiedot otto- ja poistopaikkojen läheltä. Edellyttää merikortin tietojen täydentämistä lisämittauksilla.

Useampaa laskentavuotta käyttämällä mallin käyttäytymisestä erilaisissa sääoloissa saa paremman kuvan. Laskentaan valittu vuosi 2003 oli veden lämpötilamittausten mukaan lämpimin vuosi; korkeimmat veden lämpötilat saavutettiin todennäköisesti vuoden 2003 simuloinneissa.

Mallilaskennan kehityskohteiden (aallokon vaikutus, ilmakehän stabiilisuus ja lämmönvaihto ilmakehän kanssa, turbulenssilaskennan tarkentaminen) toteuttaminen puolestaan parantaisi todennäköisesti mallituloksia, mutta yksittäisen kehityskohteen toteuttaminen ei oletettavasti muuta tuloksia merkittävästi. Mallituloksissa nämä laskennan kehityskohteet vaikuttavat lisäksi pääasiassa pintavettä jäähdyttävästi.

Tuulitietojen tarkentaminen vaikuttaa virtaussuuntiin ja -nopeuksiin. Mikäli tuulitiedot muuttuvat oleellisesti, myös veden liikkuminen alueella ja siten myös lämpöpäästön leviäminen muuttuu. Laskennassa on käytetty tuulitietoina kohdealuetta lähintä sääasemaa, jolta tarvittavat meteorologiset tiedot ovat olleet saatavilla, joten tuulitietojen merkittävä muuttuminen ei ole todennäköistä. Syvyystieto- ja tarkentamalla mallin luotettavuus paranee, kun syvyystietojen tiedetään olevan oikeita. Syvyyksien pienillä muutoksilla on kuitenkin harvoin merkittävää vaikutusta mallituloksiin otto- ja poistokanavaa sekä kanavien välitöntä lähialuetta lukuun ottamatta.

8. Lähdeluettelo

Elo P.A-R, 2007, The energy balance and vertical thermal structure of two small boreal lakes in summer, *Boreal Environmental Research* 12:585-600

Hunke E. and Libscomb W, 2008, CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software Users Manual, Version 4.0, <http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE>

Koponen J., Kummu M., Lauri H., Virtanen M., Inkala A., Sarkkula J., Suojanen I., Veijalainen N., 2008, EIA 3D Model Manual, <http://www.eia.fi/wup-fin/training/manuals.html>

Koponen J, Alasaarela E., Lehtinen K., Sarkkula J., Simbierowitz P, Vepsä H., Virtanen M, 1992, Modelling the dynamics of a large sea area, Bothnian Bay Research Project 1988-1990, Publications of the Water and Environment Research Institute 7:1-91, National Board Of Waters and the Environment, Helsinki, Finland

Lauri H., 2008, Virtausmalli Ruotsinpyhtään edustalle lämpöpäästöjen leviämisen arviointiin, YVA Oy:n tutkimusraportti Fennovoima Oy:lle.

Merenkulkulaitos, 2008, digitaalinen kartta-aineisto, © Merenkulkulaitos, lupa nro /721/200

NCEP 2008, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis data set, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis2/>

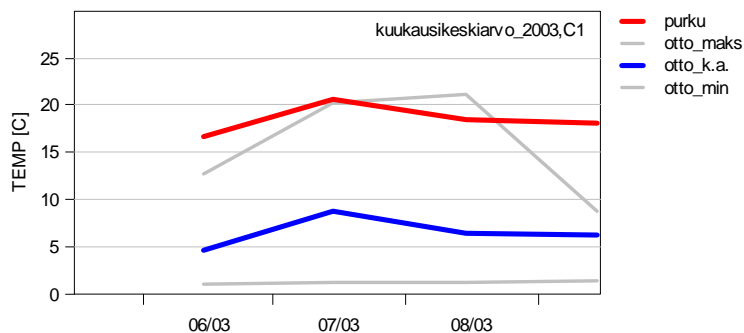
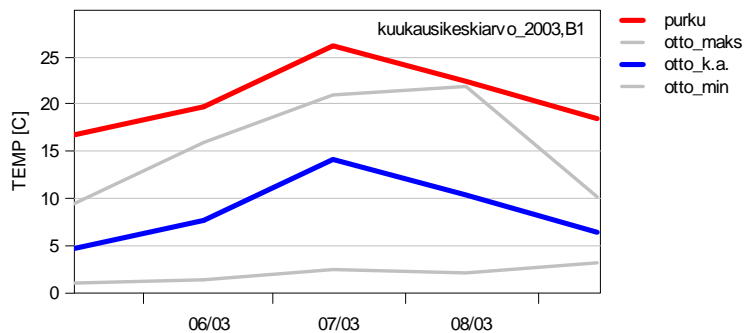
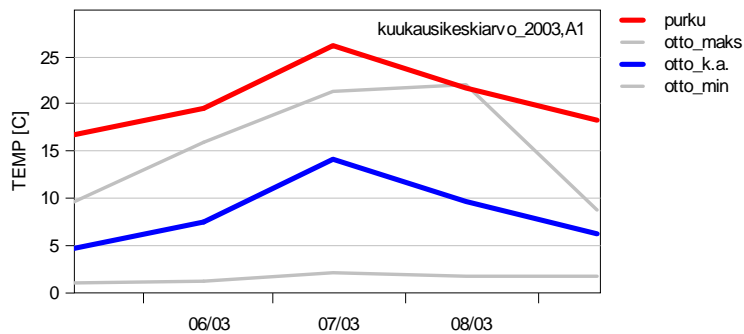
Olsonen, R. (ed.) 2007: FIMR monitoring of the Baltic Sea environment : Annual report 2006. - Meri - Report Series of the Finnish Institute of Marine Research no. 59. - 113 pp.

Umlauf L, Burchard H., Bolding K., 2006, GOTM (General Ocean Turbulence Model), Source code and Documentation, version 4.0, <http://www.gotm.net>

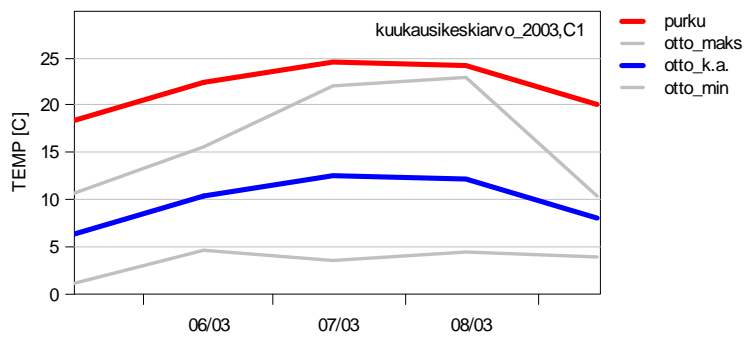
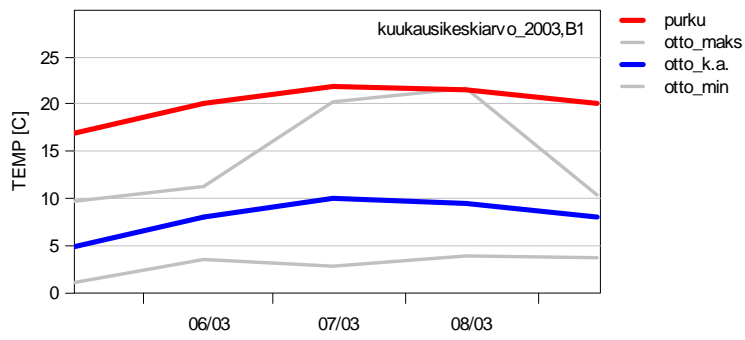
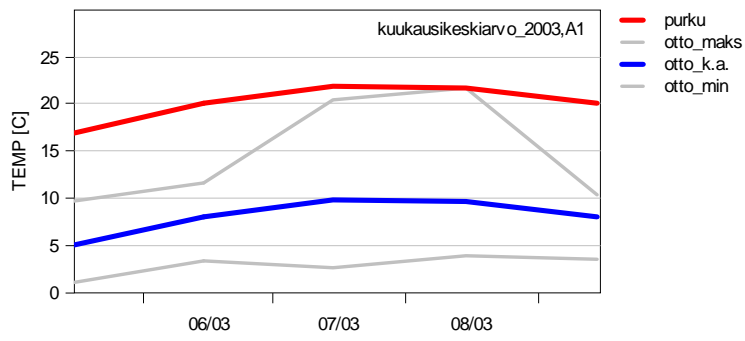
Fennovoiman voimalaitosyksiköiden ottolämpötilojen kuukausikeskiarvot paikkakunnittain

Alla on esitetty Fennovoiman voimalaitosyksiköiden ottolämpötilojen kuukausikeskiarvot kuvaajina. Kullekin sijoituspaikalle on esitetty lämpötilat yhden voimalayksikön tapaukselle eri otto- ja purku-paikkajärjestelyille. Kesä-, heinä- ja elokuun lämpötilat on laskettu koko kuukauden keskiarvosta, touko- ja syyskuun lämpötilat 15 päivän jaksolta. Nämä eivät vastaa koko kuukauden keskilämpötiloja.

Simo



Pyhäjoki



Ruotsinpyhtää

