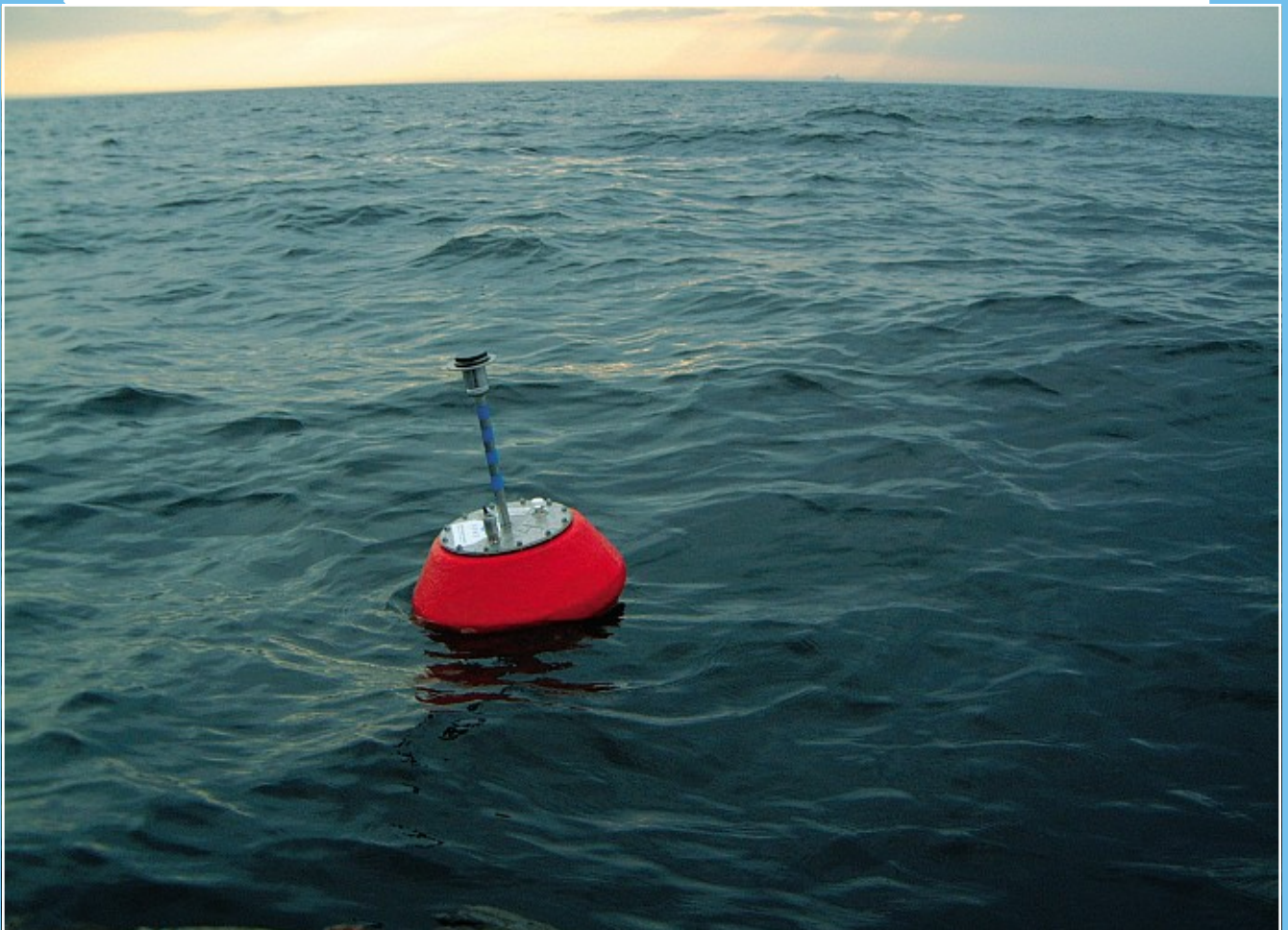


YMPÄRISTÖN-
SUOJELU

Maria Gästgifvars, Annakaisa Sarkanen, Mikael Frisk,
Hannu Lauri, Kai Myrberg, Pekka Alenius, Oleg Andrejev,
Ossi Mustonen, Heli Haapasaari ja Alexander Andrejev

Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisen suunnusteet Suomenlahdella



Maria Gästgifvars, Annakaisa Sarkanen, Mikael Frisk,
Hannu Lauri, Kai Myrberg, Pekka Alenius, Oleg Andrejev,
Ossi Mustonen, Heli Haapasaari ja Alexander Andrejev

Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisen suunnusteet Suomenlahdella

HELSINKI 2004

Julkaisu on saatavana myös Internetissä
www.ymparisto.fi/julkaisut

ISBN 952-11-1807-5 (nid.)
ISBN 952-11-1808-3 (PDF)
ISSN 1238-7312

Kannen kuva: Maria Gästgifvars

Paino Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2004

Alkusanat

Vuosina 2002-2003 on toteutettu hanke ”Suomenlahden mallien hyödyntäminen operatiivisessa öljyntorjunta ja meripelastustoiminnassa”, jonka päätuloksena Suomenlahdelle on kehitetty ja otettu käyttöön operatiivinen kulkeutumisennustejärjestelmä nimeltä OpHespo, jolla on mahdollista ennustaa öljyn tai ajelehtivien kappaleiden kulkeutumista. Laskentaa voidaan tehdä avomerialueen lisäksi Helsingin ja Espoon pienipiirteisessä saaristossa. Osana hanketta merellä tehtiin ajelehtimiskokeita, joissa kerättiin aineistoa useiden eri ennustemallien verifiointiin ja harjoiteltiin samalla kulkeutumislaskentaohjelmien operatiivista käyttöä. Tuolloin toteutetuista ajelehtimiskokeista päätettiin laatia tämä julkaisu, jossa esitellään ajelehtimiskokeiden toteutus, kulkeutumislaskentoja sekä luodaan katsaus kulkeutumislaskentaohjelmiin, joita hankkeessa mukana olleet tahot käyttävät tutkimukseen tai viranomaistoimintaan.

Operatiivisten kulkeutumisennusteohjelmien kehittäminen Itämerelle on alkanut 1990-luvun alussa (mm. Hirvi 1995), jolloin myös Itämeren suojelukomissio nosti esille tarpeen kehittää operatiivinen kulkeutumisennusteohjelma Itämerelle mahdollisten öljyonnettomuuksien varalta. Tuolloin annettu suositus (HELCOM 1991) on pantu täytäntöön ja kulkeutumislaskentaohjelmien edelleen kehittämiseksi on laadittu suositus (HELCOM 2003), jossa yhdeksi tavoitteeksi on asetettu, että laskentaohjelmien toimivuutta rannikon läheisyydessä tulisi parantaa. Toivottavasti tämä julkaisu osaltaan kannustaa edelleen kehittämään Suomen vesialueille soveltuvia ennusteohjelmia sekä jatkamaan niiden verifiointia.

”Suomenlahden mallien hyödyntäminen operatiivisessa öljyntorjunta ja meripelastustoiminnassa” -hankkeen ohjausryhmän puheenjohtajana on toiminut Kalervo Jolma Suomen ympäristökeskuksesta. Ohjausryhmän jäseninä ovat vaikuttaneet Matti Perttilä Merentutkimuslaitokselta, Juha Kilpinen Ilmatieteen laitokselta, Petteri Leppänen Suomenlahden merivartiostosta, Alpo Varila Espoon kihlakunnan poliisilaitokselta, Hannu Holmberg Helsingin kihlakunnan poliisilaitokselta Venepoliisista, Rami Ruuska Sisäministeriön pelastusosastolta, Timo Heino Uudenmaan ympäristökeskuksesta, Hannu Ennevaara Helsingin pelastuslaitokselta, Veijo Nuppola Länsi-Uudenmaan pelastuslaitokselta, Arto Inkala Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy:stä ja Klaus Martonen Suomenlahden merenkulkupiiristä. Hankkeen valvoja Jouko Vuoristo Merenkululaitoksesta on osallistunut aktiivisesti ohjausryhmätyöskentelyyn. Hankkeen vetäjä Maria Gästgifvars Suomen ympäristökeskuksesta on toiminut ohjausryhmän sihteerinä.

Projektin toteutukseen ovat lisäksi osallistuneet Hannu Lauri ja Jorma Koponen Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy:stä, Kai Myrberg ja Pekka Alenius Merentutkimuslaitokselta, Annakaisa Sarkanen Ilmatieteen laitokselta, Heli Haapasaari ja Juha Sarkkula Suomen ympäristökeskuksesta, Juha-Pekka Lassila Helsingin kaupungin pelastuslaitokselta, Ossi Mustonen Suomenlahden merivartiostosta, Veli-Pekka Ihamäki ja Kimmo Markkanen Länsi-Uudenmaan pelastuslaitoksesta sekä vartiolaiva Tavin miehistö. Virossa keskeisin yhteistyötaho on ollut Estonian Marine Systems Institute.

Hankkeen rahoittajia olivat Etelä-Suomen rannikkoseudun Interreg IIIA – ohjelma, Merenkulkulaitos, Helsingin kaupungin pelastuslaitos sekä Länsi-Uudenmaan aluepelastuslaitos. Ajelehtimiskokeiden toteutukseen rahoitusta myönsi Liikenne- ja viestintäministeriö.

Tutkimusalus Arandan ajelehtimiskoematkan 13.-15.5.2003 matkanjohtaja oli Matti Perttilä ja retkikuntaan kuuluivat Pirkko Lemponen, Pekka Punakivi ja Henry Söderman Merentutkimuslaitokselta, Juha Kilpinen Ilmatieteen laitokselta ja Arto Inkala Suomen ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy:sta. Kokeissa käytettyjen Current Spy –poijujen kehittäjä Jari Vilén sekä Arto Paananen Pirkanmaan ympäristökeskuksesta olivat osa retkikuntaa. He ovatkin olleet korvaamattomia poijujen käsittelijöitä sekä merellä että maalla. Tutkimusmatkaan osallistuivat lisäksi julkaisun kirjoittajat lukuun ottamatta Mikael Friskiä ja Hannu Lauria. Aluksen miehistö ja pajan kaverit hoitivat osaltaan mainiosti poijujen käsittelyn, niiden seurannan ja etsinnät välillä vaativiksikin muuttuneissa meriolosuhteissa. Carl Bogel Turun meripelastuskeskuksesta toimitti tutkimusmatkalle mukaan meripelastuskeskuksessa kehitettyjä virtausmittauspoijuja.

Julkaisun syntyä edesauttoivat Inkeri Salonen ja Kari Ahti Ilmatieteen laitokselta laatimalla Ilmatieteen laitoksen laskentaohjelmalla kulkeutumisenusteita. Ilkka Juga Ilmatieteen laitokselta teki yhteenvedon säätilanteesta. Tarmo Kõuts Estonian Marine Systems Institutesta toimitti Viron vedenkorkeushavainnot. Saara Bäck SYKEstä paransi huomioillaan julkaisun luettavuutta. Asiantuntijalausunnot käsikirjoituksesta antoivat professori Mikko Alestalo Ilmatieteen laitokselta sekä professori Matti Leppäranta Helsingin yliopiston Fysikaalisten tieteiden laitokselta. Heidän lausuntojensa perusteella tämä työ tarkentui ja hioutui lopulliseen muotoonsa.

Lämpimät kiitokset kirjoittajien puolesta kaikille julkaisun valmistumiseen myötävaikuttaneille, kehittämishankkeeseen osallistuneille sekä rahoittajille.

Sisällys

Alkusanat	3
1. Johdanto	7
2. Ajelehtimiskokeet ja sää	8
2.1 Ajelehtivat esineet	8
2.2 Tuuli havaintoasemilla	13
2.3 Säätila ennen kokeita	14
2.4 Koepäivä 13.5.2003	15
2.5 Koepäivä 14.5.2003	16
2.6 Koepäivä 15.5.2003	18
3. Suomenlahden veden liikkeit	20
3.1 Vedenkorkeus	20
3.2 Virtauksiin vaikuttavat tekijät	21
3.3 Virtausten voimakkuus	22
3.4 Aallokko	22
3.5 Virtauksen mittaus pintavirtauspoijuilla	23
4. Sääennusteet	25
4.1 Sääennusteen päivitys	25
4.2 Erot sääennusteissa 14.5.2003	25
4.3 Tuuliennusteet koepäivinä	28
5. Kulkeutumislaskentaohjelmat	30
5.1 Ohjelmatyypit	30
5.2 Sea Track Web	31
5.3 OpHespo	31
5.4 Merentutkimuslaitoksen 3D-malli	32
5.5 Merentutkimuslaitoksen pintakulkeutumismalli	33
5.6 Ilmatieteen laitoksen pintakulkeutumismalli	33
5.7 Rajavartiolaitoksen pintakulkeutumismalli	34
6. Virtausennusteet	35
6.1 Simuloidut virtaussuunnat ja poijujen liikesuunta	35
6.2 Simuloidut virtausnopeudet ja poijujen liikenopeus	35
7. Kulkeutumislaskennat	37
7.1 Kulkeutumislaskennan periaatteita	37
7.2 3D-simuloinnit ja eri tuuliprosentit laskennassa	38
7.3 Pintakulkeutumislaskennat eri tuulitietoja käyttäen	40
7.4 Aaltojen vaikutus	42
7.5 3D-simuloinnit eri tuuliennusteilla	43
7.6 Yli vuorokauden pituinen laskenta	44
7.7 Tuulihavainnot mukana laskennassa	44
7.8 Etsintätilannetta kuvaavat laskennat	45

8. Yhteenveto	47
8.1 Poijujen käytettävyys ajolehtimiskokeissa	47
8.2 Tuulihavainnot kulkeutumislaskelmissa	48
8.3 Tuuliennusteet kulkeutumislaskelmissa	48
8.4 Kulkeutumislaskentojen osuvuus	49
9. Johtopäätökset	51
Lähteet	53
Kuvailulehdet	55

Johdanto



Öljyntorjuntatoimenpiteiden suunnittelun ja merellä tehtävien etsintöjen tueksi on kehitetty tietokoneohjelmia, joilla voidaan laskea meressä ajelehtivan öljyn, kemikaalien tai esineiden liikeratoja. Kulkeutumiseen keskeisimmin vaikuttavat tekijät ovat vallitsevat tuulet ja veden virtaukset, jotka molemmat otetaan kulkeutumislaskennoissa mahdollisimman hyvin huomioon. Osa ohjelmista on operatiivisia, eli ne ovat päivystävien viranomaisten käytettävissä välittömästi, kun merellä tapahtuu onnettomuus tai havaitaan öljypäästö. Lisäksi käytettävissä on tutkimus- ja kehitystyötä palvelevia laskentaohjelmia, joilla voidaan jälkikäteen laskea tiettyyn kulkeutumistapaukseen liittyviä ajelehtimisarvioita.

Kulkeutumisennusteita käytetään öljyntorjunta- ja etsintätehtävissä. Suomen merialueen valvontalennoilla on havaittu vuosittain useita kymmeniä öljypäästöjä, joista osa on niin suuria, että ne edellyttävät torjuntatoimia. Kulkeutumisennusteita lasketaan myös öljyntorjuntaharjoitusten yhteydessä sekä uponneiden tai karille ajaneiden laivojen pelastusoperaatioihin liittyen, kun öljyä on päässyt tai on vaarassa että mereen pääsee öljyä. Rajavartiolaitoksella on vuosittain saaristossa tai avomerialueella erilaisia etsintätehtäviä noin 200-300, joista avomerellä tapahtuvia etsintä- ja pelastustehtäviä on noin 100.

Operatiivisessa öljyntorjuntatoiminnassa tarvitaan riittävän pitkiä, vähintään yhden tai kahden vuorokauden mittaisia, luotettavia ennusteita siitä, mihin meressä oleva öljy todennäköisimmin on ajautumassa. Kulkeutumisennustetiedot ovat käyttökelpoisia muun muassa silloin, kun öljyntorjunnasta vastuussa olevat viranomaiset päättävät mihin torjuntatoimenpiteet merellä suunnataan. Merialueella toteutettavia etsintöjä varten tarvitaan lisäksi hyvin lyhyitä muutaman tunnin ennusteita, joilla saadaan riittävästi rajoitettua etsintäalueen kokoa.

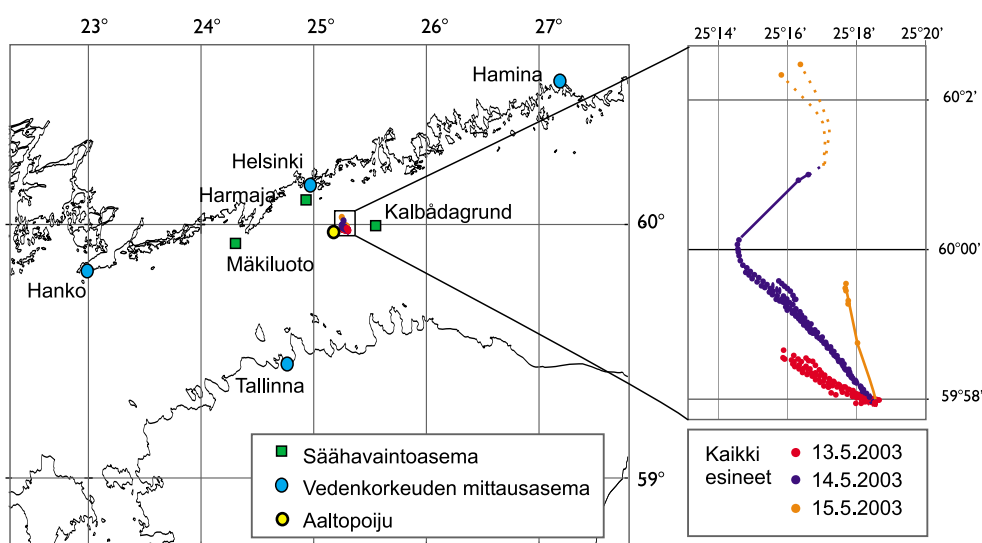
Kulkeutumislaskentaohjelmien laskentatulosten varmentamista on mahdollista tehdä ajelehtimiskokeilla, joissa meren pinnalla ajelehtivan kappaleen kulku-reitti rekisteröidään ja verrataan laskettua ajelehtimisreittiä havaittuun ajelehtimiseen. Ajelehtimiskokeissa käytetään tarkoitukseen sopivia poijuja, muita esineitä tai merkkiainetta. Pirkanmaan ympäristökeskuksessa on kehitetty Current Spy –poijut, jotka on suunniteltu siten, että ne kuvaisivat meressä ajelehtivan öljylautan massakeskipisteen liikettä. Poijuilla on tehty ajelehtimiskokeita Suomenlahdella vuosina 2002 ja 2003.

Toukokuussa 2003 toteutettiin Suomenlahdella Helsinki-Tallinna laivaväylän itäpuolella kolmipäiväinen tutkimusmatka, jonka aikana tehtiin useita, eripituisia ajelehtimiskokeita. Tavoitteena oli kerätä aineistoa pintavirtauksen mukana ajelehtimaan laskettujen kappaleiden liikkeestä ja verrata havaintoaineistoja kulkeutumislaskentoihin. Tässä raportissa on yhteenveto ajelehtimishavaintoaineistosta, eri kulkeutumislaskentaohjelmilla laaditut kulkeutumisennusteet sekä arvioita ennusteiden osuvuudesta ja mallien käyttökelpoisuudesta erilaisissa säätilanteissa. Lisäksi on analysoitu ajankohdan sää- ja virtausolosuhteita sekä sääennusteita, joita käytettiin kulkeutumislaskennoissa.

2

Ajelehtimiskokeet ja sää

Tutkimusalue valittiin Helsinki-Tallinna laivaväylän itäpuolelle pisteen $59^{\circ} 57,96' N$, $25^{\circ} 18,52' E$ ympäristöön. Jokaisena koepäivänä 13.-15.5.2003 laskettiin tutkimusalue Arandalta käsin esineitä mereen mainitusta pisteestä. Ajelehtimisen kesto vaihteli kokeissa alle tunnista yli vuorokauden pituiseen jaksoon (Taulukko 1). Esineiden reitit eli trajektorit on koottu Kuvaan 1.



Kuva 1. Tutkimusalue Suomenlahdella ja ajelehtivien kappaleiden reitit 13.-15.5.2003.

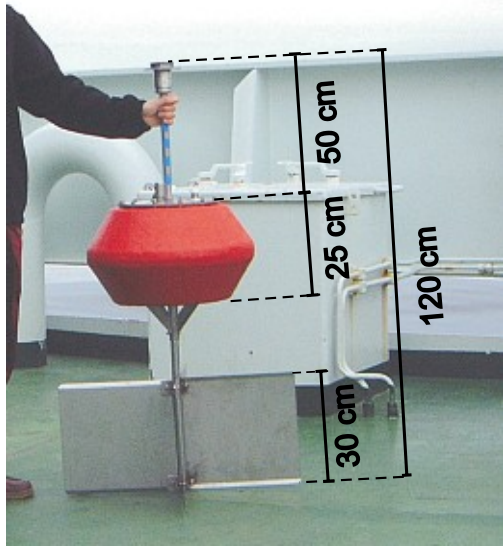
2.1 Ajelehtivat esineet

Tässä tutkimuksessa käytetyt ajelehtivat esineet olivat seuraavia:

- Current Spy -poiju, 5 kpl
- Man over board drift buoy -poiju, (MOBDB), 2 kpl
- Merivartioston harjoitusnukke, 1 kpl
- PIR-pintavirtauspoiju, 6 kpl
- Järvipoiju, 1 kpl

Current Spy -poijuja (Kuvat 2 ja 3) on valmistettu Pirkanmaan ympäristökeskuksessa Suomen ympäristökeskuksen ja Merentutkimuslaitoksen tilauksesta viisi kappaletta. Ne olivat toukokuun 2003 kokeessa ensimmäisen kerran käytössä merellä. Poijujen ulkokuori on lasikuitua ja alaosassa on teräksinen ristikko, jonka neljä siipeä ovat kooltaan $30 \times 30 \text{ cm}^2$. Ristikko varmistaa poijun pystyssä pysymisen ja tasapainottaa poijun vesi-ilma -suhdetta eli sitä osuutta, joka poijusta on veden pinnan ylä- ja alapuolella. Poijut liikkuvat n. 0,7 m syvyisen pintavirtauskerroksen ohjaamina ja niiden paino on noin 13 kg.

Current Spy -poijut tallettavat GPS-paikkatietonsa säännöllisesti halutuun väliin poijun muistiin. Lisäksi poiju lähettää aika-ajoin paikkatiedot GSM:n välityksellä valinnaisesti sähköpostiin ja/tai matkapuhelimeen tekstiviestinä. Poijuissa on ladattava akku. Virrankulutus on riippuvainen valitusta tietojen tallennusvälistä ja tiedonvälitystiheydestä.



Kuva 2. Current Spy -poiju.

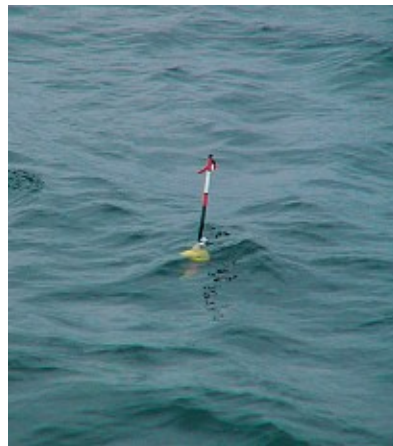


Kuva 3. Current Spy meressä.

MOBDB-poijut Kuvissa 4 ja 5 ovat Turun meripelastuskeskuksessa suunniteltuja poijuja, jotka ovat tarkoitettuja pidettäväksi vedessä lyhyen aikaa – alle 30 min, jotta voidaan määrittää hetkellinen pintavirtaus. Poijut ovat kooltaan hyvin pieniä ja kevyitä (noin 1 kg). Poijun kokonaiskorkeus on noin 50 cm, josta havaintoviirin osuus on noin 20 cm. Vedenpinnan yläpuolelle jää paristosta virtansa saava valo, joka helpottaa poijun havaitsemista hämärässä. Poijuun on kiinnitetty Kuvassa 4 näkyvä virtauspussi, joka asettuu lyijypainon avulla haluttuun syvyyteen.



Kuva 4. MOBDB-poiju.



Kuva 5. MOBDB meressä.

Kokeessa oli mukana myös kelluvasta narusta tehty ihmisen kokoinen nukke (Kuva 6), jota Rajavartiolaitos käyttää pelastusharjoituksissa. Nukke kellui pinnalla ja pelastustakilla oli hieman purjevaikutusta. Nukke ei kuitenkaan vastaa täysin vedenvaraansa joutuneen ihmisen ajelehtimista, sillä ihminen voi uida, tai ihmisen asento voi vedessä poiketa nukken asennosta.

Pirkanmaan ympäristökeskuksessa valmistetut PIR-poijut Kuvassa 7 soveltuivat meren virtauksen määrittämiseen halutuilta syvyyksiltä. PIR-poijuissa on pinnassa pieni poiju, jonka alaosaan kiinnitetään narulla metrin korkuinen ja halkaisijaltaan 60 cm oleva lieriöpussi syvyyteen, jolta veden virtausnopeus ja -suunta halutaan määrittää. Kokeessa kuuden poijun lieriöpussit asennettiin pareittain syvyyksiin: 0-1 m, 2-3 m ja 4-5 m.

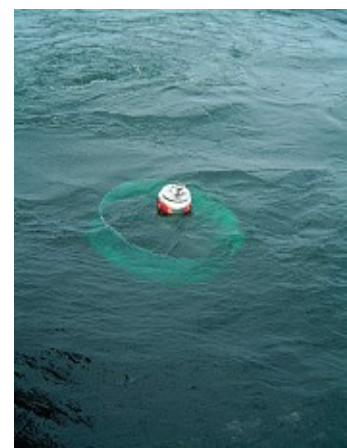


Kuva 6. Kapteeniluutnanttinukke kannella.



Kuva 7. PIR-poijut.

Järvipoiju on Jyväskylän yliopiston omistama Pirkanmaan ympäristökeskuksessa järviolosuhteisiin kehitetty poiju, jonka ulkokuori on ruostumatonta terästä. Teräskuoren halkaisija on 45 cm. Poijussa on GPS-GSM paikannus- ja tiedonvälityslaitteisto. Poijun noin 10 cm korkea antenni on riittävä Sisä-Suomen järvillä, jossa GSM-verkon kattavuus on parempi ja myös olosuhteet ovat usein helpommat kuin merellä. Poiju otettiin kuitenkin koeluontoisesti mukaan merellä tehtävään kokeeseen. Siihen kiinnitettiin 60 cm korkea ja halkaisijaltaan 2 m kokoinen vedenalainen lieriö, jotta se mittaisi pintavirtausta ja pysyisi vedessä oikein päin (Kuva 8). Vain hyvin pieni osa poijusta jäi meressä vedenpinnan ylläpuolelle, joten tuulen suora vaikutus poijun kulkeutumiseen oli merkityksetön.



Kuva 8. Järviolosuhteisiin tarkoitettu pintavirtauspoiju.

Kuvattujen esineiden annettiin ajelehtia meressä eri pituisia jaksoja. Yhteenveto ajelehtimistapauksista on esitetty Taulukossa 1. Ajelehtimiskokeet kuvataan tarkemmin kappaleissa 2.4 -2.6.

Taulukko I. Ajelehtimiskokeet toukokuussa 2003.

Koe nro	Ajelehtiva esine	Koepäivä	Ajelehtimisen kesto	Kulkeutumismatka
1	Nukke	13.5.	53 min	500 m
2	MOBDB-1	13.5.	46 min	300 m
3	MOBDB-2	13.5.	49 min	400 m
4	Current Spy:t nro 1-5	13.5.	5 h 15 min - 5 h 20 min	2,4-3 km
5	Current Spy:t nro 1-3	14.5.	14 h 15 min	7,8 km
6	Current Spy:t nro 4,5	14.5.-15.5.	31 h 45 min	yli 11 km, mutta tarkka matka ei ole tiedossa
7	Järvipoiju	14.5.	9 h	n. 4,3 km
8	PIR-pojjut	15.5.	6 h 40 min - 6 h 50 min	2,8 - 3,1 km
9	Current Spy:t nro 1-3	15.5.	6 h 30 min - 6 h 40 min	2,9 - 3,0 km

Kokeisiin valittiin ajelehtimaan erilaisia esineitä, sillä niiden havainnointi ja kokeen toteutus on yksinkertaisempaa kuin käytettäessä veteen päästettävää merkkiainetta. Aikaisemmin Pohjanlahdella on toteutettu ajelehtimiskokeita raskaalla vaahdolla ja painotetuilla styroksilautoilla (Koponen et al. 1994). Veteen sekoittuva merkkiaine saattaa joissakin tilanteissa kuvata paremmin vedessä olevan öljyn tai kemikaalin leviämistä ja veteen sekoittumista kuin pinnalla olevat esineet. Itämerellä merkkiainetta käyttäen ajelehtimiskokeita on tehty aikaisemmin ainakin Puolassa (Gajewski & Gajewski 1997; Gajewski et al. 1999) ja Suomessa (Salo 2000).

Erityyppisten poijujen kykyä kuvata ympäröivän veden tai vedessä olevan öljyn liikettä on tutkittu aikaisemmin. Erilaisten pintapojujen kulkeutumista ovat vertailleet Mackas & Crawford (1989). Muutamissa kokeissa öljyä on laskettu veteen yhdessä pintakulkeutumispojujen kanssa. Poijujen liike suhteessa öljyyn on ollut vaihteleva riippuen poijun ja öljyn ominaisuuksista sekä sääolosuhteista (Aamo & Jensen 1997; Reed et al. 1991; Reed et al. 1994).

Veden ja tuulen kelluvaa kappaletta liikkeelle paneva voima

Current Spy -poijut ovat osittain vedenpinnan yläpuolella ja osittain alapuolella. Näin ollen niihin vaikuttaa osin tuulen ja osin veden virtauksen dynaaminen paine P sekä voima F. (Huttula 2002)

$$P = (v^2 \cdot D \cdot L) \cdot C_D$$

$$F = P \cdot A$$

missä:

P kappaleeseen kohdistuva tuulen tai veden virtauksen aiheuttama dynaaminen paine (N/m²)

v veden tai ilman virtausnopeus (m/s)

D veden tai ilman tiheys (kg/m³)

L kappaleen pituus virtauksen suuntaisesti (m)

C_D muotoparametri eli kitkaparametri, joka riippuu kappaleen muodosta ja Reynoldsin luvusta

A kappaleen kohtisuoraa voimaa vasten oleva pinta-ala (m²)

Kappaleeseen kohdistuvien hitausvoimien eli tässä virtausvoimien ja kitkavoimien suhdetta kuvaava

Reynoldsin luku N_R määritellään seuraavasti:

$$N_R = D \cdot v \cdot L / \mu$$

missä :

μ veden tai ilman viskositeetti (kg m⁻¹ s⁻¹)

Tarkastellaan Current Spy -poijuun kohdistuvien tuulen ja veden virtauksen aiheuttamien voimien suhdetta. Poijun kelluessa ilmassa ja vedessä olevien pinta-alojen suhde on 1:4, kun oletetaan että poijun alaosassa oleva ristikko on Kuvan 9 mukaisesti kohtisuorassa virtausta vasten. Kun tuulen nopeus on 2-10 m/s ja veden virtausnopeus 1-3 % tuulesta, niin poijulle pätee $10\,000 < N_R < 150\,000$. Kun tuulen nopeus kasvaa yli 12 m/s, niin ilmassa $N_R > 300\,000$, jolloin pallon muotoisen kappaleen kitkaparametri pienenee. Current Spy:n pallo ja ristikko-osille määritetään erikseen kitkaparametrit, joille käytetään seuraavia arvoja (Hughes et al. 1999):

$$C_{D \text{ ristikko}} = 1,18$$

$$C_{D \text{ pallo}} = 0,47 \quad \text{kun } 1000 < N_R < 300\,000$$

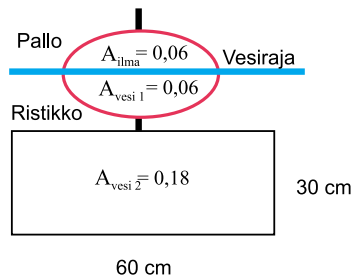
$$C_{D \text{ pallo}} = 0,20 \quad \text{kun } N_R > 300\,000$$

Poijun veden yläpuoliseen osaan kohdistuu tuulen aiheuttama voima ja alapuoliseen veden voima. Taulukosta 2 nähdään, että voimien suhde $F_{\text{vesi}}/F_{\text{tuuli}}$ on riippuvainen veden ja tuulen nopeudesta. Virtaava vesi vaikuttaa Current Spy:n liikkeeseen voimakkaammin kuin tuuli veden pintavirtausnopeuden ollessa 1,2 - 3 % tuulesta. Tällöin suhdeluku $F_{\text{vesi}}/F_{\text{tuuli}}$ on suurempi kuin yksi. Tuulen vaikutus poijun liikkeeseen on suurempi kuin veden, mikäli tuulen nopeus on 10 m/s tai sen alle ja veden pintavirtausnopeus alle 1,2 % tuulesta.

Taulukko 2. Tuulen ja veden virtauksen Current Spy -poijuun kohdistamien samansuuntaisten voimien suhde $F_{\text{vesi}}/F_{\text{tuuli}}$.

Tuuli [m/s]	$F_{\text{vesi}}/F_{\text{tuuli}}$				
	kun $v_{\text{vesi}} = 3\% \cdot v_{\text{tuuli}}$	kun $v_{\text{vesi}} = 2\% \cdot v_{\text{tuuli}}$	kun $v_{\text{vesi}} = 1,2\% \cdot v_{\text{tuuli}}$	kun $v_{\text{vesi}} = 1,1\% \cdot v_{\text{tuuli}}$	kun $v_{\text{vesi}} = 1\% \cdot v_{\text{tuuli}}$
12	17	7	2,6	2,1	1,8
10	7	3	1,1	0,9	0,8
2	7	3	1,1	0,9	0,8

Poijun nopeus määrytyy siis ensisijaisesti veden virtausnopeuden perusteella. Tässä yhteydessä ei laskettu veden virtauksen aiheuttaman voiman ja tuulen aiheuttaman voiman yhteisvaikutusta poijun liikerataan eri suuntakulmilla. Selvä on, että voimien vaikuttaessa saman suuntaisina poijun liikenoisuus hiukan liioittelee veden virtausnopeutta. Virtaus aavalla merellä veden pinnan lähellä (esim. poijun sijainti kerroksessa 0-1 m) on erittäin harvoin täysin tuulelle vastakkainen, joten voimien vastakkaissuuntaista tapausta ei tarvitse huomioida. (Huttula 2004)



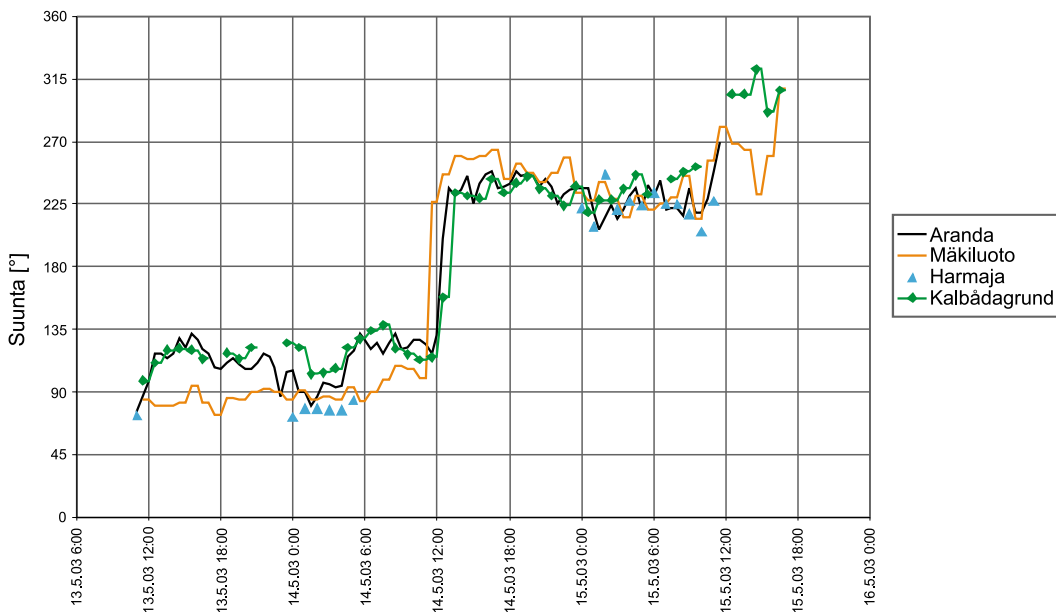
Kuva 9. Current Spy –poijun virtausta vasten kohtisuoraan olevan pinta-alan jakautuminen vedenpinnan ylä- ja alapuolelle.

2.2 Tuuli havaintoasemilla

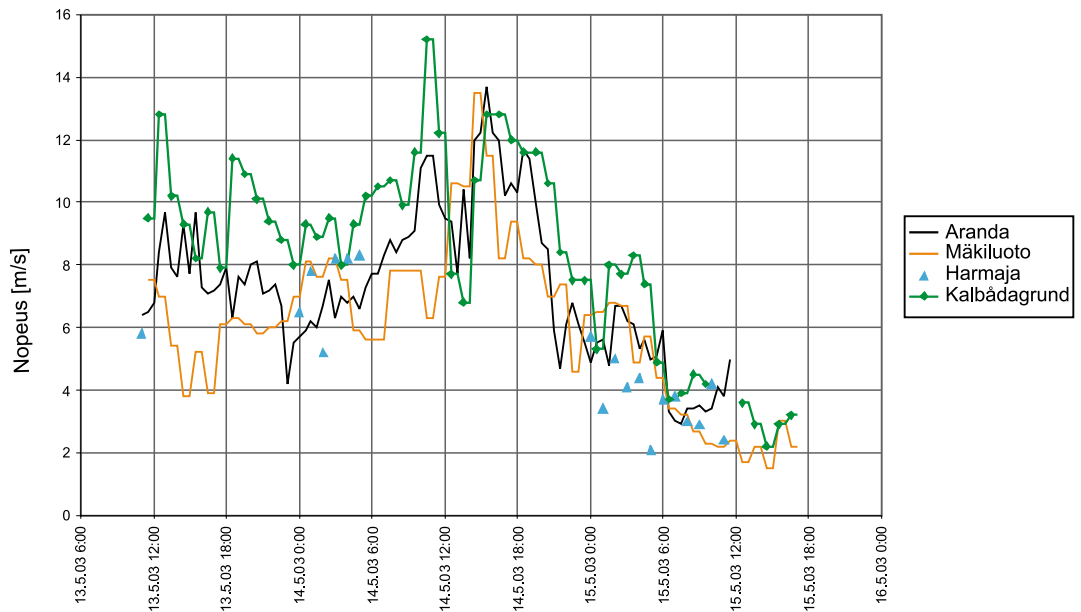
Kolmen Ilmatieteen laitoksen merisääaseman tuulihavaintoja on verrattu Arandal-la tehtyihin mittauksiin Kuvissa 10 ja 11, jotta nähdään eri mittausasemilla tehtyjen havaintojen erot ja se miten hyvin mittausasemien tuulet sopivat yhteen kesellä merta tehtyjen laivan tuulihavaintojen kanssa. Mittauksissa on merkittäviä eroja, joiden syitä esitetään jatkossa kappaleissa 2.4 - 2.6.

Mäkiluoto on havaintoasemista läntisin ja kaukaisin ollen noin 50 km päässä koealueelta (Kuva 1). Sen tuulimittari on 13 m korkean saaren korkeimmalla kohdalla, 18 m maanpinnan ja 31 m merenpinnan yläpuolella. Saarella on paikoin matalaa metsää ja 10–15 m korkeita rakennuksia, mutta sektorit niin itään kuin länsilounaaseenkin ovat suhteellisen esteettömät. Kalbädagrund on täysin merellinen mittausasema ja itäisin näistä kolmesta asemasta. Tuulimittari sijaitsee majakan katolla 32 m korkeudella. Harmajan etelän puoleinen sektori on esteetön tuulille ja tuulimittaus tapahtuu 17 m korkeudella merenpinnasta. Harmajan havaintoaseman tiedot valitettavasti puuttuivat osittain koejaksolta.

Arandalalla tuulimittari on 20 m korkealla. Laivan asento tuulen suuntaan nähdessä saattaa tietyissä tilanteissa vaikuttaa niin mitattuun tuulen suuntaan kuin sen nopeuteenkin. Laivan rungolla voi olla tuulen suuntaan ja nopeuteen joko lisäävä tai vähentävä vaikutusta. Tässä esitettyjä Arandan tuulihavaintoja ei ole muutettu laivan asennosta riippuen.



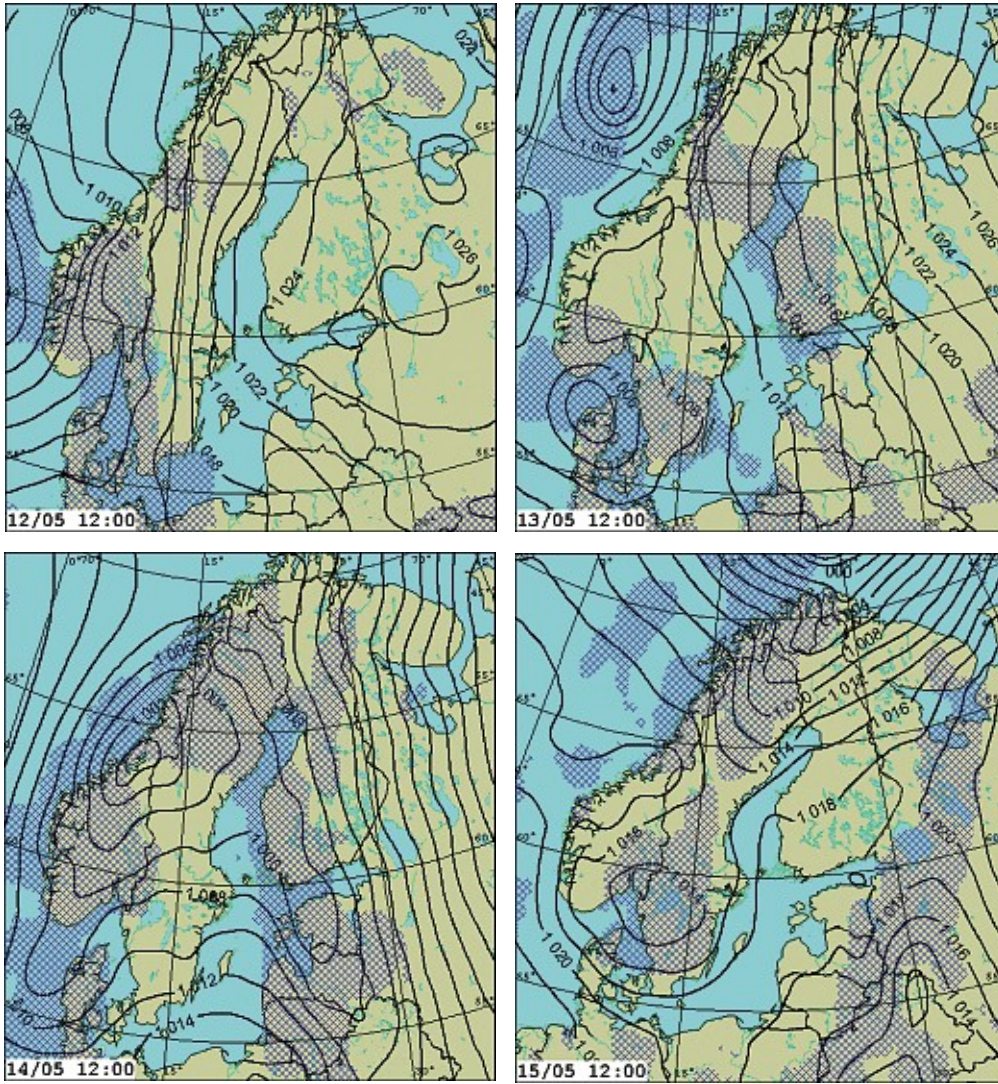
Kuva 10. Mitattu tuulen suunta Suomenlahdella 13.-15.5.2003.



Kuva 11. Mitattu tuulen nopeus Suomenlahdella 13.-15.5.2003.

2.3 Säätä ennen kokeita

Korkeapaineen keskus sijaitsi 11.5.03 Baltiassa ja Norjan-merellä oli matalapaine. Niiden vaikutuksesta tuulet puhalsivat lounaasta nopeudella 5-10 m/s. Korkeapaineen keskus liikkui 12.5. kohti Kuolan niemimaata (Kuva 12) ja samalla matalapaineen keskus siirtyi etelään. Aluksi lounaistuulen nopeus vaihteli 2-5 m/s välillä. Puolen päivän aikoihin korkeapaineen keskuksen mentyä koelueen yli tuuli kääntyi idän puoleiseksi ja vaihteli 2-6 m/s välillä.



Kuva 12. Pintapaine ja sadealueet Skandinaviassa 12.5.-15.5.2003 kunakin päivänä klo 12 UTC. (Ilmatieteen laitos)

2.4 Koepäivä 13.5.2003

Säätila

Suomen itäpuolella oli vahva korkeapaine. Etelä-Skandinaviassa, Tanskan tienoilta, sijaitsi matalapaine ja sadealue, joka oli hitaassa liikkeessä koilliseen (Kuva 12). Suomessa vallitsi melko lämmin idän ja kaakon välinen ilmavirtaus. Aamu oli poutainen ja näkyvyys merellä kohtalainen tai hyvä. Virosta nousi kuitenkin sadekuuroja Suomenlahdelle, ja ne olivat Helsingin edustalla noin kello 10–12. Iltapäivällä kuurot väistyivät ja sää poutaantui. Arandalla mitattuna tuuli puhalsi iltapäivällä pääosin idän ja kaakon väliltä nopeudella 8-10 m/s (Kuvat 10 ja 11). Illalla tuuli heikkeni olleen 4-8 m/s.

Kalbådagrundin kaakkoistuuli vastasi suunnaltaan Arandan avomerihavaintoja, mutta Mäkiluodossa ja muillakin lähempänä mannerta olevilla havaintoasemilla tuuli puhalsi Suomenlahden suuntaisena itätuulena. Tuuli pyrki siis rannikolla kääntymään Suomenlahden suuntaiseksi. Tuulen nopeus vaihteli paljon sekä mittauspisteestä toiseen että itse mittauspisteessä. Tässä voidaan havaita tuulen nopeudelle tyypillinen vaihtelevuus, pyörteisyyttä.

Kun kunkin aseman tuulen nopeudet arvioidaan 10 m korkeudelle, lähenevät nopeudet toisiaan jonkin verran. Arviossa pitää ottaa huomioon sekä korkeuden että stabiilisuuden vaikutus. Ulkomerellä, korkealla tuulta mitanneen Kalbådagrundin tuulen nopeuksista voi poistaa 20 %, kun tilanne on heikosti stabiili. Myös ulkomerellä, joskaan ei niin korkealta tuulta mitanneen Arandan tuulen nopeuksista voi poistaa 10–15 %. Tällöin Kalbådagrundin keskituulennopeudeksi tulisi noin 8 m/s ja vastaavasti Arandan noin 7 m/s. Mäkiluodossa mitattiin selvästi heikompia tuulia, noin 6 m/s. Kun nämä arvioidaan 10 m korkeuteen saadaan noin 5 m/s.

Ajelehtimiskokeet 1-4

Mereen laskettiin klo 10:45 UTC nukke (koe 1), kaksi MOBDB-pojua (koe 2 ja 3) sekä kaikki viisi Current Spy –poijua (koe 4). Nukke ja MOBDB-poijut jouduttiin nostamaan merestä jo 50 minuutin ajelehtimisen jälkeen, koska niiden havaitseminen merellä osoittautui hankalaksi. Current Spy:t ajelehtivat runsaat viisi tuntia luoteeseen, ja niiden keskinopeus oli 14 cm/s. Mitatut 15 minuutin nopeuskeskiarvon minimi- ja maksimi arvot olivat 6 cm/s ja 32 cm/s, eli poijujen nopeus vaihteli melko paljon mittausjakson aikana. Keskimäärin poijujen nopeus oli 1,8 % Arandalla mitatusta tuulen nopeudesta (Taulukko 3). Poijujen liike suuntautui kokeen alussa hieman oikealle verrattuna tuulen suuntaan ja sen jälkeen muutaman asteen vasemmalle verrattuna tuuleen. Nukke ajelehti poijuja nopeammin, koska sillä oli suhteellisesti suurempi tuulipinta-ala poijuihin verrattuna.

2.5 Koepäivä 14.5.2003

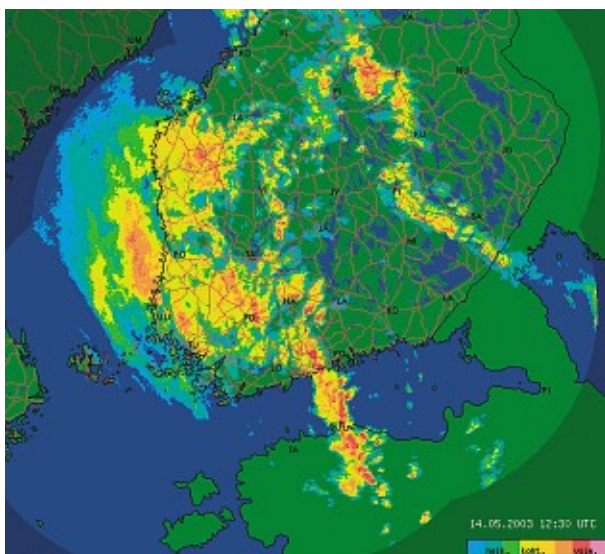
Säätila

Suomessa vallitsi edelleen lämmin kaakkoinen ilmavirtaus (Kuva 12). Matalapaine työntyi pohjoiseen ja syveni. Pohjois-Itämerellä ja Riianlahdella oli matalapaineen sola ja rintama, joka liikkui koilliseen. Suomenlahdella yö ja varhainen aamu oli poutainen ja näkyvyys kohtalainen tai hyvä. Tuuli puhalsi Arandalla idästä pääosin 4–8 m/s. Kaikki tuulen nopeushavainnot olivat nyt lähellä toisiaan noin 2 m/s sisällä. Tämä johtui osaksi siitä, että ilmamassa lämpeni edelleen ja stabiilisuus lisääntyi, mikä pienensi nimenomaan korkealla mitattuja tuulen nopeuksia.

Lounaasta lähestyvän rintaman vaikutuksesta sää pilvistyi aamupäivällä ja näkyvyys huononi. Päivällä oli utua tai sumua. Rintaman edellä idän ja kaakon välinen tuuli voimistui ollen 8–12 m/s. Kalbådagrundilla mitattiin jopa yli 14 m/s, mutta Mäkiluodolla vastaavasti ei päästy edes 10 m/s. Juuri ennen rintaman ylitystä kaikilla asemilla oli lähes sama tuulen suunta. Ilmamassa oli lämmennyt vuorokaudessa nelisen astetta ja oli lämpimillään noin 10 astetta (noin 1,5 km korkeudessa) juuri rintaman etupuolella. Rintama ylitti Arandan ja koealueen klo 12:30–13:30 UTC liikkuen edelleen itään. Siihen liittyi kapea, mutta melko voimakas kuurosaiteiden vyöhyke (Kuva 13), jossa myös paikoin ukkosti, etenkin Viron puolella.

Rintaman ylityksen yhteydessä tuuli heikkeni väliaikaisesti asemasta riippuen 2–8 m/s. Se kääntyi nopeasti puhaltamaan lounaasta ja voimistui uudestaan ollen hetkittäin jopa 14 m/s. Rintaman ylityksen yhteydessä ilmamassa vaihtui ja sen lämpötila laski nopeasti. Yöhön mennessä lämpötila oli laskenut noin 8 astetta, mikä vaikutti selvästi ilman stabiilisuuteen. Ilma muuttuikin nopeasti neutraaliksi vielä saman vuorokauden aikana. Tämä näkyy eri mittausasemien tuulen nopeuksissa siten, että ne ovat nyt lähempänä toisiaan kuin stabiilissa tilanteessa. Myöhemmin illalla lounaistuuli vähitellen heikkeni (Kuva 11). Suomenlahdella oli iltapäivällä ja illalla yleisesti sumua, kun taasen yöllä näkyvyys parani.

Mittausasemista Mäkiluodossa tuuli kääntyi länteen ensimmäisenä ja tunnin sisällä siitä muillakin mittausasemilla (Kuva 12). Jälleen havaitaan, että tuuli on rannikon suuntainen rannikkoa lähempänä olevilla mittausasemilla. Myöhemmin tuulen heiketessä sekä stabiilisuuden muuttuessa neutraalimmaksi tuulen suunta oli lähes sama sekä havaintoasemilla että Arandalla.



Kuva 13. Säättutakuva sadetilanteesta 14.5.2003 klo 12:30. Vihreiden sävyjen alueella sade on heikkoa ja punaisten sävyjen alueella intensiteetiltään kovaa (Ilmatieteen laitos).

Ajelehtimiskokeet 5-7

Aamulla 14.5. klo 3:00 UTC laskettiin ajelehtimaan kolme Current Spy –poijua (koe 5). Poijut nostettiin merestä 14 tunnin ajelehtimisen jälkeen illalla klo 17:15 UTC. Aamulla mereen laskettiin lisäksi kaksi Current Spy –poijua, jotka jätettiin yöksi ajelehtimaan, jotta saataisiin talteen yli vuorokauden pituiset ajelehtimisreitit (koe 6).

Poijut oli ohjelmoitu lähettämään paikkatietonsa 30 min välein Arandan sähköpostiin ja Suomenlahden merivartioston johtokeskukseen, mutta tieto tuli perille epäsäännöllisesti. Mahdollisesti syynä oli tutkimusalueen ja meren pinnan läheisyydessä heikko GSM-kuuluvuus, jota iltapäivällä ja illalla vallinnut voimakas aallokko osaltaan edelleen heikensi. Tutkimusryhmä pyrki pysyttelemään laivalla näköetäisyyden päässä poijuista varmistaakseen sen, että niitä ei kadoteta. Poijut ajelehtivat päivän aikana kohti Suomen rannikkoa, ja seuraavaksi päiväksi ennustettiin heikkenevää tuulta ja selkeää. Oli siten odotettavissa, että GSM-olosuhteet paranisivat ja yöksi mereen valvontaa vaille jätettyjen poijujen lähettämä paikkatieto tulisi seuraavana päivänä sujuvasti perille.

Kokeessa 5 Current Spy:t liikkuivat aluksi luoteeseen ja tuulen kääntynyt koilliseen. Poijujen säännöllinen tiedonvälitys- ja tallennus loppui noin klo 13:30 UTC, jonka jälkeen poijujen etenemistä seurattiin laivalta ja paikkatiedot kirjattiin tarkalleen muistiin vasta illalla nostettaessa poijut ylös merestä. Ensimmäisen yhdeksän tunnin aikana Current Spy –poijujen keskinopeus oli 15 cm/s, joka vastasi 1,8 % Arandalla mitatusta vallitsevasta keskituulesta (Taulukko 3). Poijujen liikesuunta oli tällöin keskimäärin 10° oikealle tuulesta.

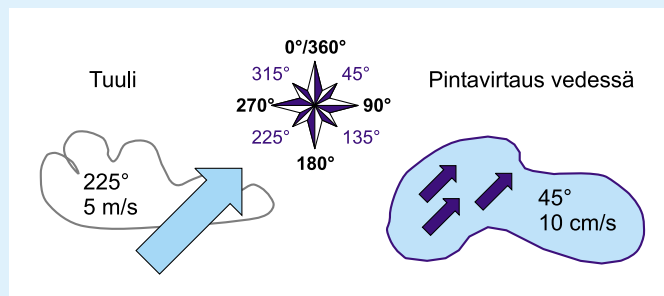
Järvipoiju oli meressä klo 9:20-18:20 UTC eli yhteensä 9 tuntia (koe 7) ja liikkui samassa ryhmässä Current Spy -poijujen kanssa. Järvipoijun paikkatiedot tallentuivat poijun muistiin vain sen ensimmäisen ajelehtimistunnin ajalta, minkä lisäksi kirjattiin ylös paikka, josta se illalla nostettiin ylös. Kaikki poijut olivat havaittavissa päivän aikana Arandan komentosillalta. Illalla poijuja nostettaessa hopean-

värisen järvipojjun havaitseminen oli aallokon ja päivän hämärtyksen takia vaikeaa, mutta lopulta se paikannettiin ja nostettiin laivaan noin tunti sen jälkeen, kun muut pojut oli jo nostettu merestä.

Kaksi eri poijutyyppeä eli järvipojju ja Current Spy:t liikkuiivat likimain yhtä nopeasti. Järvipojjun keskinopeus ja kulkusuunta sen ensimmäisen ajelhtimistuntin ajalta olivat 17 cm/s ja 345° eli lähes pohjoiseen (vrt. Kuva 14). Vastaavan ajan Current Spy:t liikkuiivat nopeudella 15 cm/s luoteeseen suuntaan 310°, kun samalla kaakkoistuulen (125°) nopeus oli 10 m/s. Poijujen suunta poikkesi tuulesta 5-40° oikealle. Tässä kokeessa Current Spy:den veden yläpuolella oleva tuulen vaikutukselle altis osa ei kasvattanut poijujen nopeutta suuremmaksi kuin veden virtausnopeus, sillä ne liikkuiivat samaa vauhtia järvipojjun kanssa.

Tuuli tuo ja virta vie

Esitettäessä tuulen- tai virtauksen suunta asteina vakiokäytännöksi on muotoutunut, että tuulen osalta asteet kertovat suunnan, josta tuuli puhaltaa. Virtauksen osalta sen sijaan asteet kertovat suunnan, johon vesi on menossa (vrt. Kuva 14). Poijujen tapauksessa ajatellaan, että virta vie poijuja, joten niiden suunta ilmoitetaan asteina samoin kuin pintavirtauksen suunta.



Kuva 14. Esimerkki tuulen ja virtauksen suunnan esittämisestä asteina.

2.6 Koepäivä 15.5.2003

Säätila

Suomessa vallitsi koilliseen liikkuneen rintamavyöhykkeen jälkipuolella viileä lounainen ilmavirtaus (Kuva 12). Ilmamassa viileni edelleen, puolen vuorokauden aikana noin neljä astetta. Sää oli poutainen ja näkyvyys pääosin hyvä. Matalapaineen alueen siirryttyä Skandinavian pohjoispuolelle lounaanpuoleinen tuuli heikkeni vähitellen, ollen Suomenlahdella aluksi noin 6 m/s, mutta päivällä oli lähes tyyntä ja tuulen suunta muuttui epämääräiseksi.

Ajelehtimiskokeet 6, 8 ja 9

Kuusi PIR-pojjua ja kolme Current Spy:ta laskettiin mereen aamulla klo 3:00 UTC (kokeet 8 ja 9). Poijut ajelhtivat meressä yli kuusi tuntia ja liikkuiivat noin kolme kilometriä pohjoiseen. Näiden kahden poijutyypin ajelhtimissuunta ja -nopeus olivat lähes samat. Current Spy:den keskinopeus oli 12,2 cm/s ja suunta 346° ja PIR-

poijujen vastaavasti 11,7 cm/s ja 350°. Poijut ajautuivat pohjoiseen, eikä heikko lounainen pintatuuli vaikuttanut niiden liikesuuntaan. Koska poijujen ja tuulen suunnat erosivat huomattavasti, ei poijujen nopeutta näiden kokeiden osalta ole verrattu tuulen nopeuteen. Poijujen liikettä tämän kokeen osalta on tarkasteltu lähemmin kappaleessa 3.5.

Edellisenä iltana kokeessa nro 6 ajalehtimaan jätetyistä kahdesta Current Spy –poijusta ei saatu paikkatietoviestejä. Sää oli tyyni ja aallokko vähäistä, mutta poijujen paikkatietoviestit eivät tulleet perille. Poijut olivat kadoksissa ja tilanne vastasi siten aitoa etsintää. Poijujen sijainti arvioitiin tekemällä kulkeutumislaskentoja niillä tiedoilla ja malleilla, joita laivalla oli käytettävissä. Lisäksi arvioitiin poijujen sijainti puhtaasti asiantuntija-arviona. Mallilaskelmat tässä koetilanteessa poikkesivat toisistaan, eikä oikeaa paikkaa osattu määrittää laskentojen perusteella.

Arandan työveneellä etsittiin poijuja mallilaskelmien ja kokemusperäisten arvioiden perusteella aamupäivän tuloksettomasti. Tämän jälkeen aamulla aloitetut kokeet 8 ja 9 lopetettiin ja kadoksissa olleiden poijujen etsintöihin keskityttiin kaikin voimin. Aranda, työvene ja Pirkanmaan ympäristökeskuksen vene Sirius aloittivat yhdessä poijujen etsinnän. Tutkijat havaitsivat Arandan komentosillalta kadoksissa olleet poijut muutamien satojen metrien päässä toisistaan ja ne nostettiin laivaan 10:45 UTC Kuvassa 1 esitetyistä kohdista. Poijut löytyivät alueelta, joka oli noin 1,5 meripeninkulmaa pohjoiseen verrattuna pisteeseen, josta niistä oli edelliseltä illalta viimeisin havainto.

Taulukko 3. Esineiden nopeus verrattuna tuulen nopeuteen.

Koe	Esine	Koe-päivä	Aika	Esineen liike-suunta	Esineen tuntikeskinopeus	Esineen nopeus suhteessa Arandalla mitattuihin tuulen nopeuden tuntikeskiarvoihin	
nro		2003	[UTC]	[°]	[cm/s]	[solmu]	[%]
1	Nukke	13.5.	10:45-11:38	269	18	0,35	2,9
2	MOBDB-1	13.5.	10:45-11:31	275	11	0,21	1,8
3	MOBDB-2	13.5.	10:45-11:34	289	14	0,27	2,3
4	Current Spy:t	13.5.	10:45-16:00	295	keskiarvo 14,4 max 16,2 min 10,3	0,28 0,20 0,31	1,8 2,0 1,7
5	Current Spy:t	14.5.	3:00-12:00 *)	312	keskiarvo 15,3 max 20,2 min 12,7	0,30 0,25 0,39	1,8 2,7 1,3
7	Järvipoiju	14.5.	9:20-10:20 *)	345	keskiarvo 16,8	0,33	1,6
8 ja 9	PIR-poijut ja Current Spy:t	15.5.	3:00-9:40	348	keskiarvo 12 max 13 min 11	0,23 0,25 0,21	- **)

*) Aika, jolta esineen nopeus ja liikesuunta on laskettu. Koko kokeen kesto oli pidempi.

**) Poijujen liikesuunta poikkesi huomattavasti tuulesta eli n. 60° tuulensuunnasta vasemmalle.

3

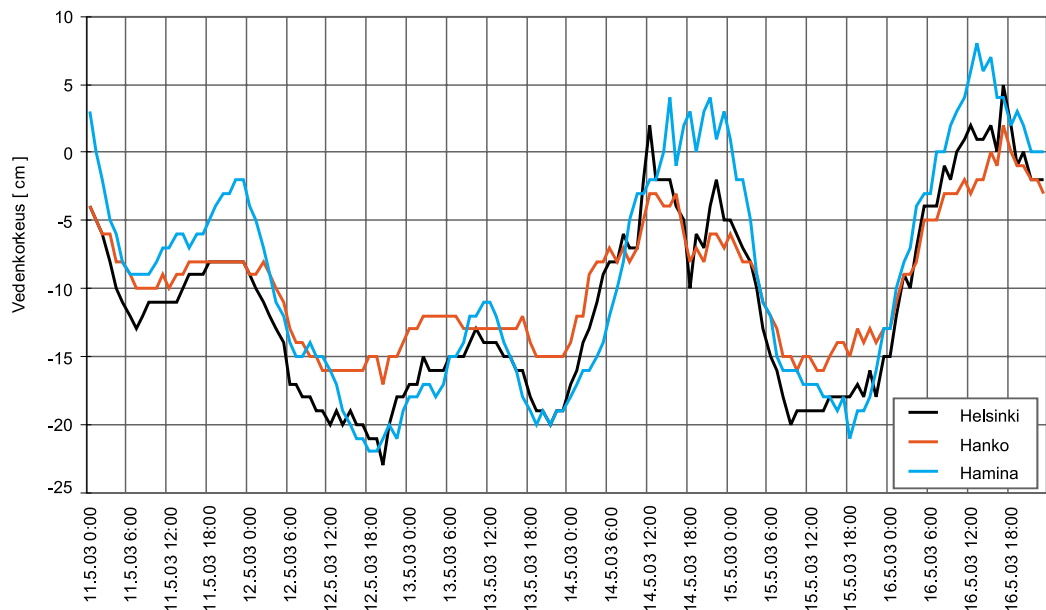
Suomenlahden veden liikkeit

Suomenlahden vedenkorkeutta havainnoidaan säännöllisesti sekä Suomessa, Virossa että Venäjällä. Lisäksi aallokkoa mitataan Helsingin edustalla avovesiaikana aaltopojulla. Nämä tiedot kerättiin ajelehtimiskokeiden ajalta, jotta saatiin mahdollisimman hyvä kuva vallinneista meriolosuhteista. Virtausmittaustietoa ei ollut samalla tavoin saatavilla kuten sää- tai vedenkorkeushavaintoja, joten Suomenlahden virtausolosuhteista esitetään yleisluontoinen kuvaus. Kappaleessa 3.5. analysoidaan lisäksi, mitä ajelehtimiskokeissa käytettyjen poijujen kulkeutuminen kertoi pintavirtauksesta.

3.1 Vedenkorkeus

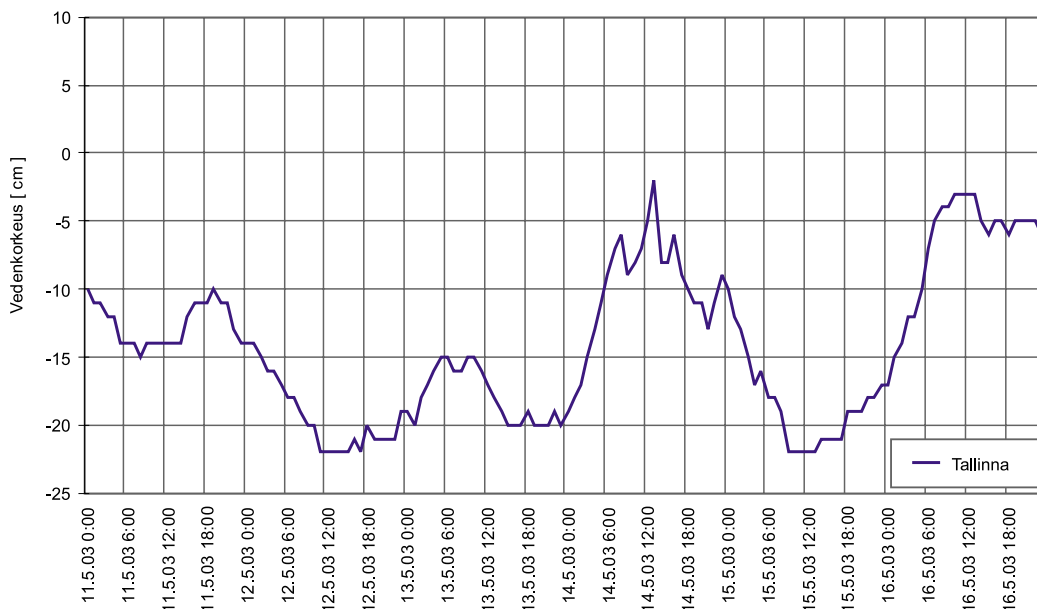
Vedenkorkeus riippuu Suomenlahdella Itämeren kokonaisvesimäärästä, vallitsevista tuulista, ilmanpaine-eroista ja altaan ominaisheilahteluista. Vuoroveden vaikutus vedenkorkeuden muutoksiin on hyvin pieni muihin tekijöihin verrattuna.

Suomenlahdella vedenkorkeus oli tutkimusmatkaa edeltävänä päivänä 12.5.03 laskeva. Yöllä ja seuraavana päivänä vedenkorkeus vaihteli noin 5 cm, jonka jälkeen vedenkorkeus alkoi Kuvan 15 mukaisesti nousta myöhään illalla 13.5. Keskiyöstä puoleenpäivään 14.5. mennessä vedenkorkeus nousi Helsingissä yli 20 cm. Helsingissä ja Haminassa vedenkorkeuden nousu oli suurempi kuin Hangossa, joka osoitti Suomenlahden vesimassojen kallistuneen itä-länsi suunnassa. Tuulen nopea kääntyminen pysäytti vedenkorkeuden nousun. Puoli vuorokautta myöhemmin keskiyöllä vedenkorkeus kääntyi, heikkenevän tuulen myötä, nopeaan laskuun. Keskiyöstä puoleenpäivään 15.5. vedenkorkeus laski Helsingissä noin 20 cm.



Kuva 15. Suomenlahden vedenkorkeus Suomen rannikolla. Mitattu vedenkorkeus on esitetty suhteessa kyseisen vuoden teoreettiseen keskiveteen. (Merentutkimuslaitos)

Samalta ajankohdalta on Kuvassa 16 esitetty Tallinnassa mitatut vedenkorkeudet. Vedenkorkeus alkoi Tallinnassa nousta samanaikaisesti kuin Helsingissä. Vedenkorkeuden nousu oli Tallinnassa yhtä suuri kuin Helsingissä ja kääntyi laskuun samanaikaisesti kuin Helsingissä. Helsingin ja Tallinnan kohdilla Suomenlahden vedenkorkeuden muutokset olivat näinä päivinä saman suuruiset ja -suuntaiset.



Kuva 16. Tallinnan vedenkorkeushavainnot. Referenssitaso Kronstadtin nollassa. (Marine Systems Institute, Viro).

3.2 Virtauksiin vaikuttavat tekijät

Meren virtauksiin vaikuttava päätekijä Suomenlahdella, kuten koko Itämerelläkin, on tuuli, jonka vaihtelun takia myös virtaukset vaihtelevat huomattavasti sekä ajallisesti, että paikallisesti. Ilmanpaine-erot kallistavat meren pintaa ja synnyttävät virtausta. Virtauksia muokkaavat myös maapallon pyörimisliike, veden tiheyserot sekä rannikoiden ja pohjan muodot.

Tuuli on yleensä pääasiallinen meren pintakerroksen liikkeeseen vaikuttava tekijä. Virtaussuunta kääntyy avomerellä pinnassa muun muassa maapallon pyörimisliikkeen vaikutuksesta n. 20° oikealle tuulen suunnasta. Lähellä rannikkoa rannikon vaikutus taas ohjaa virtausta selvästi. Syvemmillä ero tuulen- ja virtaussuunnan välillä kasvaa siten, että pohjan lähellä virtaussuunta on usein pintavirtaukselle vastakkainen. Tuulen suora vaikutus ulottuu kesällä korkeintaan lämpötilan harppauskerrokseen, eli termokliiniin noin 10-20 m syvyydelle asti. Talvella, vesien ollessa pystysuoraan sekoittuneita, tuulen vaikutus ulottuu suolaisuuden harppauskerrokseen eli halokliiniin asti. Virtausnopeus pienenee pinnalta syvemmälle mentäessä veden sisäisten kitkavoimien vaikutuksesta kun taas pohjan lähellä pohjakitka vaimentaa virtauksia.

Meteorologiset tekijät kallistavat sopivissa olosuhteissa Suomenlahden veden pintaa, jolloin vedenkorkeuserot alkavat vaikuttaa merkittävästi virtaukseen. Esimerkiksi voimakas länsi- tai lounaistuuli kallistaa Suomenlahden veden pintaa, jolloin vesi pakkautuu itäosiin kohti Venäjän rannikkoa ja Viron rannikon itäosia. Tuulen muuttaessa suuntaa tai laantuessa vesi palaa tasapainotilaan, jolloin seurauksena voi olla hetkellisesti täysin tuulen suunnasta poikkeava veden virtauskenttä.

Suolaisuuden ja lämpötilan vaihtelut aiheuttavat veden tiheyseroja Suomenlahdella. Suomenlahdella itä-länsisuuntainen suolaisuusero on suuri, koska valtaosa jokivesistä tulee Suomenlahteen Nevasta ja toisaalta Itämeren pääaltaasta, lännestä virtaa suolaista vettä Suomenlahdelle. Pystysuorat tiheyserot taas luovat kerrostuneisuuden, joka vaikuttaa siihen, kuinka paksuun pintakerrokseen tuuli vaikuttaa.

3.3 Virtausten voimakkuus

Sääolosuhteet, makean veden jakauma ja maapallon pyöriminen yhdessä saavat aikaan Suomenlahdelle keskimääräisen vastapäivään kiertävän nettoliikkeen, jossa vesi tulee sisään Viron rannikkoa pitkin ja ulosvirtaus tapahtuu Suomen rannikon ulkopuolella kohti länttä. Virtauskenttään liittyy tämän suuren mittakaavan liikkeen lisäksi paljon erikokoisia pienempiä pyörteitä, joiden koko ja kesto vaihtelevat. Suomenlahdella koko vesimassan *keskimääräinen virtausnopeus* pinnalta pohjaan on luokkaa 5 cm/s. Pinnassa tyypillinen virtausnopeus on suurempi, 5-10 cm/s. Jos ajatellaan, että keskimääräinen tuulenopeus on Suomenlahdella 7 m/s, niin tyypillinen pintavirtausnopeus on suurin piirtein 10 cm/s.

Hetkelliset virtaukset tietyssä kohdassa Suomenlahtea voivat poiketa huomattavasti keskimääräisistä arvoista, joten öljyn tai ajelehtivien esineiden liikettä ennustettaessa on pyrittävä määrittämään kyseiseen ajankohtaan liittyvien virtausten nopeus- ja suunta mahdollisimman hyvin. Hetkelliset virtausnopeudet pinnassa vaihtelevat tyynen päivän muutamista senttimetreistä sekunnissa aina kovien myrskyjen 50 cm/s asti. Nyrkkisääntönä voi pitää, että pintakerroksessa virtausnopeus on 1-3 % vallitsevasta tuulen nopeudesta.

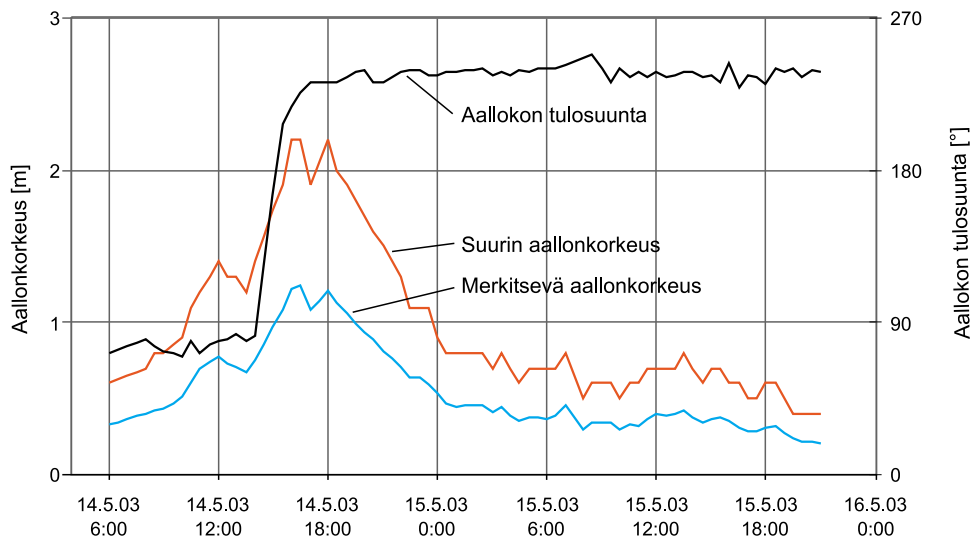
Lisätietoja Suomenlahden fysiikasta löytyy julkaisusta Alenius et al. (1998).

3.4 Aallokko

Aallokko vaikuttaa pintavirtaukseen. Vedenpinnan edestakaisen pystysuoran liikkeen lisäksi aallokkoon liittyy myös vaakasuora liikekomponentti. Tämä virtauskomponentti riippuu merkittävästi aallonkorkeudesta, aallokon suunnasta ja periodista. Aikaisemmissa tutkimuksissa on päädytty arvioon, jonka mukaan tuulen ja aallokon yhteisvaikutuksesta syntyvä pintavirtaus on syvässä vedessä noin 3,5% tuulen nopeudesta ja kiertyy pohjoisella pallonpuoliskolla noin 11 astetta oikealle tuulen suunnasta. Kohdassa 7.4 pohditaan aallokon vaikutusta kulkeutumiseen.

Talven jälkeen Helsingin edustan aallonmittauspoiju asennettiin paikalleen (Kuva 1) samalla Arandan matkalla, ja se alkoi mitata 14.5.03 klo 6:00 UTC. Merkittävä aallonkorkeus oli avomerellä aluksi noin 0,7 m (Kuva 17). Säärintaman ohituksen myötä merkittävä aallonkorkeus kasvoi 1,2 metriin ja aallokko kääntyi tulemaan länsilounaasta. Suurimmat aallot olivat 2,2 m korkeita. Keskiviikon ja torstain välisenä yönä aallokko vaimeni tuulen tyyntyessä niin, että torstaina 15.5. merkittävä aallonkorkeus oli enää noin 0,4 m ja suurimmat aallot 0,7 m korkeita.

Pohjois-Itämerellä toinen aaltopoiju rekisteröi samanaikaisesti aallokkoa ja siellä merkittävä aallonkorkeus oli alle 1 m suuruista; siis jopa matalampaa kuin Suomenlahdella. Juuri lounaistuuli on otollinen nostamaan Suomenlahden aallokon korkeammaksi kuin Itämeren pääaltaalla, sillä tällöin Suomenlahdella tuulen pyyhkäisy matka on pitkä.



Kuva 17. Aaltopoijuilla mitattu aallokon korkeus ja suunta Helsingin edustalla 14.-15.5.2003.

3.5 Virtauksen mittaus pintavirtauspoijuilla

Veden virtausta mitattiin 15.5.03 PIR-poijuilla kokeessa 8 kolmella eri syvyydellä yli kuuden tunnin ajan (Taulukko 4). Veden virtaussuunta oli koealueella pohjoiseen, kun samanaikaisesti vallitsi heikkenevä lounaistuuli 2-6 m/s. Koska virtaussuunta poikkesi näin huomattavasti tuulen suunnasta, kyseessä ei ollut vallitsevan tuulen aiheuttama pintavirtaus tilanne. Virtausnopeus heikkeni kokeen aikana voimakkaasti ollen alussa 18 cm/s ja lopussa noin 5 cm/s.

PIR-poijujen virtauslieriöt oli asennettu eri syvyyksille, sillä tavoitteena oli mitata virtausnopeuden muutosta syvyyden suhteen. Mittauksissa ei kuitenkaan tullut systemaattisesti esiin virtausnopeuden pieneneminen siirryttäessä pinnasta viiden metrin syvyyteen (Taulukko 4). Yleensä tämän paksuisessa pintakerroksessa virtausnopeudessa on eroa syvyyden suhteen, mutta virtauksen suunta ei yleensäkään merkittävästi käänny näin lähellä pintaa.

Taulukko 4. Virtausmittaus 15.5.2003 PIR-poijuilla lähtien paikasta 59° 58,7'N 25° 17,8'E.

Aika UTC	Syvyys	Suunta	Nopeus cm/s	Nopeus, solmu
3:00-5:30	0-1 m	342	17,7	0,34
	2-3 m	338	17,6	0,34
	4-5 m	337	17,7	0,34
5:30-8:00	0-1 m	348	13,5	0,26
	2-3 m	348	11,4	0,22
	4-5 m	347	11,8	0,23
8:00-9:45	0-1 m	4	5,6	0,11
	2-3 m	2	4,4	0,08
	4-5 M	2	4,1	0,08

Etsittäessä selitystä sille, että pintavirtauksen suunta poikkesi tässä tilanteessa avomerellä jopa 60° tuulen suunnasta vasemmalle, tarkastellaan vedenkorkeuden muutoksia. Oletuksena on, että edellisenä päivänä 14.5.03 navakka lounaistuuli aiheutti Suomenlahdella vesimassan pakkautumisen Suomenlahden pohjukkaan ja

coriolisvoiman takia enemmän Viron kuin Suomen rannikolle. Lisäksi oletetaan, että seuraavana päivänä tuulen laannuttua Viron rannikolle pakkautunut vesi alkoi virrata rannikolta poispäin ja aiheutti voimakkaan pohjoiseen suuntautuvan virtauksen.

Helsingin ja Tallinnan vedenkorkeushavainnot eivät tue suoraviivaisesti edellä esitettyjä oletuksia, sillä vedenkorkeus ei noussut Tallinnassa sen enempää kuin lahden toisella puolella Helsingissä. Kuusi tuntia kestäneen kokeen aikana 15.5. vedenkorkeus laski Helsingissä 11 cm ja Tallinnassa vain 7 cm eli vedenkorkeuden lasku oli tällöin voimakkaampaa Suomenlahden pohjois- kuin etelärannalla. Kuvista 15 ja 16 nähdään, että tässä tilanteessa Suomenlahden kaikilla havaintoasemilla vedenkorkeus laski eli vettä pakeni lahdelta. Pintavirtauspoijujen mittaama pohjoisvirtaus oli oletettavasti vesimassassa tapahtuvaa pyörteilyä, joka syntyi kun vettä virtasi pois Suomenlahdelta.

Pintatuuliennusteilla tarkoitetaan kymmenen metrin korkeudella meren- tai maanpinnasta olevia tuulia, ja niitä käytetään virtausmallien syöttötietona. Sääennusteita valmistuu päivittäin eri aikoihin, sillä käytössä on monia eri laskentaohjelmia ja jo yhdellä mallilla ennusteita tuotetaan useita kertoja päivässä. Kullekin sääennusteelle määritetäänkin aina ennusteen analyysiaika, jolla tarkoitetaan aikaa, jolta ennusteajo alkaa ja ajanhetkeä, jolta viimeisimmät havaintotiedot on saatu laskennan tueksi. Jatkossa tuuliennusteen analyysiaika merkitään ennusteen nimen yhteyteen. Esimerkiksi ECMWF 1112 tarkoittaa ECMWF-mallin ennustetta, jonka analyysiaika on 11.5.2003 klo 12 UTC.

4.1 Sääennusteen päivitys

Koejakson aikana käytettiin sekä Euroopan keskuksen sääennustusmallin (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) että Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-mallin (High Resolution Limited Area Model, HIRLAM) tuuliennusteita. Koska tutkimuksessa oli mukana myös Ruotsin ilmatieteen ja hydrologian laitoksen (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SMHI) ylläpitämä virtaus- ja ajelehtimismalli, otettiin säämallien vertailuun mukaan SMHI:n HIRLAM-mallin ennusteita. Ruotsin ja Suomen HIRLAM-mallit poikkeavat mallirakenteeltaan hieman toisistaan, ja joissain säätilanteissa ennustetulokset voivat poiketa selvästi toisistaan.

ECMWF-mallia ajetaan kaksi kertaa vuorokaudessa ja ennusteet ulottuvat 10 vuorokautta eteenpäin. Ennustejakson alkupäässä tuulet saadaan 3 tunnin välein. HIRLAM-mallia puolestaan lasketaan neljä kertaa vuorokaudessa. Siinä on siis käytössä tuoreempia havaintotietoja kuin ECMWF-mallin ennusteissa. Aina uuden malliajon valmistuttua ennustusratkaisu saattaa muuttua. HIRLAM-malliajon ennusteet ovat ennustuskäytössä noin 7 tuntia analyysiajan jälkeen. ECMWF:n ennusteet ovat Suomessa käytössä noin 15 tuntia analyysiajan jälkeen.

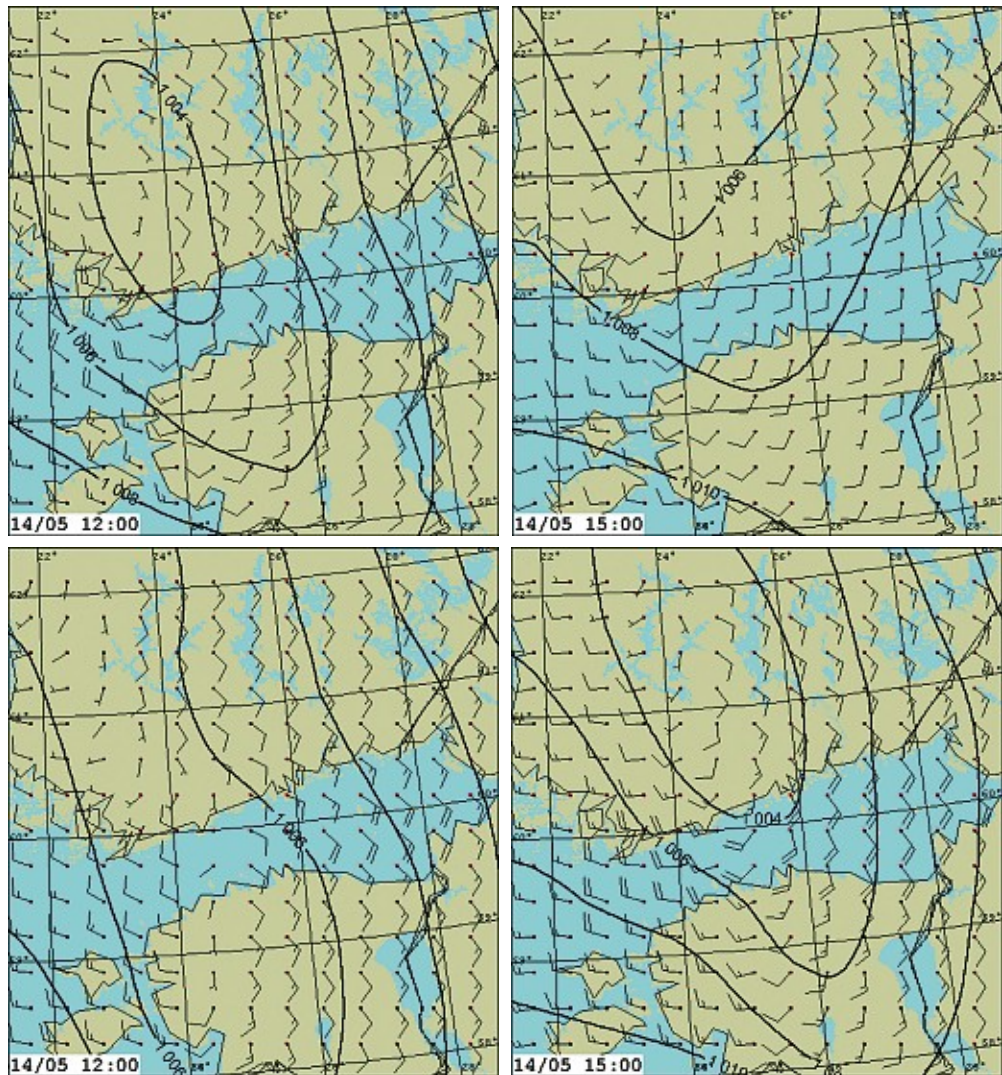
4.2 Erot sääennusteissa 14.5.2003

HIRLAM- ja ECMWF-mallien eroja tarkastellaan toisen koepäivän 14.5. osalta, koska kyseisenä päivänä sään kehitys sisälsi huomattavasti enemmän tapahtumia kuin muina koepäivinä. Kylmä rintama ja siihen liittyvä kapea sadealue ylitti Arandan klo 12 UTC (Kuva 13) ja tuuli kääntyi hyvin nopeasti kaakosta lounaaseen. Kuvassa 18 on vertailtu Euroopan keskuksen analyysiajankohdaltaan tuoreen ja kaksi päivää vanhemman malliajon tuuli- ja ilmanpaine-ennusteita. Suomenlahdella saderintama sijaitsee tuulen kääntymisviivalla matalan solassa.

Eri analyysiajankohdan ECMWF-ennusteet poikkeavat toisistaan. Tuoreempi ennusteajo (alarivi) antaa voimakkaamman painegradientin ja vastaavasti kovemmat tuulet. Näin myös kävi todellisuudessa. Kello 12 UTC tuuli ei ollut vielä kääntynyt, mutta kolme tuntia myöhemmin se puhalsi lounaasta. Arandan tuuli-

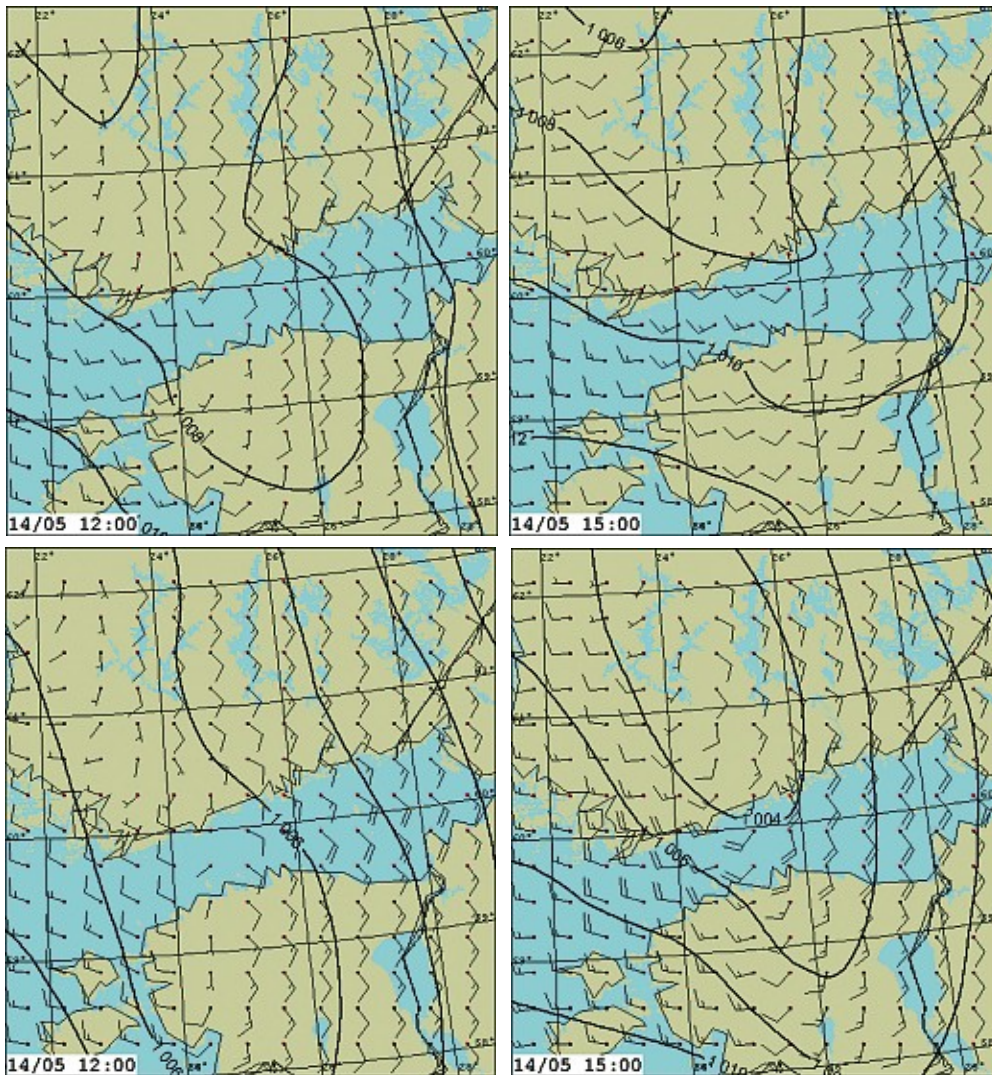
havaintojen mukaan tuuli kääntyi noin puolen tunnin aikana kaakosta lounaaseen. Kääntyminen alkoi 12:15 UTC (Kuva 10). Yöllä tuuli tyyntyi mallitulosten mukaan kuten todellisuudessaakin.

Koska ECMWF-mallista ei saa tietoja kuin kolmen tunnin tarkkuudella, mallin aikatarkkuus on otettava huomioon ennusteita käytettäessä. Koepäivän tuulen kääntymisen tarkkaa ajankohtaa ei saa ennusteista selville yhtä tarkasti kuin havainnoista. Tuuli ei ollut kääntynyt klo 12, mutta oli kääntynyt klo 15. Ajelehtimisen ennusteen epävarmuuden arvion voisi tällaisissa tilanteissa saada nopeasti laskeamalla kulkeutumisen ennusteen ennen ja jälkeen rintaman ylimenon muuttamalla kulkeutumislaskennan alkuaikaa 3 tuntia eteen- tai taaksepäin. Kulkeutumislaskennan lopputuloksena saataisiin kaksi leviämisaluetta, jotka yhdessä muodostaisivat koko ennustetun leviämisalueen.



Kuva 18. Euroopan keskuksen tuuli- ja pintapaine-ennusteet ajankohdille 14.5.2003 klo 12 ja 15 UTC. Ylärivillä ovat ECMWF I112 ja alarivillä ECMWF I1312 -ennusteet. Tuulisymbolin varsi kertoo tuulen suunnan. Suunta saadaan vartta pitkin kohti punaista pistettä. Väkästen pituus ja lukumäärä antaa tuulen voimakkuuden. Pitkä väkänen on 5 m/s ja lyhyt 2.5 m/s. (Ilmatieteen laitos).

HIRLAM 1400 ja ECMWF 1312 -saderintamaennusteita on verrattu Kuvassa 19. Vertailukuviin on valittu mahdollisimman tuoreet ja samalla parhaat ennusteet, jotka todellisuudessa olisivat olleet käytössä rutiinipalvelussa iltapäivän rintaman ennustamiseen. Nämäkin ennusteet eroavat toisistaan. Rintama on molemmissa ratkaisuisissa samalla paikalla, mutta Euroopan keskuksen ennusteen painegradientti on suurempi ja tuulet voimakkaampia.



Kuva 19. Ylärivillä HIRLAM 1400 ja alarivillä ECMWF 1312 tuuli- ja pintapaine-ennusteet ajankohdille 14.5.2003 klo 12 ja 15 UTC. Molemmat ennusteet ovat tuoreimpia mahdollisia ennusteita, joilla voitiin ennustaa Suomenlahdella 14.5.2003 iltapäivällä ollut kapean saderintaman ylitys. Tuulisymbolit kuten kuvassa 18. (Ilmatieteen laitos).

4.3 Tuuliennusteet koepäivinä

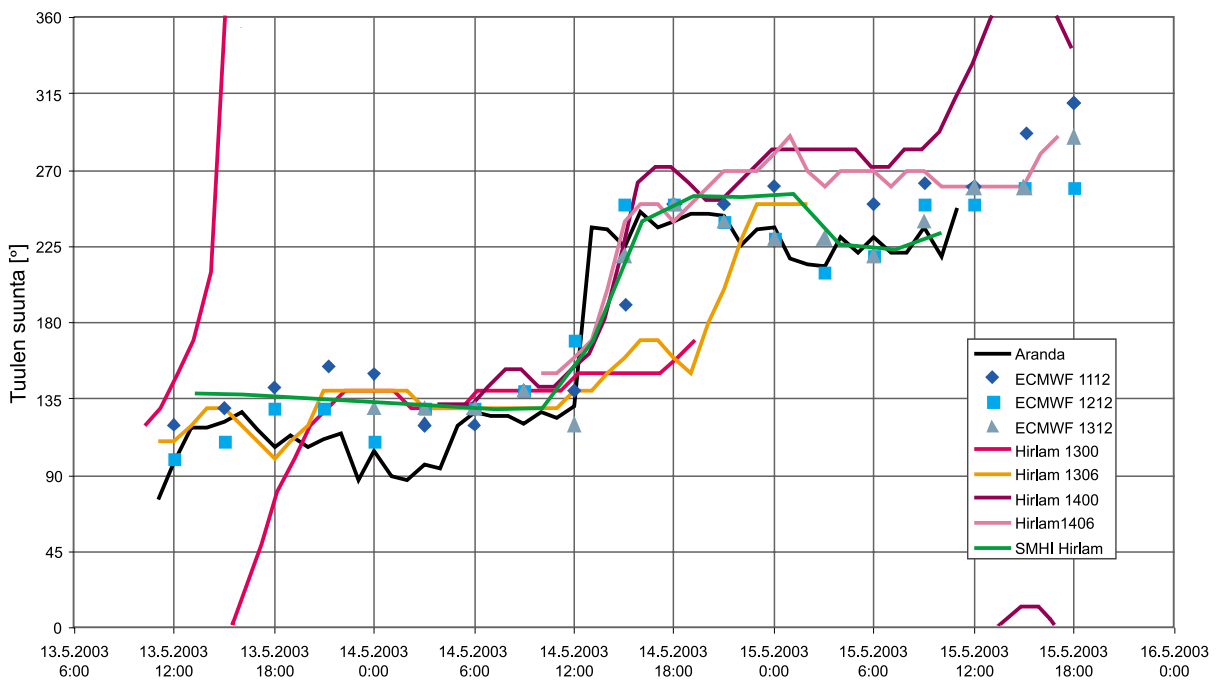
Kaikkia ajalehtimislaskelmissa käytettyjä tuuliennusteita on vertailtu toisiinsa ja toisaalta Arandan tuulihavaintoihin Kuvissa 20 ja 21. Säämallihilasta on poimittu aina yksi ennusteaikasarja kohdasta, joka on lähinnä Arandan koematkan keskimääräistä sijaintipistettä. Sääennustusmallin hilakentistä poimitut tuuliennusteet ovat hilaruutukeskiarvoja. Esimerkiksi HIRLAM-mallissa hilaruudun koko on 22 km * 22 km. Lisäksi tuulet ovat 10 metrin tuulia. Ennustetut tuulet ovat siis aina tasoitettuja ja yleensä heikompia kuin todelliset pistehavainnot. On myös muistettava, että Arandan mittauskorkeus on 10 m korkeammalla kuin ennusteet.

Tässä esitetty SMHI HIRLAM-ennusteen aikasarja on koottu kolmesta päivästä 13.-15.5. tehdyistä ennusteista, joita käytettiin operatiivisessa Seatrack Web kulkeutumislaskentaohjelmassa (kappale 5.2). Seatrack Web -ohjelmaan tuuliennusteet päivitetään kerran vuorokaudessa aina keskiyön jälkeen.

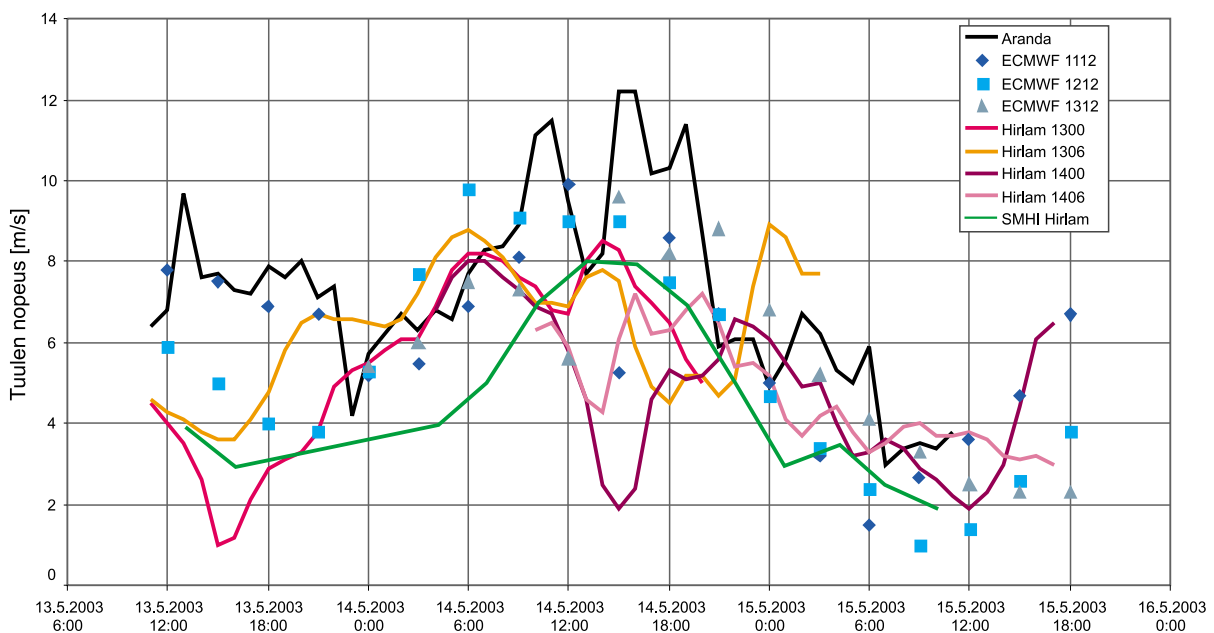
Tuulen kääntymisen ennusteen onnistumista kannattaa katsoa rintaman ylityksen kohdalta 14.5. klo 12 UTC. Tässä tilanteessa Euroopan keskuksen ennuste ECMWF 1112 ennustaa tuulen suunnan oikein jo 11.5. HIRLAM-ennusteissa ennusteen tuoreuden merkitys näkyy selvästi, koska tuoreimmat ennusteet eli HIRLAM 1400 ja 1406 ovat parhaita. Edellisenä päivänä 13.5. käytössä olleissa ennusteissa rintaman ylitys ennustettiin tapahtuvaksi noin 6 tuntia havaittua myöhemmin.

Rintaman kohdalla, tuulen suunnan muutoskohdassa, nopeusennusteet poikkeavat eniten toisistaan. Tällaisessa kapeassa muutoskohdassa nopeuden interpolointi vaikuttaa lopputulokseen. Esimerkiksi, jos hilaruudun toisessa reunassa tuulee navakasti idästä ja toisessa reunassa navakasti lännestä, saadaan neljän pisteen interpoloinnilla hilaruudun keskipisteeseen tyyntä. Nopeissa säätilan muutoksissa tällaisen virheen poistaminen on vaikeaa.

Verrattaessa tuuliennusteita havaintoihin on syytä ottaa huomioon, että Arandan tuulimittaukset on tehty 20 metrissä ja ennustettu tuuli on 10 metrin korkeudessa puhaltava tuuli. Vastaavasti Kuvassa 11 Kalbådagrundin tuulenoisuus on selvästi suurempi, 2-4 m/s, kuin Arandan mittaus, koska se tehdään 10 m korkeammalta. Seuraavana päivänä havaittiin Arandalla sekä ennen rintamaa että sen jälkeen yli 10 m/s tuulia usean tunnin ajan. Jos huomioidaan korkeuskorjaus, ECMWF 1312 -ennuste osui parhaiten oikeaan. Vanhin ECMWF-mallin tuuliennuste eli ECMWF 1112 osuu lähes yksiin Arandan mittauksen kanssa. Viimeisimmän tutkimuspäivän heikkotuulisuus oli kaikissa malleissa ennustettu oikein. Samoin tuulen nopeuden heikkenemisen ajoitus yöllä 15.5. on ennustettu oikein.



Kuva 20. Ennustetut tuulen suunnat ja Arandalla mitatut suunnat. Ennusteaikasarjat on nimetty mallin ja analyysiajan mukaan.



Kuva 21. Ennustetut tuulen nopeudet ja Arandalla mitatut nopeudet. Ennusteaikasarjat on nimetty mallin ja analyysiajan mukaan.

5

Kulkeutumislaskentaohjelmat

5.1 Ohjelmatyypit

Kulkeutumislaskentoihin käytetään monentyyppisiä ohjelmia. Yksinkertaisimmillaan laskentoja tehdään ohjelmilla, joissa lähtötietona käytetään joko vain yhtä tuuli-arvoa tai ajan suhteen muuttuvaa tuulitietoa. Enemmän laskentakapasiteettia edellyttävät sellaiset kulkeutumisohjelmia, joihin liittyy lisäksi meren virtausten laskenta. Pintakulkeutumismalleiksi kutsutaankin tässä ohjelmia, joihin ei sisälly virtausten laskentaa eri syvyyksillä, joten niillä on mahdollista tehdä kulkeutumislaskelmia ainoastaan pinnan läheisyydessä.

Kolmedimensionaalisilla (3D) hydrodynaamisilla malleilla kuvataan meren liikkeitä useilla eri syvyyksillä ratkaisemalla numeerisesti ns. Navier-Stokesin fysikaaliset liikeyhtälöt. Tällaisissa malleissa ennustettavia suureita ovat virtausnopeus, veden lämpötila, suolaisuus sekä vedenkorkeus. Kattavimmillaan hydrodynaamisessa mallissa virtausten laskennassa otetaan huomioon meteorologisista tekijöistä tuulen suunta ja -nopeus, ilman lämpötila, pilvisuus ja ilman kosteus, joiden avulla lasketaan meren ja ilmakehän välinen vuorovaikutus. Meteorologisten pakotteiden lisäksi rantojen ja pohjan muodot, saaret, jokivirtaukset, jääolosuhteet ja reunaehdot laskentamallin reuna-alueella ovat hydrodynaamisen mallin laskennassa oleellisia tekijöitä, jotka kuvataan tarkimmissa malleissa yksityiskohtaisesti. Kulkeutumislaskentaohjelmassa, johon sisältyy hydrodynaaminen malli, kulkeutuminen lasketaan yleensä virtauksen ja tuulen suoran vaikutuksen perusteella kts. Kuva 26.

Kulkeutumisohjelmassa voi myös olla ominaisuuksia liittyen siihen minkä aineen tai millaisen kappaleen ajalehtimistä simuloidaan. Mikäli lasketaan öljyn tai kemikaalin kulkeutumista, niin kehittyneimmissä ohjelmissa laskentaan vaikuttavat aineen fysikaalis-kemialliset prosessit kuten veteen sekoittuminen, vajoaminen tai haihdunta. Kappaleen sorto, syväys sekä suoraan tuulen vaikutukselle altis tuulipinta-ala ovat merkittäviä tekijöitä laskettaessa esimerkiksi veneen tai laivan kulkeutumista.

Ohjelmatyypit eroavat lisäksi niiden käyttövalmiuden ja käyttötarkoituksen mukaan. Operatiivisilla ohjelmilla päivystäjät pystyvät onnettomuustilanteessa tekemään kulkeutumisennusteita välittömästi seuraavien lähituntien tai vuorokausien ajalle tilanteen ollessa akuutti. Operatiivisille laskelmille on tyypillistä, että pyritään reaaliajassa ennustamaan tulevaa kulkeutumista eikä ennustejalle tällöin ole käytettävissä havaintotietoja. Tutkimus- ja kehitystyössä laskenta ei samalla tavalla rajoitu ennalta määritettyihin laskentaominaisuuksiin ja laskennan lähtötietoihin. Tutkimuskäytössä varmennetaan kulkeutumisohjelman toimivuus, etsitään parhaita ratkaisutapoja vertaamalla eri tavoin tehtyjä laskentoja havaintoihin ja arvioidaan laskennan luotettavuutta.

Tässä tilannetutkimuksessa mukana olevia kulkeutumisennusteohjelmia, joihin liittyy 3D-virtausmalli ovat: Seatrack Web, OpHespo ja Merentutkimuslaitoksen 3D-malli. Niiden hydrodynaamisen laskentahilan ominaisuudet on kuvattu Taulukossa 5 ja muut erityispiirteet tarkemmin kappaleissa 5.2–5.4. Kulkeutumismalleja, joihin ei sisälly hydrodynaamista laskentaohjelmaa ovat Merentutkimuslaitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Rajavartiolaitoksen kulkeutumisohjelmia kappaleissa 5.5–5.7.

Taulukko 5. 3D-virtausmallien laskentahilan ominaisuudet.

Ennusteohjelma/ virtausmalli	Alue	Reunaehto	Ennustehila horisontaali- suunnassa	Hilan kerrosrajat syvyysuunnassa lähellä pintaa
OpHespo	Suomenlahti	Vedenkorkeusennuste Suomenlahden suulla HIROMB-mallista	313 m – 5 km	0,5 m, 1,5 m, 3 m... yht. 10 tasoa
Seatrack Web/ HIROMB	Itämeri, Pohjanmerelle 6° E asti	Vedenkorkeus Koillis- Atlantin tulvamallista sekä vuorovesitiedoista	3 merimailia n. 5,5 x 5,5 km	4 m, 8 m, 12 m... yht. 16 tasoa
Merentutkimus- laitoksen 3D-malli	Itämeri, Kattegattiin 57°35 ' N asti	Tanskan salmissa ns. free radiation condition	2 merimailia eli n. 3,4 x 3,4 km	2,5 m, 7,5 m... yht. 40 tasoa

5.2 Seatrack Web

Seatrack Web on operatiivinen koko Itämeren kattava kulkeutumisenennusteohjelma. Ohjelmaa ylläpitää SMHI, ja se on vuodesta 1997 lähtien ollut kaikkien Itämeren maiden viranomaisten käytettävissä internetissä.

Seatrack Web:n kehittäminen alkoi vuonna 1991, jolloin Itämeren suojelukomissio antoi suosituksen (HELCOM 1991), jonka mukaan Itämerelle tulisi kehittää ja ottaa käyttöön kaikkia Itämeren maita palveleva ennusteohjelma öljyonnettomuuksien varalta. Kansainvälinen tutkijaryhmä kehitti HIROMB-nimisen 3D-virtausmallin (High Resolution Operational Model for the Baltic Sea) ensimmäisen version. Nykyisen malliversion päivittäisestä operatiivisesta laskennasta vastaa SMHI, jossa mallin laskenta on hajautettu usealle supertietokoneelle (Funkquist 2001, Wilhelmsson 2002). HIROMB on Seatrack Web laskentajärjestelmän yksi osa, mutta edelleen myös toimiva yhteistyöfoorumi, jonka puitteissa ylläpidetään ja jatkokehitetään kulkeutumisenennusteohjelmia.

HIROMB:n virtauslaskennan ilmakehäpakotteet otetaan ruotsalaisten HIRLAM-säämallista kerran vuorokaudessa. Ilmanpaine-, tuuli-, ilman lämpötila-, kosteus- sekä pilvisyysennusteet kontrolloivat laskennassa liikemäärän siirtymistä sekä lämpövuota veden ja ilman välillä. Meren virtauslaskentaan vaikuttavat jokien tulovirtaamat saadaan mukaan operatiivisesta valuntamallista (Graham 2000). Mikäli valuntamalli ei ole toiminnassa käytetään yhteensä 73 joen vuosikeskiarvovirtaamia.

Seatrack Web:ssä virtaus- ja tuulitiedot päivitetään kerran vuorokaudessa keskiyöllä sen jälkeen, kun HIRLAM-säämallin laskenta on valmis. Kulkeutumisenennusteohjelmassa virtausennusteet ovat 3 merimailin suuruudessa hilassa (Taulukko 5). Ohjelmalla on mahdollista laskea enintään kahden vuorokauden mittaisia ennusteita sekä tehdä taaksepäin laskentoja 12 päivää taaksepäin olevilla tiedoilla.

5.3 OpHespo

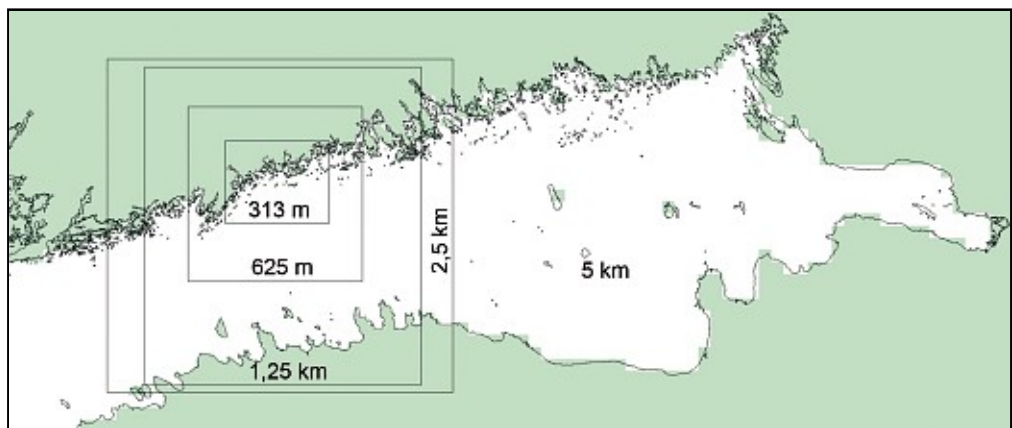
OpHespo eli operatiivinen Helsinki-Espoo kulkeutumismalli laskee koko Suomenlahden virtaukset tuuli- ja vedenkorkeustietojen avulla ja käyttää näitä virtauksia kulkeutumisen laskentaan. Virtauslaskenta suoritetaan 3D hydrodynaamisella mallilla sisäkkäisessä neliöhilassa differenssimenetelmää käyttäen (Korpinen ym. 2002). Sisäkkäisten hilojen käyttö mahdollistaa sekä laajan merialueen laskennan,

että suuren hilatarkkuuden mallin kohdealueella. Kulkeutumislaskenta suoritetaan Lagrangian-tyypin partikkelikulkeutumismallilla virtausmallin laskemiin virtaus-tietoihin ja tuuliennusteisiin perustuen.

OpHespo:n virtausmallihila kattaa Suomenlahden Hankoniemestä Pietariin. Mallinnettava alue ja virtauslaskentahilan tiheys eri alueilla on esitetty Kuvassa 22. Mallissa on käytetty viittä sisäkkäistä hila, jotka tarkentuvat Helsingin edustalle. Vaakasuunnassa laajimman hilan hilaruutujen sivun pituus on 5 km, ja tarkimman 313 metriä. Sisäkkäisissä hiloissa hilakopin sivun pituus puolittuu seuraavalle sisäkkäisyystasolle siirryttäessä. Tavoitteena on, että kulkeutumisennusteita pystytään tekemään myös pienipiirteisessä saaristossa. Syvyysuunnassa virtaukset ratkaistaan kymmenessä eri syvyydessä (Taulukko 5).

Tuulitietona käytetään Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-mallin tuulitietoja, jotka on interpoloitu 5 km hilaan. Tuuliennusteet päivitetään neljä kertaa vuorokaudessa. Mallin laskenta-alueen reunalla Hangon kohdalla vedenkorkeusarvoina ovat HIROMB-Itämerimallin vedenkorkeusennusteet, joita korjataan Hangon vedenkorkeusmittauksilla. Talviaikana malli käyttää Merentutkimuslaitoksen jääpalvelun tuottamia jäätietoja jääpeitteisen alueen arviointiin.

Virtausmallissa ei oteta huomioon lämpötila- ja suolaisuuserrostuneisuutta eikä Suomenlahden alueelle tulevia jokivirtaamia. Näiden tekijöiden vaikutus pintavirtauksiin voi kuitenkin olla merkittävä, varsinkin jos kerrostuminen on voimakasta.



Kuva 22. OpHespo:n laskenta-alue ja virtausten laskennan erotustarkkuus.

5.4 Merentutkimuslaitoksen 3D-malli

Merentutkimuslaitoksen 3D hydrodynaaminen malli laskee vedenkorkeuden vaihteluita, virtauksia ja lämpötilan ja suolaisuuden jakaumia useissa eri kerroksissa meren eri syvyyksillä perustuen Navier-Stokesin yhtälöiden numeeriseen ratkaisuun. Mallin kuvaamiin kulkeutumisennusteisiin vaikuttavat fysikaaliset tekijät ovat: tuulten aiheuttamat virtaukset, lämpötila- ja suolaisuuseroihin liittyvät ns. tiheysvirtaukset, vedenvaihto varsinaisen Itämeren kanssa sekä vedenkorkeuseroihin liittyvät virtaukset, joihin myös suurilla jokivirtaamilla, kuten Nevalla on vaikutuksena. Kulkeutuminen lasketaan Lagrangian-tyyppisenä partikkelikulkeutumisena.

Malli kattaa koko Itämeren, ja Tanskan salmissa reunaehtona on ns. free radiation condition. Virtaukset lasketaan horisontaalisuunnassa 2 merimailin hilassa ja syvyysuunnassa 40 tasolla (vrt. Taulukko 5). Mallin alkutilan suolaisuus- ja lämpötilaprofiilit on laskettu pitkän ajan havaintojen keskiarvoina (perustuen Baltic

Environment tietovaraston havaintoihin, Sokolov et al. 1997). Tärkeimmät jokivirtaamat on kuvattu kuukausikeskiarvoina (Bergström & Carlsson, 1995). Mallissa käytettiin tässä tutkimuksessa meteorologisen pakotteena Euroopan sääkeskuksen ECMWF-ennusteita sekä Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-ennustetta.

Merentutkimuslaitoksen 3D-mallia on sovellettu lukuisissa koko Itämeren ja Suomenlahden tutkimuksissa koskien muun muassa Suomenlahden vedenvaihtoa ja sirkulaatiota (Andrejev et al. 2004a), Suomenlahden veden viipymäaikaa (Andrejev et al. 2004b), Itämeren kumpuamisalueita (Myrberg & Andrejev 2003), Itämeren suolapulssia 1993 (Andrejev et al. 2003) sekä mallin käyttöä Tukholman saaristoa kuvaavan mallin reunaehtona (Engqvist & Andrejev 2003).

5.5 Merentutkimuslaitoksen pintakulkeutumismalli

Merentutkimuslaitoksella on käytössä monimutkaisten numeeristen virtausmallien ohella myös yksinkertainen pintakulkeutumismalli. Siinä laskennan lähtötietoina ovat ensisijaisesti paikallinen tuulen suunta ja -nopeus. Tuuli vaikuttaa vapaasti määritettävän prosenttiosuuden mukaisesti kulkeutumisen laskentaan. Lisäksi voidaan käyttää aallokkoennusteesta saatua aallokon suuntaa, periodia ja merkitsevää aallonkorkeutta, joista malli laskee aallokosta aiheutuvan ns. Stokesin virtauskomponentin. Haluttaessa voidaan vielä antaa lähtötietoina meren ns. perusvirtauksen suunta ja nopeus, jotka saadaan lähtötiedoksi esimerkiksi operatiivisesta Itämeren virtausmallista.

Ohjelma laskee lähtötietojen perusteella kulkeutumisen annetulle määrälle partikkeleita, joihin vaikuttaa mallin laskeman pintavirtauksen lisäksi virtauksen dispersiota kuvaava satunnaisliike. Näin kuvataan vedessä ajelehtivan öljylautan leviämistä tai yksittäisen kappaleen tapauksessa sen todennäköistä sijaintialuetta. Malli tulostaa hiukkaspilven sijainnin maantieteellisissä koordinaateissa, jolloin nähdään alue, jonne todennäköisesti pintavirtauksen mukana ajelehtiva kappale tai aine on kulkeutunut.

Tässä raportissa kuvatuissa kaikissa laskennoissa käytettiin ennustetuulille tuulikerrointa 2,2 % ja kulkeutumisen kiertymiskulmaa 7,5°. Toisin sanoen keskimääräinen kulkeutumisenopeus on tällöin 2,2 % mallille annetun tuulen nopeudesta ja kiertyy 7,5° tuulen suunnasta oikealle. Laskennassa mukana oleva satunnaisliike hidastaa tai nopeuttaa liikettä ja kääntää sitä enemmän tai vähemmän oikealle tuule suunnasta. Sillä lailla saadaan aikaan esimerkiksi öljylautan leviämistä kuvaava "hiukkaspilvi". Kappaleessa 7.4 on arvioitu aallokon vaikutusta kulkeutumiseen.

5.6 Ilmatieteen laitoksen pintakulkeutumismalli

Ilmatieteen laitoksella on operatiivisessa käyttövalmiudessa pintakulkeutumismalli, jossa laskennan lähtötiedoiksi syötetään paikallinen tuulen suunta ja nopeus. Ajelehtivana esineenä voi olla suuri vene, kumivene tai öljy. Valitun esineen mukaisesti kulkeutumiseen vaikuttava tuulen prosenttiosuus vaihtelee. Tuulitietoina laskennassa käytetään yleensä 3 h välein olevia tuulihavaintoja 12 tuntia taaksepäin aloitushetkestä ja 6 h välein olevia tuuliennustearvoja 24 tuntia eteenpäin laskennan aloitusajankohdasta. Tuloksena saadaan kappaleen liike 3 tunnin askelissa. Mallin etuna on sen yksinkertaisuus ja nopeus etsintätilanteessa.

5.7 Rajavartiolaitoksen pintakulkeutumismalli

Suomenlahden merivartiostossa on käytössä kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n IAMSAR-manuaaleissa esitettyyn ajelehtimislaskentaan perustuva "Rapid Response" laskentamenetelmä, jossa voidaan ottaa huomioon tuuli- ja pintavirtauskomponentit sekä kappaleeseen vaikuttava sorto (IMO 1998a; IMO 1998b; IMO 1999).

Rajavartiolaitoksen pintakulkeutumismallissa ajelehtivaan esineeseen vaikuttavat seuraavat voimat:

Merivirta (taulukoista tai malleista, esim. OpHespo)

Tuulivirta (laskennallinen, tilannetta edeltäneiden tuulitietojen perusteella)

Merivirta + tuulivirta = kokonaisvirta (laskemalla tai mittaamalla)

Sorto (mm. kappaleen muodosta ja tuulipinnasta riippuvainen, pitkälti tapauskohtainen)

Rajavartiolaitos käyttää ajelehtimislaskuissaan IAMSAR:n mukaisesti kokonaisvirtaa ja sortoa. Laskentatuloksena saadaan etsintäalue etsittäville esineelle. Etsintäalueen koko kasvaa laskenta-ajan pidentyessä, minkä lisäksi siihen vaikuttaa laskettavan kohteen kuten ihmisen, veneen tai pelastuslautan sortokerroin. Merivartioston etsintälaskennat ovat tyypillisesti melko lyhyitä, sillä etsintäalue-ennusteet määritetään sen perusteella kuinka nopeasti etsintäpartio ehtii merellä etsintäpaikalle. Suomenlahdella etsintäpartio ehtii onnettomuuspaikalle yleensä viimeistään kahden tunnin kuluessa onnettomuustiedon vastaanottamisesta.

Virtausennusteet

Tässä kappaleessa verrataan HIROMB-, OpHespo- ja Merentutkimuslaitoksen-3D-malleilla laskettuja virtausarvoja poijujen liikesuuntaan ja nopeuteen. Kustakin mallista valittiin yksi ajalehtimiskoepaikkaa lähinnä oleva virtauslaskentapist. Tarkimmilla, käytössä olleilla tuuliennusteilla lasketut pintavirtauksen suunta- ja nopeusarvot kyseisissä kohdissa on esitetty Kuvissa 23 ja 24 yhdessä poijuhavaintojen kanssa. Current Spy –poijujen osalta kuviin on laskettu kahden tai kolmen poijun liikkeen tuntikeskiarvot. Kaikkien poijujen nopeuden ja suunnan tuntikeskiarvojen hajonnat olivat keskimäärin 1,2 cm/s ja 5°.

6.1 Simuloidut virtaussuunnat ja poijujen liikesuunta

Ensimmäisenä koepäivänä 13.5. Current Spy -poijut liikkui länsi-luoteeseen ja vastaavan ajan simuloidut virtaussuunnat olivat lännen ja pohjoisen välillä. OpHespo ennusti virtaussuunnan olevan noin 10° vasemmalle poijujen kulkusuunnasta, HIROMB- ja MTL-mallit noin 20° ja 50° oikealle. Toisena koepäivänä poijut liikkui luoteeseen ja vastaavana aikana virtausennusteet olivat luoteen ja koillisen välillä. OpHespo ennusti virtaussuunnan olevan noin 10° vasemmalle poijujen kulkusuunnasta. HIROMB- ja MTL-malleilla lasketut virtaussuunnat olivat kääntyneet oikealle noin 50° ja 40° oikealle verrattuna poijujen liikkeeseen. Kumpanakin koepäivänä pintavirtauksen suunta vastasi melko lailla tuulen suuntaa. Eri malleilla lasketut hetkelliset virtausennusteet asettuivat ensimmäisen ja toisen koepäivän laskentojen vertailussa 90° rajoissa samaan sektoriin.

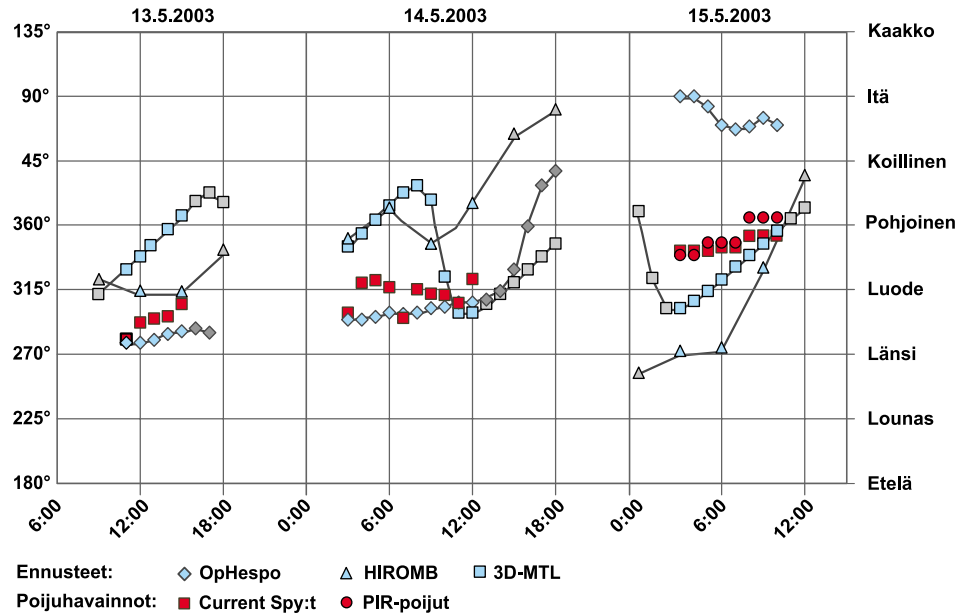
Koepäivänä 15.5. PIR ja Current Spy –poijuilla mitattu pintavirtaus suuntautui pohjoiseen, mutta malleilla ennustettu virtaussuunta vaihteli. Operatiivinen HIROMB-virtausmalli ennusti virtauksen suuntautuvan kokeen alussa länteen ja MTL-malli luoteeseen, kummankin mallin laskema virtaussuunta kääntyi kokeen aikana ja oli kokeen lopussa samansuuntainen kuin havaittu pintavirtaus. OpHespo:n virtausennuste suuntautui lounaistuulen vaikutuksesta itään, joten laskenta ei kuvannut meren liikettä voimakkaan säärintaman ylityksen jälkeisenä päivänä oikein.

6.2 Simuloidut virtausnopeudet ja poijujen liikenopeus

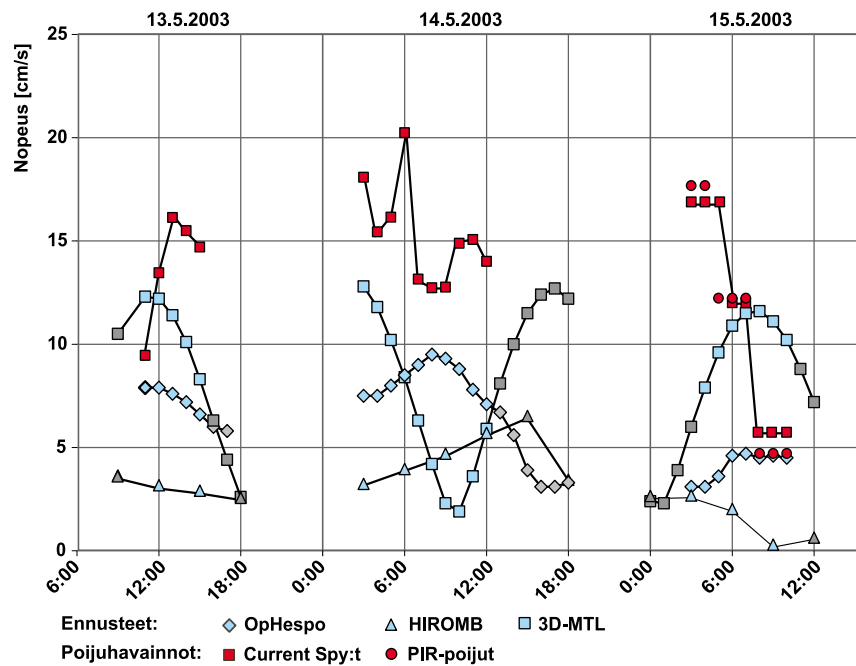
Yleisesti ottaen ennustetut pintavirtausnopeudet ovat pienempiä kuin poijujen havaittu nopeus (Kuva 24). Kahtena ensimmäisenä koepäivänä poijujen liikenopeus oli 1,8 % Arandalla mitatuista tuulen nopeuksista. Current Spy –poijujen syväys on noin 0,7 m ja niiden poikkipinta-alasta 1:4 on tuulipintaa. Kun poijut liikkuvat tuulen suuntaisesti, niiden nopeus voi olla suurempi kuin pintavirtausnopeus.

Eri malleilla ennustetut hetkelliset virtausnopeudet eroavat toisistaan. OpHespo:ssa virtausnopeusarvot kuvaavat 0,5 m paksuisen kerroksen virtausnopeuden keskiarvoa, MTL-ennusteet 2,5 m ja HIROMB-ennusteet 4 m paksun kerroksen keskiarvoa. Teoriassa virtausnopeus on tuulen vaikutuksesta voimakkainta lähinnä pintaa, joten näitä kolmea laskentamallia tarkasteltaessa HIROMB:lla

ennustettujen virtausnopeuksien tulisi olla kaikista pienimpiä. Kuvasta 24 nähdäänkin, että HIROMB:n ennustamat pintavirtaukset olivat yleensä pienimpiä. On kuitenkin otettava huomioon, että kaikissa virtauslaskennoissa käytettiin eri tuulienusteita, joten myös niissä olevat erot vaikuttavat merkittävästi virtauslaskentatulokseen.



Kuva 23. Poijujen keskimääräinen kulkeutumissuunta ja ennustetut pintavirtaussuunnat. Kuvassa harmaat symbolit tutkimusjakson ulkopuolelta.



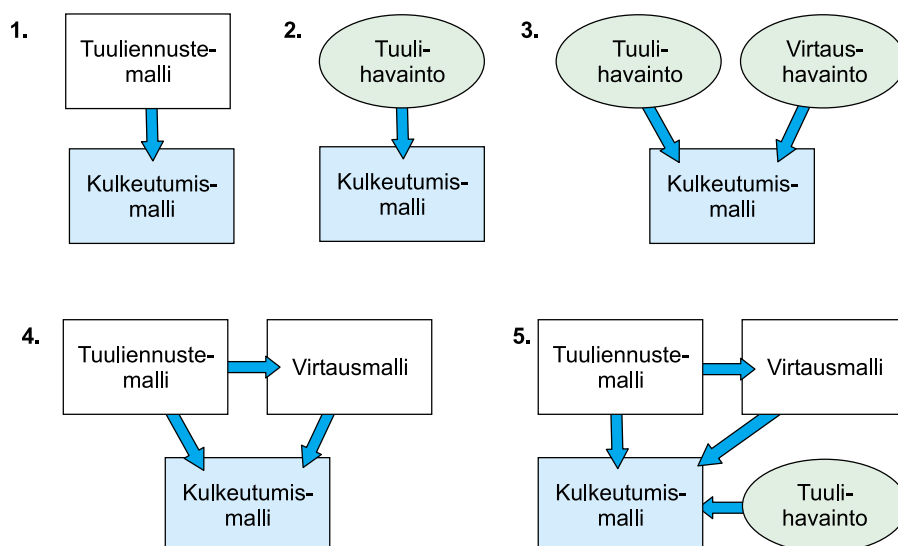
Kuva 24. Poijujen keskimääräinen nopeus ja ennustetut pintavirtausnopeudet kolmena koe-päivänä. Siniset ennustearvot ajankohdalta, jolloin poijut meressä ja harmaat tutkimusajan-kohdan ulkopuolelta. Kuvassa harmaat symbolit tutkimusjakson ulkopuolelta.

Kulkeutumislaskennat

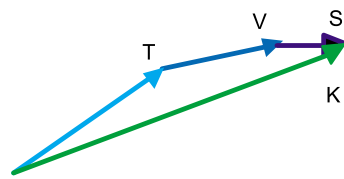
7.1 Kulkeutumislaskennan periaatteita

Kulkeutumislaskennan tulokseen vaikuttaa muun muassa se käytetäänkö laskennan lähtötietona ennusteita, havaintoja tai niiden kombinaatiota. Kuvassa 25 on esitetty viisi periaatteellisesti eri tapaa tehdä kulkeutumislaskenta riippuen siitä, mitä lähtötietoja kulkeutumismallille annetaan. Laskennat, joissa käytetään laskentaajalta havaintoja eivät ole ennusteita, vaan paremminkin jälkikäteen laadittuja analyysilaskelmia. Ennustamisessa pyritään kuvaamaan tulevaisuutta eikä havaintoja luonnollisesti ole käytettävissä. Havainto ei myöskään ennakoivu muutosta. Operatiivisissa ohjelmissa kuten Seatrack Web:ssä havaintoja sisältyy laskentaprosessiin ainoastaan ennustetta edeltävältä ajalta. Jatkossa esitetyistä laskennoista kaikki Seatrack Web –ohjelmalla laaditut kulkeutumislaskennat vastaavat operatiivista laskentaa.

Merellä tapahtuvan pintakulkeutumisen laskennassa on mahdollista ottaa huomioon vaihteleva määrä eri tekijöitä. Kulkeutumistrajektorin voi laskea pelkästään tuuliarvojen perusteella. Kun kulkeutumislaskentaan lisätään virtausennusteet tai -havainnot, niin kulkeutuminen muodostuu sekä tuulen suoran vaikutuksen (*wind drift*) että virtauskomponentin yhteisvaikutuksesta. Edellisten lisäksi Kuvassa 26 on esitetty kokonaiskulkeutumisen laskentaan vaikuttava mahdollinen kolmas komponentti, joka kuvaa muiden laskentatekijöiden kuten satunnaiskertoimen, sorron tai aallokon vaikutusta.



Kuva 25. Kulkeutumislaskennan variaatioita tuuli- ja virtausennusteiden sekä havaintojen käytön perusteella.



T = tuulen suora vaikutus kulkeutumiseen eli (wind drift) suuruus esim. 2% tuulesta
 V = veden virtauksen aiheuttama kulkeutuminen
 S = satunnaistekijä, sorto, allokko tms.
 $K = T + V + S =$ Kulkeutumismatka

Kuva 26. Kulkeutumisen laskenta vektorisummana.

7.2 3D-simuloinnit ja eri tuuliprosentit laskennassa

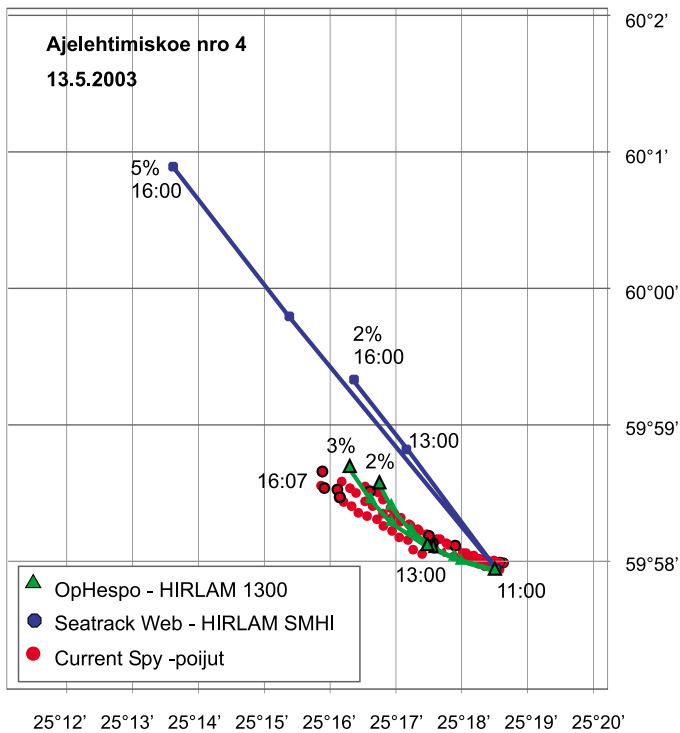
Seatrack Web:llä ja OpHespo:lla tehtiin laskentoja, joissa vaihdettiin tuulen osuutta kulkeutumisen laskennassa. Kulkeutumistrajektorit laskettiin virtauksen, suoran tuulivaikutuksen sekä kulkeutumista kuvaavien partikkelien satunnaishajonnan perusteella (vrt. Kuva 26). Tuulivaikutuksen voi valita kummassakin ohjelmassa tietyksi prosenttiosuudeksi ennustetusta tuulesta. Lasketuissa OpHespo-trajektoreissa suora tuulivaikutus kulkeutumiseen on 2-3 % ja Seatrack Web laskennoissa 0,5-5 %. Laskentoja tehtiin eri tuuliprosenteilla, jotta nähdään millaisia eroja syntyy riippuen siitä mitä tuuliprosenttia käytetään. Seatrack Web -ohjelman käyttöliittymässä tuuliprosentin oletusarvo öljyn kulkeutumislaskentoihin on 2 %. Tulokset on esitetty Kuvissa 27-29.

Tässä esitetyt OpHespo-laskennat eivät ole operatiivisia ennusteita, sillä laskennassa käytettyjä Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-ennusteita muunnettiin kääntämällä tuulten suuntaa 15° vasemmalle, jolloin koealueen tuuliennuste vastasi paremmin Arandalla ja Kalbådagrundilla mitattua tuulen suuntaa. Seatrack Web:ssä SMHI:n päivittäin ohjelmalle tuottamia HIRLAM-SMHI ennusteita ei muutettu laskennoissa mitenkään.

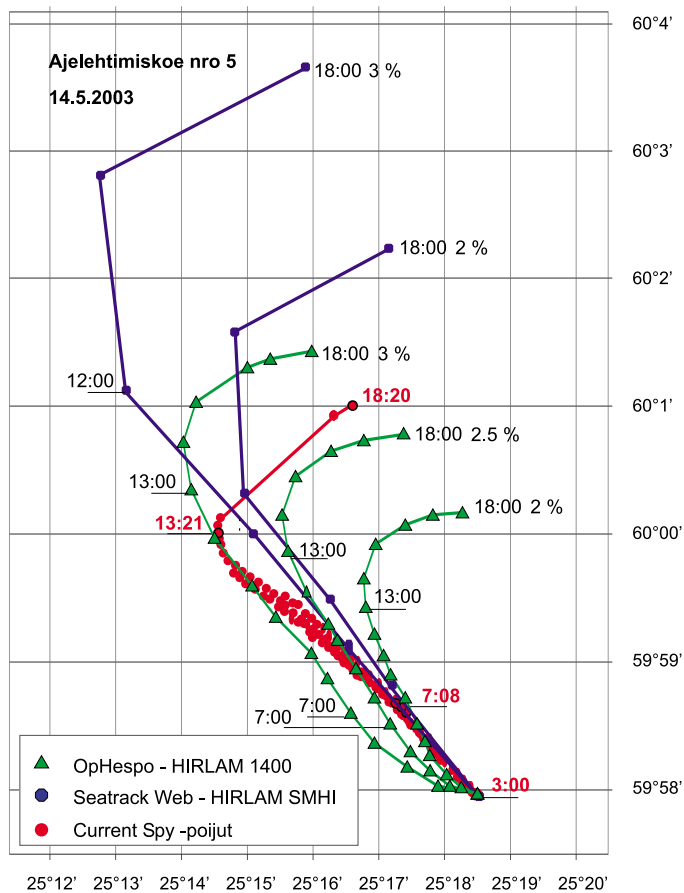
Molemmat ohjelmat tuottivat hyvin havaintojen kanssa yhteensopivat trajektorit kokeessa nro 4, kun tuuliprosentti oli 2-3 %. Kun tuuliprosentiksi valittiin 5 %, laskettu kulkeutumisenopeus oli jo selvästi liian suuri verrattuna poijujen nopeuteen. Laskettujen trajektorien suunta vastaa kohtuullisesti poijujen kulkusuuntaa. OpHespo:lla laskettu kulkeutumissuunta olisi eronnut poijujen kulkusuunnasta samoin kuin Seatrack Web laskenta Kuvassa 27, mikäli HIRLAM-ennustetuulia ei olisi käännetty.

Kokeessa nro 5 Seatrack Web -ohjelmassa 2 % suuruisen suoran tuulivaikutuksen käyttö on parempi kuin 3 %. OpHespo:ssa 2,5 %-3 % käyttö johtaa parhaaseen lopputulokseen. Kaikki laskennat toistavat ajallaan poijujen liikesuunnan muutoksen, mutta nähdään, että tuuliprosentin valinta vaikuttaa merkittävästi laskettuun kulkeutumismatkaan erityisesti, koska tämän kokeen aikana oli kova tuuli.

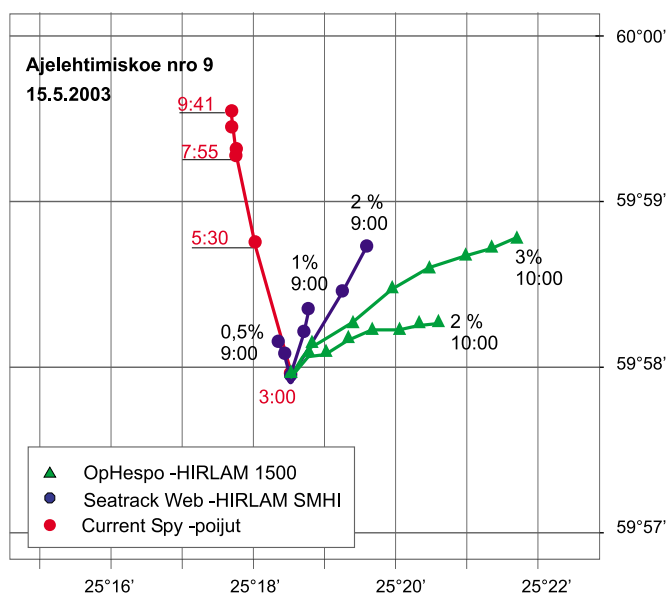
Kokeeseen nro 9 liittyen OpHespo:lla lasketut kulkeutumistrajektorit menevät täysin väärään suuntaan (Kuva 29), sillä virtausta ei osattu ennustaa oikein. Seatrack Web:llä tehtiin kolme laskentaa, joissa tuulen vaikutusta kulkeutumiseen pienennettiin. Tällöin ennusteen suunta kääntyi ennustetun virtauksen ja poijujen liikesuunnan mukaiseksi, mutta laskettu kulkeutumisenopeus pieneni liikaa, sillä 0,5 % tuulivaikutuksella laskettu trajektori on lyhyt. Ennustettujen virtausten voimakkuus oli liian pieni todellisiin verrattuna.



Kuva 27. Poijuhavainnot kokeessa nro 4 ja OpHespo sekä Seatrack Web -ohjelmilla tehdyt laskelmat, joissa ennustetuulen suora vaikutus kulkeutumiseen oli 2-5 %.



Kuva 28. Poijuhavainnot kokeessa nro 5 ja OpHespo sekä Seatrack Web ohjelmilla tehdyt laskelmat, joissa ennustetuulen suora vaikutus kulkeutumiseen oli 2-3 %.



Kuva 29. Poijuhavainnot kokeessa nro 9 ja OpHespo sekä Seatrack Web -ohjelmilla tehdyt laskelmat, joissa ennustetulten suora vaikutus kulkeutumiseen on 0,5-3 %.

7.3 Pintakulkeutumislaskennat eri tuulitietoja käyttäen

Pintakulkeutumismalleilla laskettiin ennusteita liittyen kokeisiin nro 4 ja 5 (Kuvat 30 ja 31). Laskennoissa käytettiin useita tuuliennusteita sekä Arandalla tehtyjä tuulihavaintoja. Aallokon vaikutus kulkeutumiseen ei ollut näissä laskennoissa mukana. Trajektorien pituudet eroavat toisistaan, koska laskennoissa on käytetty eri suuruisia tuuliarvoja sekä eri tuulikertoimia. Lisäksi Kuvassa 30 pitää ottaa huomioon, että osa trajektoreista on ajallisesti pidempiä kuin poijuhavainnot, johtuen ennusteohjelmien aikaresoluutiosta.

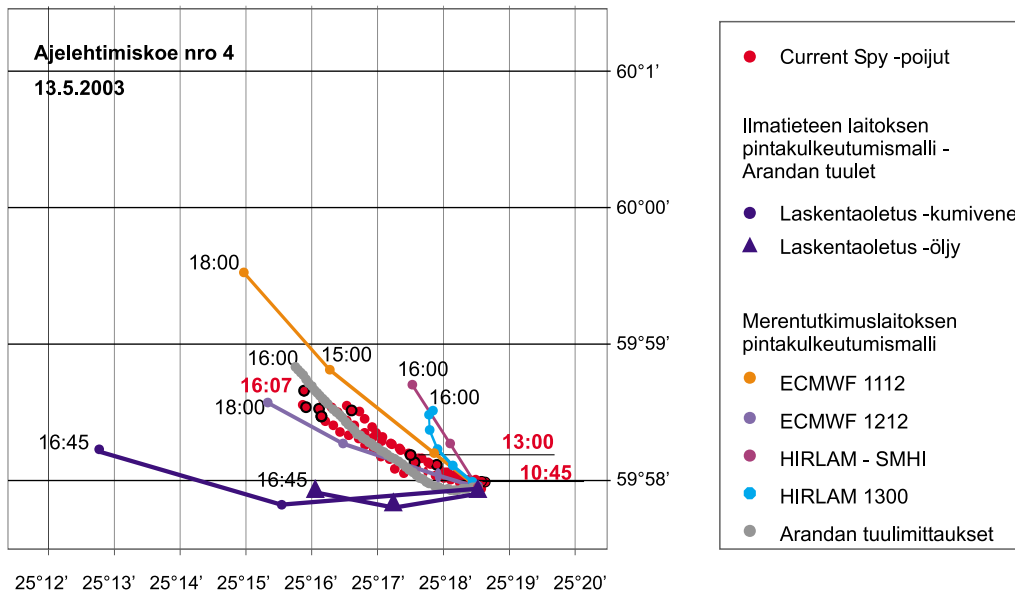
Ilmatieteen laitoksen mallilaskennoista osa on tehty olettaen että meressä ajelehtii kumivene ja osa niin, että meressä on öljyä. Laskentaohjelmassa kumiveneelle on määritetty olennaisesti suurempi tuuliprosentti kuin öljylle, joten trajektoreista ne, jotka on laskettu kumiveneoletuksella, ovat selvästi pidempiä kuin poijujen kulkeutumistrajektori. Kumivene kulkeutuisi merellä todellisuudessa nopeammin kuin Current Spy -poijut. Kun simuloitiin öljyn liikettä, lasketut kulkeutumissopeudet olivat 10-11 cm/s eli samaa suuruusluokkaa kuin poijujen nopeus.

Parhaimmat laskentatulokset saatiin, kun lähtötietona käytettiin Arandalla mitattuja tuulia. Myös tuuliennusteisiin perustuva laskenta tuotti kokeessa 4 hyvät tulokset (Kuva 30). Kaikki lasketut trajektorit sijoittuvat kohtalaisen samansuuntaisesti poijuhavaintojen kanssa. ECMWF-ennusteissa tuulen nopeudet olivat voimakkaampia kuin HIRLAM -ennusteissa, mikä näkyy kulkeutumistrajektorien pituuksissa.

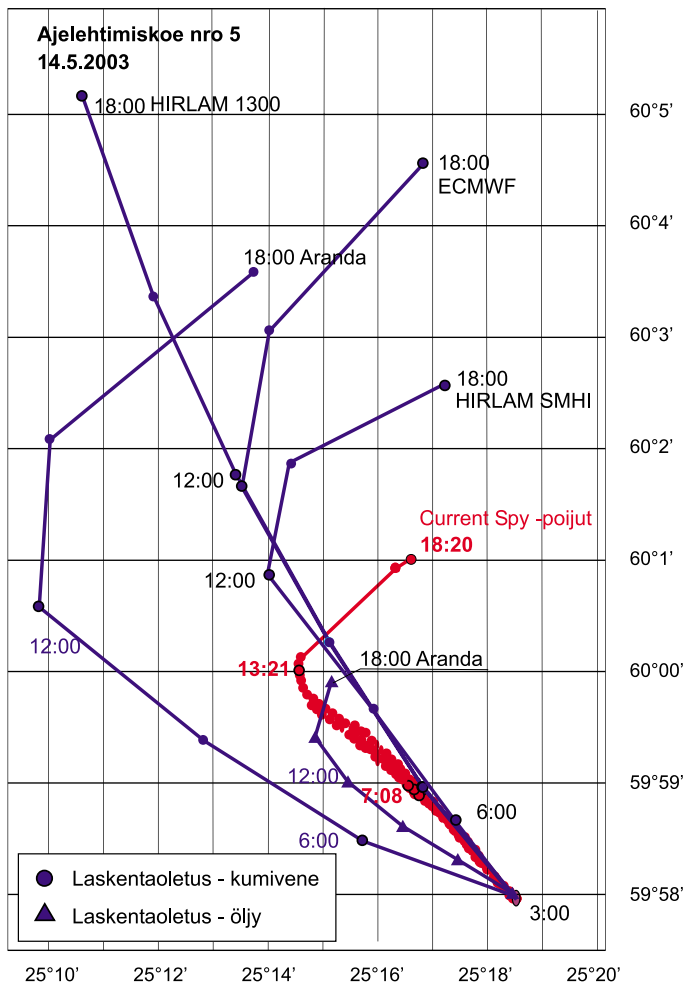
Samoja tuulihavaintoja käytettiin kahdessa pintakulkeutumislaskentaohjelmassa liittyen kokeeseen 4. Ennustetrajektorien suunnassa on kuitenkin poikkeamaa (Kuva 30) eli jopa näiden yksinkertaisten pintakulkeutumishjelmien ratkaisutavoissa olevat erot ovat sellaisia, että ne heijastuvat laskennan lopputuloksiin. Oli yllättävää, että Ilmatieteen laitoksen pikamallilla tehdyt laskennat suuntautuivat niinkin huomattavasti vasemmalle verrattuna Arandalla mitattuun tuuleen.

Tuulitietojen laadun vaikutus laskettuihin trajektoreihin ilmenee selvästi kokeessa 5 (Kuva 31). Ilmatieteen laitoksen pikamallilla tehdyistä laskennoista yksi trajektori ei käänny lainkaan, koska tuuliennusteessa ei ollut mukana tuulen äkillistä kääntymistä. Muut eri tuulitiedoilla lasketut trajektorit kääntyvät klo 12-15 välillä koilliseen, jolloin myös poijujen kulkusuunta muuttui.

Merentutkimuslaitoksen pintakulkeutumismallilla laskettiin lisäksi ennusteita liittyen kokeeseen nro 9. Lasketut kulkeutumissuunnat poikkesivat huomattavasti havainnosta. Ohjelmalla ei voitu kuvata poijujen liikettä oikein, koska virtausten vaikutusta ei ollut laskennassa mukana.



Kuva 30. Merentutkimuslaitoksen pintakulkeutumismallilla tehdyt laskennat eri tuulitiedoilla sekä Ilmatieteen laitoksen laskennat, joissa on käytetty ainoastaan Arandan tuulimittauksia.



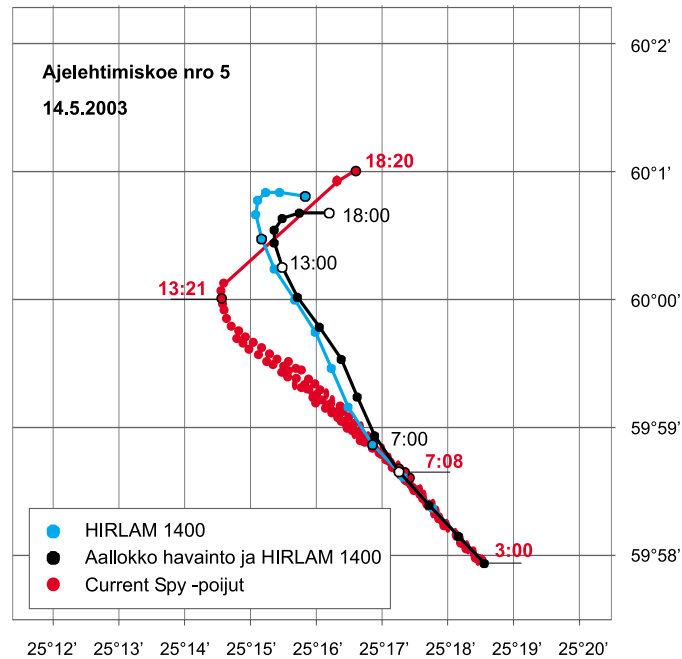
Kuva 31. Ilmatieteen laitoksen pikamallilla laaditut simuloinnit, joissa käytettiin neljää eri tuulitietoa. Neljässä laskennassa laskentaoletuksena oli kumiveneen ajelehtiminen ja yhdessä öljyn ajelehtiminen.

7.4 Aaltojen vaikutus

Yksinkertaisen aaltoteorian mukaan vesiosaset liikkuvat aaltojen vaikutuksesta vertikaalitasossa suljettuja ratoja ympäri, jolloin aallokolla ei ole vaakasuoraan kulkeutumiseen nettovaikutusta. Jo 1800-luvun puolivälissä Stokes analysoi aallokon vaikutusta tarkemmin ottaen huomioon liikeyhtälöiden toisen kertaluvun termit ja havaitsi, etteivät vesiosasten radat sulkeudukaan, vaan syntyy nettovirtaus aallokon menosuuntaan. Aallokon vaikutus kulkeutumiseen on kuitenkin teoreettisestikin huomattavan monimutkainen ongelma. Se voidaan laskea yleisessä tapauksessa aallokon spektriä hyväksikäyttäen, jolloin päädytään laskukaavaan, jossa aallokon aiheuttama horisontaalinen kulkeutumiskomponentti riippuu aallokon suunnasta, merkittävästä aallonkorkeudesta ja aallokon periodista.

Kun aallokkotietoa on mittauksista tai aaltomallista käytettävissä, Merentutkimuslaitoksen yksinkertaiseen pintakulkeutumismalliin on mahdollista sisällyttää aallokon vaikutus. Tällöin kulkeutumismallille annetaan lähtötietoina tuulen suunnan ja nopeuden lisäksi myös aallokon suunta, merkittävä aallonkorkeus ja periodi. Suomenlahdella aallokon suunta voi poiketa huomattavasti tuulen suunnasta (Pettersson 2001), jolloin tilanteesta riippuen aallokon aiheuttamalla kulkeutumiskomponentilla voi olla merkitystä laskennan lopputulokseen.

Ajelehtimiskokeeseen nro 5 liittyen laskettiin kulkeutumisarvio pelkkiä tuulitietoja käyttäen ja toinen arvio siten, että sekä tuuli- että aallokkotiedot otettiin mukaan. Tuona päivänä aallokon suunta oli Suomenlahden suuntainen, aluksi aallokko tuli idästä ja puolenpäivän jälkeen lännestä (Kuva 17). Aallokko vaihtoi suuntaansa yhtä nopeasti kuin tuulikin. Kuvassa 32 nähdään, että jo runsaan puolen vuorokauden kuluessa aallokon hieman tuulen suunnasta poikkeava kulkeutumiskomponentti muutti laskettua kulkeutumisrataa aallokon menosuuntaan. Lasketujen trajektorien päätepisteet eroavat laskennan lopussa toisistaan 400 m ja poijuksen sijaintipaikasta noin 800 m.



Kuva 32. Koe nro 5. Merentutkimuslaitoksen pintakulkeutumismallilaskennat, joissa on HIRLAM 1400 -tuuliennuste. Aallokon vaikutus on mukana toisessa laskennassa.

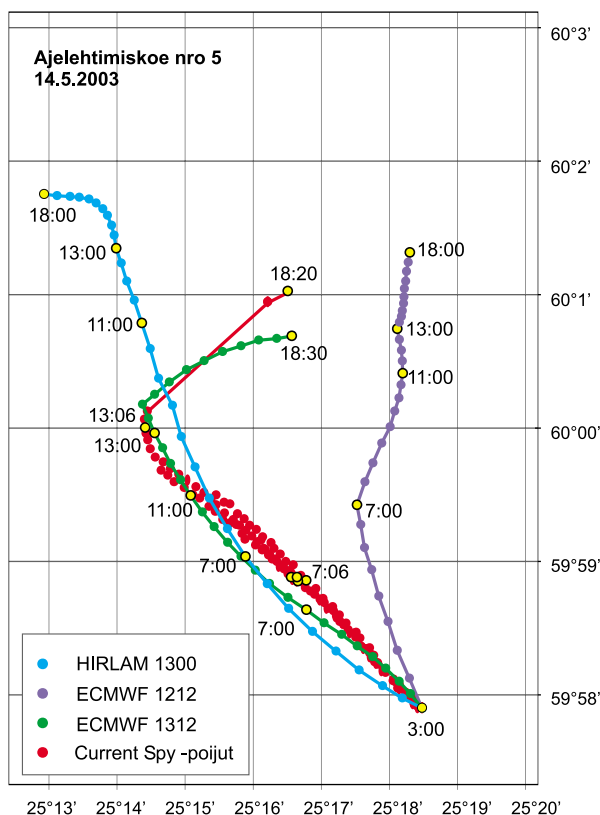
7.5 3D-simuloinnit eri tuuliennusteilla

Ajelehtimiskokeeseen nro 5 liittyen tehtiin laskennat Merentutkimuslaitoksen 3D-mallilla käyttäen kolmea eri tuuliennustetta ja tutkittiin, miten ne vaikuttavat kulkeutumislaskennan lopputulokseen. Simuloineissa käytettiin sekä HIRLAM että ECMWF -mallien meteorologisia ennustekenttiä.

Kymmenen metrin korkeudelle ennustettuja tuulia muunnettiin kertomalla ennustetuulien nopeudet 0,6:lla ja kääntämällä suuntaa 15 astetta vasemmalle. Meren virtauskentät laskettiin näin ollen käyttäen meteorologisena pakotteena modifioituja HIRLAM ja ECMWF -ennusteita. Kulkeutumislaskennassa poijujen liike määräytyy sekä virtausten että tuulen suoran vaikutuksen perusteella. Tuuliennusteen suora vaikutus kulkeutumiseen oli laskennoissa 3 %.

ECMWF-ennusteista tuoreimman eli ECMWF 1312 -ennusteen käyttö tuotti parhaan tuloksen, sillä laskettu kulkeutumistrajektori on jokseenkin sama kuin havaittu reitti (Kuva 33). Tämä tuuliennuste olikin kappaleen 4. tarkastelujen mukaan laadultaan paras. Sen sijaan ECMWF 1212 -ennuste oli 1312-ennusteeseen nähden hiukan erilainen tuulennopeuden ja -suunnan suhteen (Kuvat 20 ja 21), mikä johti laskettuun poijujen kulkeutumiseen lähinnä kohti pohjoista. Eri analyysiajan ECMWF-ennusteisiin pohjautuvat reitit eroavat toisiinsa nähden heti alusta lähtien ja lopussa ero on jo varsin huomattava, koska simuloinneissa poijujen reitillä vallitsivat erilaiset tuuli- ja virtausolosuhteet.

HIRLAM 1300 -ennuste antoi tässä tilanteessa huonoimman tuloksen, koska se ei ennustanut tarkasti tuulen nopeaa kääntymistä kaakosta lounaaseen (ks. luku 4). Näin ollen kulkeutumislaskennassa poijun liike suuntautui liian paljon luoteeseen, eikä käännöstä koilliseen tapahtunut.

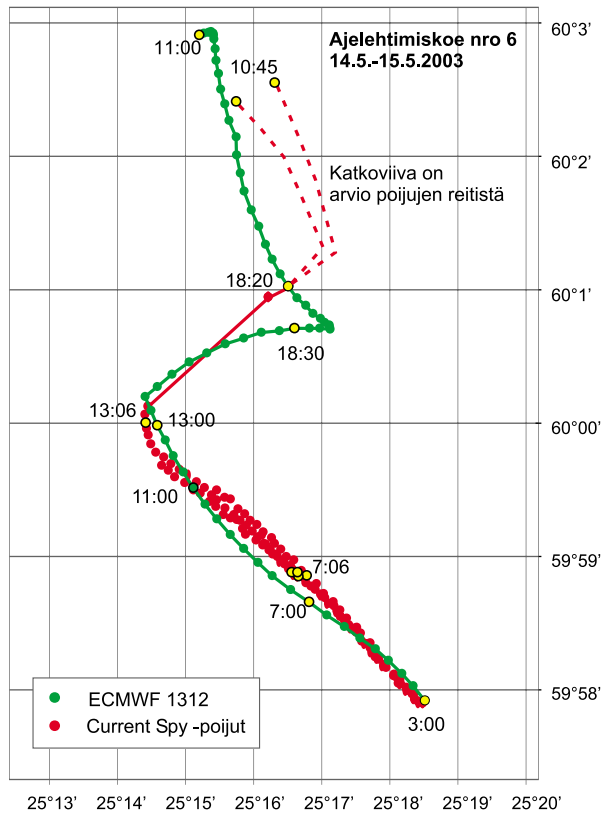


Kuva 33. Koe nro 5. Kolmella tuuliennusteella Merentutkimuslaitoksen 3D -mallilla tuotetut kulkeutumissimulaatiot sekä poijuhavainnot.

7.6 Yli vuorokauden pituinen laskenta

Mielenkiintoinen tapaus on koe 6 eli kahden Current Spy -poijun lähes 32 h kestänyt ajelehtiminen. Poijut laskettiin mereen 14.5.03 klo 3:00 UTC, ja niiden havainnointi lopetettiin Arandalta saman päivän iltana. Poijut löydettiin seuraavana päivänä Kuvaan 34 merkityistä kohdista, mutta niiden yöllinen kulkeutumisreitti ei ole tarkalleen tiedossa, joten kuvaan on katkoviivalla piirretty arvio poijujen reitistä.

Mallisimuloinnissa käytettiin jo aiemmin hyväksi havaittua ECMWF 1312-ennustetta. Simuloinnin tuloksena saatu trajektorii päättyy hyvin lähelle kohtaa, josta poijut tämän pitkähkön ajelehtimisjakson jälkeen löytyivät. Malli kuvaa samoin hyvin poijujen reitissä havaitun ja arvioidun suunnan muutokset. Kun toinen laskettu käänös poijujen suunnassa tapahtui, tuuli ei kääntynyt vaan ainoastaan heikkeni. Tässä tapauksessa virtaussuunta kääntyi pohjoiseen ja poijut liikkuivat myös em. suuntaan, sillä tuulen suora vaikutus poijujen liikkeeseen oli heikko. Tapaus osoittaa, että malli voi olla hyvinkin käyttökelpoinen apuväline kulkeutumissennusteissa, jopa hankalissakin tuuli- ja virtaustilanteissa, mikäli meteorologinen ennuste on laadukas.



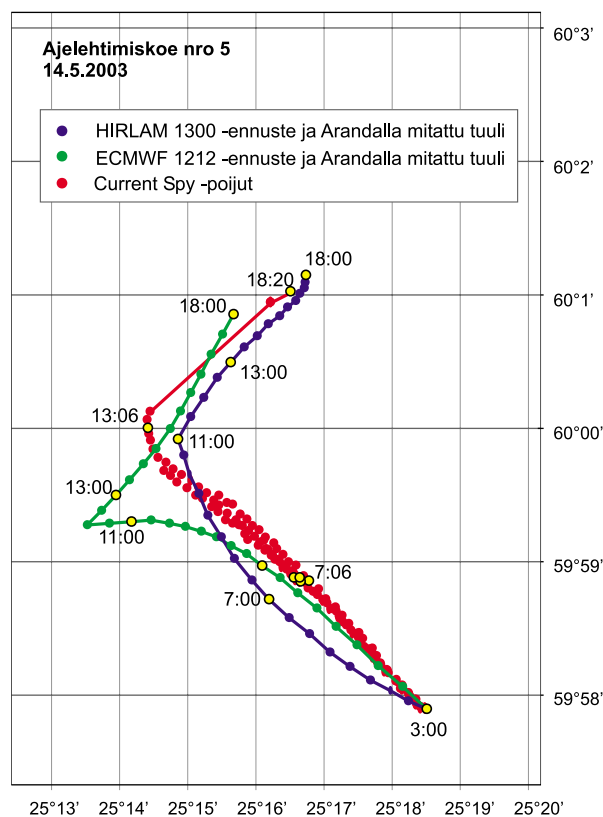
Kuva 34. Poijujen havaittu ja osittain arvioitu liikerata kokeessa nro 6 sekä Merentutkimuslaitoksen 3D –mallilla laskettu kulkeutumissimulaatio, jossa Euroopan keskuksen tuuliennuste.

7.7 Tuulihavainnot mukana laskennassa

Eräs tapa tutkia lähinnä meteorologisten mallien luotettavuutta ja paikallisen tuulen merkitystä simulointitulosten tarkkuuteen on käyttää tuuliennusteen lisäksi myös tuulihavainnointia Arandalta, joiden voidaan katsoa olevan varmasti "oikeita" ja kuvaavan juuri niitä tuuliolosuhteita, joissa poijut liikkuivat. Näiden simulointien kulkeutumislaskentaosiossa poijuihin kohdistuva suora tuulivaikutus pohjautui Arandan tuulimittauksiin. Veden virtauskentät laskettiin tavanomaisella tavalla eli ilmakehämallien meteorologisten ennusteiden pakottamana.

Kahden kokeeseen nro 5 liittyvän kulkeutumissimuloinnin tulokset Kuvassa 35 ovat hyviä. HIRLAM 1300 -ennusteiden käyttö antoi hieman paremman tuloksen kuin ECMWF 1312 -ennusteiden. Verrattaessa näitä trajektoreja Kuvassa 33 esitettyihin laskentoihin huomataan, että ne ovat täysin erilaiset, vaikka virtaukset on laskettu samoilla tuuliennusteilla. Vaikuttaa siltä, että tuuliennusteiden perusteella lasketun virtauskentän merkitys oli näissä kulkeutumislaskennoissa vähäinen. Tuuli oli kokeen aikana navakkaa 6-14 m/s, ja simuloitujen kulkeutumistrajektorien suunnan osalta laskennassa määräävä tekijä näyttää olevan Arandan tuuliin perustuva suora tuulivaikutus (Kuva 35), koska HIRLAM 1300 -ennusteeseen ei sisällynyt tuulen kääntymistä lounaaseen.

Ainakin tämän yksittäisen tapaustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että todellisuutta vastaava kulkeutuminen pystytään tutkijamielessä simuloimaan erittäin hyvin virtausmallin, tuuliennusteiden sekä ajankohtaan liittyvien tuulihavaintojen perusteella.

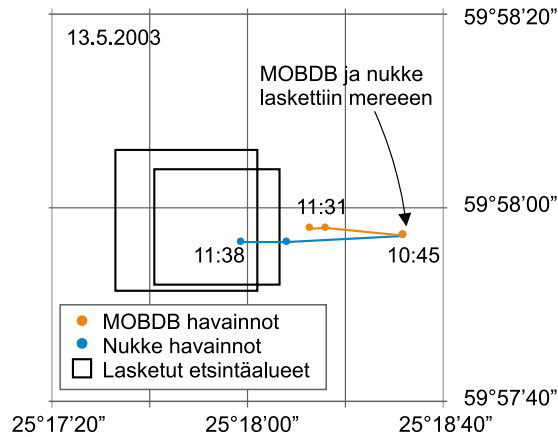


Kuva 35. Kaksi Merentutkimuslaitoksen 3D -mallilla laskettua kulkeutumissimulaatiota sekä poijuhavainnot. Kulkeutumislaskennoissa on käytetty Arandan tuulihavaintoja sekä kahta eri tuuliennustetta.

7.8 Etsintätilannetta kuvaavat laskennat

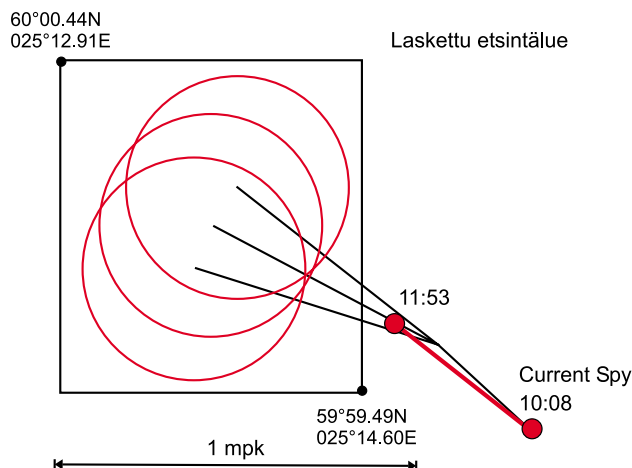
Suomenlahden merivartiosto laski kaksi noin tunnin mittaista kulkeutumisennustetta liittyen nukun ja MOBDB-pojujen ajelehtimiseen. Laskentaoletuksena oli että veden varassa on ihminen, jonka etsintää ajatellen laskettiin etsintäalueet. Nukun ajelehtimisaika oli seitsemän minuuttia pidempi kuin pojun ja Kuvasta 36 näkyy, että jo pieni ero laskenta-ajassa vaikuttaa etsintäalueen määräytymiseen. Nukelle määritetty etsintäalue on laskennan lähtöpisteestä hieman etämmällä kuin pojulle laskettu. Laskennassa otettiin huomioon koetta edeltäneet tuuliolosuhteet.

Lähtötietoina käytettiin Arandan tuulihavaintoja, joiden perusteella ohjelma laski tuulen vaikutuksen kappaleeseen ja tuulivirran. Ajelehtimaan laskettu nukke löytyi määritetyn etsintäalueen sisältä, mutta MOBDB-poiju lasketun etsintäalueen ulkopuolelta. Laskenta oli onnistunut, sillä nukke kuvaa paremmin veden varassa olevan ihmisen ajelehtimista kuin MOBDB-poiju.



Kuva 36. Kokeet nro 1 ja 2 eli nukke ja MOBDB-poijun ajelehtiminen sekä Suomenlahden merivartioston laske-
mat kaksi etsintäaluetta hie-
man eri ajanhetkille.

Ajelehtimiskokeeseen nro 5 liittyen laadittiin ajelehtimislaskelma ajalle 14.5.03 10:08-11:53 UTC (Kuva 37). Laskenta tehtiin vajaat kaksi tuntia pitkälle jaksolle, sillä todellisissakin etsintätilanteissa laadittavat ennusteet ovat yleensä lyhyitä. Kulkeutumiseen vaikuttava tuulivirta laskettiin Arandalla klo 00:05-10:04 UTC mitat-
tujen eli koetta edeltäneiden tuulien perustella. Merivirran vaikutusta ei otettu laskennassa huomioon. Ihmisen ajelehtimistapauksessa laskennassa käytettiin sor-
tona 10 %, jonka vaikutus näkyy viuhkamaisesti leviävän trajektorin loppuosassa. Ihmisen etsintätilanteeseen laskettu etsintäalue sijoittui hieman pidemmälle kuin poi-
ju ehti tässä ajassa kulkeutua. Current Spy -poiju liikkui meressä näin ollen hi-
taammin kuin ihmisen oletetaan laskennan mukaan ajelehtivan kokeen olosuh-
teissa.



37. Koe 5. Suomenlahden merivartioston ajelehtimis laskenta ajalle 10:08-11:53 UTC. Laskentaoletus oli, että vedenvarassa on ihminen. Sorron vaikutus etsintäalueen määräytymiseen on esitetty ympyröillä.

Yhteenveto

Ajelehtimiskokeet ajoittuivat mielenkiintoisille päville, sillä kokeiden aikana sää vaihteli merkittävästi. Tuulet vaihtelivat voimakkaasti kovasta tuulesta ja rintaman ylityksestä aivan tyyneen tilanteeseen. Tällainen vaihtelu on etsintöjen kannalta vaikea tilanne sekä kulkeutumislaskentojen kannalta erityisen vaativa.

Osoittautui, että erilaiset ajelehtimislaskentamallit toimivat hyvin erilailla. Yleisesti ottaen yksinkertaiset pintakulkeutumismallit soveltuvat hyvin kulkeutumislaskentojen tekoon, kun virtauksen suunta ei merkittävästi poikkea vallitsevasta tuulesta ja käytettävissä on hyvät sääennusteet. Ajelehtimiskokeissa tuli selvästi esiin, että pintavirtauksen suunta voi avomerelläkin poiketa huomattavasti tuulesta ja tällöin kulkeutumislaskennan onnistumisen edellytyksenä on, että myös meren virtaus määritetään ja tieto sisällytetään kulkeutumislaskentaan. Paras tulos saavutetaan, kun virtaus- ja kulkeutumismallin lähtötietoina käytetään mahdollisimman uutta sääennustetta. Säätilan muutokset voivat olla nopeita ja onnettomuus- ja etsintätilanteissa on siksi syytä toistaa merimallien ennustelaskelmat aina, kun ilmakehämallit antavat uuden ennusteen.

8.1 Poijujen käytettävyys ajelehtimiskokeissa

Current Spy -poijujen liike määräytyy pääasiallisesti pintakerroksen virtauksen mukaan. Kun virtaus on tuulensuuntainen, poijun liike saattaa hieman yliarvioida pintavirtauksen nopeutta. Kokeet osoittivat, että poijut kuvaavat hyvin noin metrin paksuisen pintakerroksen virtausnopeuden, joka nyrkkisäännön mukaan on merellä 1-3 % tuulesta. Kahtena koepäivänä poijujen keskinopeus oli 1,8 % Arandalla mitatusta tuulesta ja melko lailla tuulen suuntainen. Arvo muuttuu, josta tuulihavaintoja korjataan korkeuden suhteen. Pienennettäessä Arandalla mitattuja tuulennopeuksia 15 %, ne kuvaavat paremmin 10 m tuulta. Tällöin poijujen nopeus muuttuu suuremmaksi suhteessa tuuleen ja oli koepäivinä 2,1 % tuulesta.

Current Spy -poijut soveltuvat käytettäväksi merellä erityisen hyvin alueilla, joissa GSM-yhteys on kattava. Ajelehtimiskokeiden jälkeen selvisi, että poijujen tiedonlähetyksen ongelmat johtuivat siitä, että ne olivat jääneet virransäätötilaan, jossa ne lopettivat paikkatiedon lähetyksen kesken kokeen. Tämä vaikutti myös siihen, että poijut lakkasivat tallentamasta paikkatietoa omaan muistiinsa kesken ajelehtimiskokeen. Poijujen ohjelmisto korjattiin kokeen jälkeen.

Pojujen tiedonvälitys aiheuttaa merellä ongelmia alueilla, joille GSM-verkko ei ylety tai kuuluvuus on heikko. Lisäksi kova merenkäynti huonontaa kuuluvuutta hyvilläkin kuuluvuusalueilla. Nykyisissä poijuissa ei ole tutkaheijastinta, mutta uusien poijujen sisään on mahdollista valmistuksen yhteydessä laittaa tehokas tutkaheijastin. Tämä helpottaisi poijujen paikannusta merellä. Satelliitin kautta tapahtuva tiedonvälitys takaisi poijujen tiedonsiirron toimivuuden kaikkialle Suomen merialueilla. Yhden Current Spy:n tiedonvälitys on muutettu kokeiden jälkeen satelliittiyhteyteen perustuvaksi.

Merellä käytettävien laitteiden tulee olla kestäviä ja käsiteltävyydeltään meriolosuhteisiin sopivia. Parin Current Spy -poijun antennin suoja-kuori vaurioitui ensimmäisessä merikokeessa, joten antennien suojausta parannettiin kokeen jäl-

keen Pirkanmaan ympäristökeskuksessa. Käsiteltävyyden parantamiseksi poijuihin lisättiin myös nostolenkki. Muutostöiden ansiosta poijujen kestävyys ja käsiteltävyys on parantunut.

MOBDB-pojjut soveltuvat erittäin hyvin lyhytaikaiseen pintavirtauksen määrittämiseen, sillä niissä ei juurikaan ole veden yläpuolella olevaa tuulipinta-alaa. Niiden näkyvyys merellä oli kuitenkin heikko, sillä päivällä tehdyssä kokeessa ja pienessä aallokossa ne katosivat nopeasti näköpiiristä. Nämä pienikokoiset poijut eivät siis sovellu jätettäväksi pitemmäksi ajaksi mereen, sillä ne katoavat helposti. Pimeässä poijujen näkyvyys on oletettavasti hyvä niissä olevan valon ansiosta, joten ne soveltunevat myös yöllä hetkellisen pintavirtauksen määrittämiseen.

8.2 Tuulihavainnot kulkeutumislaskelmissa

Sääasemien tuulitiedot eivät ole sellaisenaan suoraan käyttökelpoisia ajelehtimislaskelmien lähtötiedoiksi. Kussakin tapauksessa on ensiksi arvioitava havaintopaikan soveltuvuus lähtötiedoksi. Ensinnäkin tulee arvioida havaintoaseman etäisyys tutkittavasta alueesta ja havaintojen edustavuus kulloisessakin säätilanteessa. Muuttumattomassakin säätilassa erot ulkomeren ja ulko- tai sisäsaariston välillä voivat olla liian suuria, jotta saaristoalueella tehtyjä havaintoja voitaisiin käyttää avomeri-havaintoina. Muun muassa kevätkesällä esiintyvissä merituulitilanteissa rannikon olosuhteet poikkeavat avomeren olosuhteista.

Havainnot on muutettava aseman mittauskorkeudelta 10 metrin tasolle merenpinnasta ja tehtävä ilmakehän alimman kerroksen lämpötilajakautumasta (stabiili-suudesta) johtuvat korjaukset tuulen suuntaan ja -nopeuteen. Sama tulee tehdä myös laivahavainnoille, oli ne sitten tehdyt Arandalla tai jollain muulla onnettomuusalueella säähavaintoja tekevällä aluksella. Lisäksi on pidettävä mielessä mahdolliset laivojen itsensä omalla rungollaan aiheuttamat virheet tuulihavaintoihin.

Ajelehtimistä laskettaessa olisi hyvä simuloida tilannetta usealla eri tuulen lähtötietopakettilla. Nämä olisivat säätilasta riippuen rakennettu havainnoista tietäen havainnoissa piilevät ongelmat. Tämä vaatii kehitystyötä ja mallintamista, mutta tuloksena saataisiin joukko mahdollisia ajelehtimisreittejä, joissa tuulen luontainen vaihtelevuus olisi otettu huomioon.

8.3 Tuuliennusteet kulkeutumislaskelmissa

Tuuli voi muuttua kulkeutumisenennusteen voimassaoloaikana rajustikin. Siksi tuuliennusteiden käyttö virtaus- ja kulkeutumislaskennoissa on erittäin suositeltavaa, varsinkin kun tuuli on merkittävin tekijä sekä virtaus- että kulkeutumislaskennan lopputuloksen kannalta.

Kullekin ajanhetkelle on olemassa useita tuuliennusteita. Tässä tilannetutkimuksessa oli mukana Suomen Ilmatieteen laitoksella käytössä olevat HIRLAM-mallin ja ECMWF-mallin sekä Ruotsissa SMHI:n käytössä olevat HIRLAM-mallin tuuliennusteet usealta eri ajankohdalta. Sääennustusmallien laatu on keskimäärin hyvä, mutta koska malleihin ei voida ottaa mukaa kaikkia ilmakehän virtauksiin vaikuttavia ilmiöitä, esim. yksittäisiä kuuropilviä, joudutaan virtausyhtälöitä yksinkertaistamaan. Tämä yksinkertaistaminen johtaa siihen, että mallit kuvaavat erikokoisia ilmakehän ilmiöitä. Lisäksi mallit käyttävät eri lähtötietoja, havaintoja. Lopputuloksena eri mallien ennusteet saattavat poiketa toisistaan melkoisestikin. Etukäteen ei voida tietää, millä mallilla laadittu tuuliennuste on laadukkain.

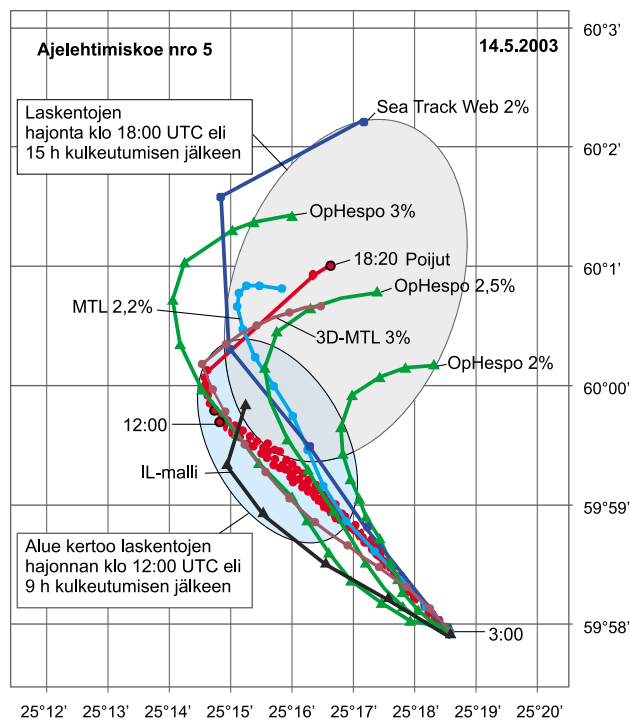
Tässäkin tutkimuksessa havaittiin, että analyysiajasta tai mallista riippuen samalle ajankohdalle laaditut sääennusteet voivat poiketa toisistaan. Koska tuuliennusteita päivitetään usein, jopa neljä kertaa päivässä, niin kulkeutumislaskenta kannattaa tehdä käyttäen tuoreimpia tuuliennusteita.

Sääennustusmallin hilakentistä poimitut tuuliennusteet, tai sääennusteet, ovat hilaruutukeskiarvoja. Esimerkiksi HIRLAM-mallissa hilaruudun koko on tällä hetkellä 22 km x 22 km. Alkuperäisestä laskentahilastaan ne voidaan interpoloida tiettyyn maantieteelliseen pisteeseen, mutta jos merellisessä hilaruudussa on esim. saaria, ei kapeiden salmien tuulen vaihteluita saada mukaan. Toisaalta eri tuuliennusteiden käyttöä kulkeutumislaskentojen lähtötietona helpotta käytännössä se, että kaikissa ilmakehämalleissa lasketaan 10 metrin tuulet.

Operatiivisia ajelehtimislaskelmia tehtäessä on muistettava, että ennusteajan kasvaessa tuuliennusteiden, ja yleensäkin sääennusteiden laatu huononee. Esimerkiksi rintaman tarkkaa ylitysjankohtaa ei kannata arvioida monen vuorokauden päähän, mutta toisaalta ennuste antaa usein varoituksen odotettavissa olevista säätilan muutoksista. Ennusteessa tapahtuvien muutoksien osalta on lisäksi otettava huomioon, että tuuliennusteiden aikaresoluutio on parhaimmillaan 1 tunti eli malli tasoittaa arvoja myös ajallisesti.

8.4 Kulkeutumislaskentojen osuvuus

Ensimmäisen koepäivän osalta kaikilla kulkeutumisohjelmilla pystyttiin kuvaamaan poijujen liike kohtalaisen hyvin, joskin laskentatuloksissa oli myös vaihtelua. Poijut liikkuivat itä- ja kaakkoistuulen sekä samansuuntaisen pintavirtauksen ohjaamina luoteeseen, ja kaikilla kulkeutumislaskentaohjelmilla pystyttiin hyvin simuloimaan poijujen liike. Toisena koepäivänä kylmä rintama ylitti nopeasti Suomenlahden ja sen yhteydessä tuuli kääntyi kaakosta lounaiseksi tuulen nopeuden ollessa koko ajan vähintäänkin kohtalaista. Tällöin tuuliennusteen laatu määräsi pitkälti kulkeutumisennusteiden laadun, sillä kaikki käytetyt tuuliennusteet eivät sisältäneet tuulen kääntymistä. Nekin eri ohjelmilla ja lähtötiedoilla lasketut trajektorit, joissa tuulen kääntyminen on mukana, leviävät laajalle alueelle. Laskentojen hajonta kasvaa laskenta-ajan pidentyessä (Kuva 38).



Kuva 38. Lasketut trajektorit leviävät havaitun poijujen reitin ympärille ja niiden hajonta kasvaa ennusteajan pidentyessä. Prosentit kertovat tuulen suoran vaikutuksen kulkeutumislaskentaan.

Poijut liikkuivat kolmantena koepäivänä noin 60° vasemmalle verrattuna valinneeseen lounaistuuleen. Oikein lasketut virtaustiedot olivat välttämättömiä onnistuneen kulkeutumislaskennan perustaksi, sillä virtauksen ja tuulen suunnat poikkesivat niin huomattavasti toisistaan. Pelkkiin tuulitietoihin nojautuvat kulkeutumismallit eivät siis soveltuneet tuottamaan hyviä laskentatuloksia kolmannen koepäivän kokeista. Seatrack Web -ohjelman kulkeutumislaskentaan sisältyivät oikean suuntaiseksi ennustetut virtaukset. Siitä huolimatta 2 % tuuliosuudella laskettu kulkeutumisreitti suuntautui koilliseen, koska ennustetut virtausnopeudet olivat pieniä ja tuulen vaikutus dominoi kulkeutumista. OpHespo:ssa lasketut virtaukset suuntautuivat itään, joten kulkeutumisenustekaan ei osunut kohdalleen.

Kulkeutumislaskentaan vaikuttaa huomattavasti se kuinka suuri on tuulen suora vaikutus kulkeutumiseen. Se vaihtelee lähtötietona olevasta tuulesta, kulkeutumismallista, mallin käyttäjän valinnoista ja mallinnettavasta aineesta tai esineestä riippuen. Laskentoja tehtiin käyttäen tuulen suorana vaikutuksena 0,5-5 %. Näistä pienimpien ja suurimpien arvojen käyttö poijujen kulkeutumisen laskennassa johti liian lyhyisiin tai pitkiin kulkeutumismatkoihin. Laskettaessa veden pinnan tuntumassa olevan esineen tai aineen kulkeutumista, on suositeltavaa käyttää tuulen suoralle vaikutukselle arvoja 2-3 %.

Samaan kokeeseen liittyvissä kulkeutumislaskennoissa on eroa riippuen muun muassa siitä mitä tuulitietoa laskennassa käytetään. Havaittiin, että mitatun tuulen sekä uusimpien ennusteiden käyttö parantaa simulointituloksia. Suomenlahden virtauskenttä on myös mahdollista kuvata 3D-virtausmalleilla kohtuullisen hyvin, kun meteorologinen lähtötieto on laadukas.

Johtopäätökset

Osoittautui tarpeelliseksi käyttää useita sää- ja merimalleja tutkimuksessa, koska mikään yksittäinen malli tai useasta mallista koottu ohjelma ei ollut hyvä kaikissa tilanteissa. Useita malleja käyttämällä opitaan myös tuntemaan ennusteisiin vaikuttavia avainprosesseja. Ainoastaan tuuliennusteisiin perustuvat pintakulkeutumisennusteet pärjäävät kohtalaisen hyvin tilanteissa, joissa veden virtauskentän suunta ei poikkea huomattavasti tuulen suunnasta. Kulkeutumislaskentojen laadun varmistaminen kaikissa olosuhteissa edellyttää kuitenkin, että meren virtauskentän vaikutus sisältyy kulkeutumislaskentaan. Virtauslaskennan tarpeellisuus tulee näkyvästi esille silloin, kun veden virtaussuunta poikkeaa tuulesta.

Komplisoitu säätilanne saattaa rajoittaa laadukkaiden yli vuorokautta pidempien kulkeutumisenennusteiden tekoa. Toisaalta pitkät ennusteet antavat kuitenkin käyttökelpoisen arvion tulevasta säätilan muutoksista, vaikka ne ajoittuisivatkin eritavoin kuin aluksi ennustetaan. Osoittautui, että säärintaman liikkeen ennustaminen oli epätarkkaa, sillä vasta yhtä vuorokautta ennen rintaman ylitystä oli käytettävissä sellainen ennuste, johon sisältyi oikeaan osunut rintaman ylitysjankkohta. Nämä seikat saattavat olla tärkeitä muun muassa öljyonnettomuustilanteissa, joissa öljyvuomien ym. pelastuskaluston sijoittelua haluttaisiin suunnitella etukäteen.

Operatiivisissa ennustetilanteissa on tärkeä merkitys sillä, että kulkeutumisenennusteet päivitetään usein, jopa monta kertaa päivässä, jotta tuoreimmat sää- ja virtausennusteet ovat laskennan perustana. Luotettavimpana on tällöin pidettävä viimeisintä laskentaa.

Öljyntorjunnassa vuorokauden päähän ulottuva ennuste on jo käyttökelpoinen, mutta ennuste lasketaan aina mahdollisimman pitkäksi ajaksi, mikä nykyisillä operatiivisilla kulkeutumisohjelmilla on enintään kaksi vuorokautta. On muistettava, että ennusteisiin liittyy epävarmuutta, ja niiden laatu yleensä heikkenee ennusteajan pidentyessä.

Kulkeutumislaskentoja tehtäessä tulee kiinnittää erityisesti huomiota kulkeutumiseen suoraan vaikuttavan tuuliosuuden eli tuuliprocentin valintaan. Tuuliprocentti tulee valita sopivaksi mallinnettavaan esineeseen tai aineeseen nähden. Havaittiin lisäksi, että muutamissa laskennoissa tuulen vaikutus oli sopivan tuuliprocentin käytöstä huolimatta liian suuri, jolloin tuuli käytännössä mitätöi laske-
tun virtauksen merkityksen, vaikka todellisuudessa virtaus määräsi kulkeutumisen. Jatkossa tulisi selvittää pitäisikö kulkeutumislaskentaohjelmia mahdollisesti muuttaa, jotta meren virtaus määräisi kulkeutumislaskentaa enemmän, silloin kun mallinnetaan esinettä tai ainetta, jolla ei ole merkittävää tuulipinta-alaa.

Kulkeutumislaskentatulosten eroihin ja epävarmuustekijöihin vaikuttaa myös se miten ajalehtivan kappaleen tai öljyn ominaisuudet on otettu laskennassa huomioon. Useimmissa käytetyissä kulkeutumisojelmilla kuvataan aineen leviämistä keskimääräisen kulkeutumisreitillä ympärillä partikkelien leviämisenä. Lopputulokseksi saadaan siis aina todennäköinen leviämisalue eikä ainoastaan keskimääräistä kulkeutumista kuvaava trajektorii, kuten tässä tutkimuksessa on esitetty. Tulisikin selvittää onko ohjelmissa käytetty leviämisalueen kuvaus sopiva, ja kuinka luotettavana laskentoja voidaan pitää, kun myös leviämisalue otetaan huomioon.

Öljypuomien paikalle kuljettaminen ja mereen laskeminen ovat suhteellisen hidasta toimintaa, joten mallilaskelmasta halutaan saada apua päätöksentekoon sijaintipaikan valinnassa - varsinkin jos mereen on joutunut niin suuri määrä öljyä, että kaikkea ei ehditä torjua ennen kuin öljy on rannoilla. Jos Suomen vesillä tapahtuisi suuri onnettomuus, jonka torjuntaan oma kalustomme ei olisi riittävä, pyytäisimme apua naapurimaista. Naapurimaiden alusten tehtävien ja vastuualueiden määräämisessä mallilaskennan tulos olisi suunnittelun perustana.

Öljyntorjuntapuomia voi olla käytettävissä vain 400 m tai 1200 m, joten sen onnistuneen sijoittelun kannalta ennusteiden tulee olla varsin hyviä. Alukset toki siirtyvät niille alueille, joilla öljyä on todellisuudessa eniten, jos siellä vain on riittävän syvää, mutta varsinkin puomitusten kannalta tarkkuuden pitäisi olla hyvä.

Kulkeutumisen ennustamisen kannalta olisi tavoiteltavaa, että ennusteita lasketaan usealla eri sää- ja kulkeutumismallilla, joiden tulokset yhdistetään ja näin saadaan useisiin lähtötietoihin perustuva todennäköisin alue, jonne kulkeutuminen suuntautuu. On huomattava, että tiedon perusteella pystytään samalla rajaamaan niitä alueita toimenpidealueen ulkopuolelle, jonne kulkeutuminen ei suuntauudu.

Operatiivinen aallokkomalli laskee Merentutkimuslaitoksella aallokkoennusteita jatkuvasti, useita ennusteita päivässä, joten aallokkoennusteita on yleensä aina saatavissa. Jatkossa tulisi tarkastella lähemmin aallokon merkitystä kulkeutumislaskentoihin. Mikäli ilmenee, että aallokon vaikutusten huomioon ottaminen parantaa laskentatuloksia, niin tulisi harkita aallokkoennusteiden liittämistä osaksi operatiivisia kulkeutumislaskentoja.

Kulkeutumislaskentaohjelmien validointia ja kehittämistyötä on jatkettava, jotta voidaan varmistaa operatiivisten ohjelmien laatu ja tehdä niihin parannuksia. Operatiivisesti laskettavien virtausennusteiden laatua tulee jatkossa tarkkailla ja analysoida vertaamalla ennusteita virtausmittauksiin sekä eri laskentaohjelmien tuloksia keskenään. Erot 3D-virtausmalleissa ja niihin liittyvissä kulkeutumismalleissa, johtavat erilaisiin laskentatuloksiin huolimatta siitä vaikka käytettäisiinkin samaa meteorologista pakotetta. Näitä eroja tulisi jatkossa selvittää tarkemmin.

Käytännön testit malleille ja vertailu todellisiin havaintoihin, ovat erinomaisia mahdollisuuksia mallien jatkokehittelyn kannalta. Ajelehtimiskokeita tulisikin toistaa ja pyrkiä keräämään havaintoaineistoa jopa kahden vuorokauden mittaisista tai sitäkin pidemmistä ajelehtimisistä, jotta päästään analysoimaan pidempijaksoisia laskentoja. Myös yhteiset hankkeet meripelastus- ja öljyntorjuntaviranomaisten kanssa edistävät tutkijoiden ja operatiivisen sektorin yhteistoimintaa ja ennustejärjestelmien kehittämistä.

Lähteet

- Aamo, O. M. & Jensen, H. 1997. Operational Use of Ocean Surface Drifters for Tracking Spilled Oil. Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program. AMOP Technical Seminar, Vancouver, Canada, 1997. Elektroninen versio: www.itk.ntnu.no/ansatte/Aamo_Ole.Morten/pdf/drift.pdf
- Alenius, P., Myrberg, K. & Nekrasov, A. 1998. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Environmental Research* 3, 97-125.
- Andrejev, O., Myrberg, K., Mälkki, P. & Perttilä, M. 2002. Three-dimensional modeling of the main Baltic inflow in 1993. *Environmental and Chemical Physics* 24 (3), 156-161.
- Andrejev, O., Myrberg, K., Alenius, P. & Lundberg, P. 2004a. Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland – a study based on three-dimensional modeling. *Boreal Environment Research* 9, 1-16.
- Andrejev, O., Myrberg, K. & Lundberg, P. 2004b. Age and renewal time of water masses in a semi-enclosed basin - Application to the Gulf of Finland. *Tellus* (In press).
- Bergström, S. & Carlsson, B. 1994. River runoff to the Baltic Sea: 1950-1970. *Ambio* 23, 280-287.
- Engqvist, A. & Andrejev, O. 2003. Water exchange of the Stockholm archipelago – a cascade framework modeling approach. *Journal of Sea Research* 49, 275-294.
- Funkquist, L. 2001. HIROMB. An Operational Eddy-Resolving Model for the Baltic Sea, *Bulletin of the Maritime Institute in Gdańsk* 28 (2), 7-16. ISSN 1230-7424.
- Hughes, W. F. Winowich, N. & Brighton, J. A. 1999. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Fluid Dynamics*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0070311188.
- HELCOM, 1991. Development and use of oil drift forecasting. HELCOM Recommendation 12/6. The Helsinki Commission, Helsinki. Elektroninen versio: www.helcom.fi/recommendations/rec12_6.html.
- HELCOM, 2003. Further development and use of drift forecasting for oils and other harmful substances in the Baltic. HELCOM Recommendation 24/7. The Helsinki Commission, Helsinki. Elektroninen versio: www.helcom.fi/recommendations/Rec24-7.pdf.
- Petterson, H. 2001. Aaltohavaintoja Suomenlahdelta, Suuntamittauksia 1990-1994, Directional wave statistics from the Gulf of Finland 1990-1994, Summary. - Meri - Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, No. 44, 3-37.
- Gajewski, J., Gajewski, L. & Stachowiak, A. 1999. Verification of drift models of rhodamine spill, life-raft and dummy-man during experiment POLRODEX'97. *Bulletin of the Maritime Institute in Gdansk* 26 (1), 87-97. ISSN 1230-7424.
- Gajewski, L. & Gajewski, J. 1997. Modelling of drift and spreading in a view of rhodamine B tracing. *Bulletin of the Maritime Institute in Gdansk* 24 (1), 59-69. ISSN 1230-7424.
- Graham, P. 2000. Large-scale hydrologic modeling in the Baltic basin. Ph.D. Thesis. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. 55 p. ISBN 91-7170-518-X.
- Hirvi, J-P. (toim.) 1995. Operatiivinen ajelehtimis- ja kulkeutumismalli merialueille. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja – 134 sarja A. Helsinki, Vesi- ja ympäristöhallitus. ISBN 951-47-7160-5. ISSN 0786-9592.
- Huttula, T. 2002. Esitelmä poijujen liikkeestä Pirkanmaan ympäristökeskuksessa Tampereella 13.12.2002.
- Huttula, T. 2004. Sähköpostikirjeenvaihto.
- IMO 1998a. IAMSAR International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, Volume I Organization and Management. ISBN 92-801-1462-X.
- IMO 1999. IAMSAR International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, Volume II Mission co-ordination. ISBN 92-801-6087-7.
- IMO 1998b. IAMSAR International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, Volume III Mobile Facilities. ISBN 92-801-6085-0.
- Koponen, J., Virtanen, M., Vepsä, H. & Alasaarela, E. 1994. Operational model and its validation with drift tests in water areas around the Baltic Sea. *Water Pollution Research Journal, Canada*, 29 (2/3), 293-307.

- Korpinen, P., Koponen, J., Kiirikki, M., Sarkkula, J., Peltoniemi, H., Väänänen, P. & Gästgifvars, M. 2002. HESPO vesistömalli: ympäristöriskien ja rehevöitymiskehityksen arviointi Helsinki-Espoo-Tallinna merialueella. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 559. 46 s. ISBN 952-11-1148-8 (nid.) 952-11-1149-6 (pdf). Elektroninen versio: www.ymparisto.fi
- Mackas, D. L. & Crawford, W. R. 1989. A Performance comparison for two Lagrangian drifter designs. *Atmosphere-ocean* 27 (2), 443-456.
- Myrberg, K. & Andrejev, O. 2003. Main upwelling regions in the Baltic Sea – statistical analysis based on three-dimensional modeling. *Boreal Environmental Research* 8, 97-112.
- Reed, M., Turner, C., Odulo, A. & Isaji, T. 1991. Field test of satellite-tracked buoys to simulate oil drift. *Proceedings of 1991 Int. Oil Spill Conference, San Diego, California, U.S.A.*, 619-628.
- Reed, M., Turner, C., & Odulo, A. 1994. The Role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. *Spill Science & Technology Bulletin* 1 (2), 143-157.
- Salo, S. 2000. Experimental xylene and cumene spill at sea. Helsinki, Suomen ympäristökeskuksen moniste 216. 15 s. ISBN 952-11-0860-6. ISSN 1455-0792.
- Sokolov, A., Andrejev, O., Wulff, F. & Rodriguez Medina, M. 1997. The data assimilation system for data analysis in the Baltic Sea. *System Ecology contributions, No.3*, Stockholm University, Sweden, 66 p.
- Wilhelmsson, T. 2002. Parallelization of the HIROMB Ocean Model. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 110 p. ISBN 91-7283-296. ISSN 0348-2952.

Kuvailulehti

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus (SYKE)	Julkaisu-aika Lokakuu 2004
Tekijä(t)	Maria Gästgifvars, Annakaisa Sarkanen, Mikael Frisk, Hannu Lauri, Kai Myrberg, Pekka Alenius, Oleg Andrejev, Ossi Mustonen, Heli Haapasaari ja Alexander Andrejev	
Julkaisun nimi	Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisenusteet Suomenlahdella	
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös internetistä: http://www.ymparisto.fi/julkaisut	
Tiivistelmä	<p>Suomenlahdella toteutettiin toukokuussa 2003 ajelehtimiskokeita, joissa mitattiin veden pinta-kerroksessa tapahtuvaa kulkeutumista ja veden virtausta pintavirtauspoijuilla. Kerättyä havaintoaineistoa käytettiin öljyn, kemikaalien tai esineiden kulkeutumislaskentaan soveltuvien ohjelmien verifiointiin eli usealla eri ohjelmalla tehtiin kulkeutumislaskentoja, joita verrattiin ajelehtimiskokeissa havaittuun kulkeutumiseen.</p> <p>Raportissa esitetään ajelehtimiskokeiden toteutus ja kokeiden aikana vallinneet olosuhteet merellä, luodaan katsaus erityyppisiin kulkeutumislaskentaohjelmiin, joita käytetään tutkimuksessa ja operatiivisessa merialueen öljyntorjunta- ja etsintätyössä sekä tarkastellaan laadittuja kulkeutumislaskentoja. Lisäksi analysoidaan Suomenlahden sää- ja virtausolosuhteita sekä sää- ja virtausennusteita ja niiden vaikutusta kulkeutumiseen sekä laskentojen osuvuuteen.</p> <p>Kulkeutumisohjelmat kuvaavat hyvin merellä tapahtuvaa kulkeutumista, kun tilanteen tuuli- ja virtausolosuhteet on kuvattu ohjelmissa oikein. Laadittaessa ennusteita niihin kuitenkin sisältyy epävarmuutta, joka tulee ottaa huomioon, kun laskentatuloksia käytetään operatiivisessa etsintä- tai torjuntatoiminnassa.</p>	
Asiasanat	mallit, mallintaminen, verifiointi, säänennustus, virtaus, öljyntorjunta, vesiensuojelu, meriensuojelu, merialueet, Itämeri, Suomenlahti	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 720	
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu	
Projektihankkeen nimi ja projektinumero		
Rahoittaja/ toimeksiantaja		
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1807-5
		952-11-1808-3 (PDF)
	Sivuja 57	Kieli Suomi
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 18 e
Julkaisun myynti/ jakaja	Edita Publishing Oy, PL 800, 00043 Edita, vaihde 020 450 00 Asiakaspalvelu: puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380 Sähköposti: asiakaspalvelu@edita.fi , www.edita.fi/netmarket	
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus, PL 140, 00251 Helsinki	
Painopaikka ja -aika	Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2004	

Presentationsblad

Utgivare	Finlands miljöcentral (SYKE)	Datum Oktoberg 2004
Författare	Maria Gästgifvars, Annakaisa Sarkanen, Mikael Frisk, Hannu Lauri, Kai Myrberg, Pekka Alenius, Oleg Andrejev, Ossi Mustonen, Heli Haapasaari och Alexander Andrejev	
Publikationens titel	Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisenusteet Suomenlahdella (Driftförsök och transportprognoser i Finska viken)	
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig också på internet: http://www.ymparisto.fi/julkaisut	
Sammandrag	<p>I maj 2003 utfördes vinddriftsförsök i Finska viken, där man mätte vattnets strömning och transport i ytskiktet med drivande bojar. Observationerna användes för att verifiera lämpliga modeller för beräkning av transport av olja, kemikalier eller föremål. Transportberäkningar utfördes med flera olika modeller som sedan jämfördes med driftobservationerna.</p> <p>I rapporten redovisas för utförandet av driftförsöken och de rådande förhållandena, ges en översikt av olika typer av transportberäkningsprogram som används inom forskning och i det operativa oljebekämpnings- och spaningsarbetet på havet, och behandlas de utförda transportberäkningarna. Dessutom analyseras väder- och strömningsförhållandena i Finska viken samt väder- och strömningsprognoser och deras inverkan på transporten och på beräkningarnas träffsäkerhet.</p> <p>Transportberäkningsprogrammen beskriver väl transporten i havsområdena då vind- och strömningsförhållanden som påverkar transporten är korrekt beskrivna i modellen. Då man gör prognoser innehåller de dock osäkerhetsfaktorer som bör beaktas då man utnyttjar resultaten i den operativa verksamheten.</p>	
Nyckelord	modeller, verifiering, väderprognoser, vattenström, oljebekämpning, vattenskydd, havsområden, Östersjön, Finska viken	
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 720	
Publikationens tema	Miljövärd	
Projektets namn och nummer		
Finansiär/ uppdragsgivare		
Organisationer i projektgruppen		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1807-5
		952-11-1808-3 (PDF)
	Sidantal 57	Språk Finska
	Offentlighet Offentlig	Pris 18 e
Beställningar/ distribution	Edita Publishing Ab, PB 800, FIN-00043 Edita, Finland, växel +358 20 450 00 Postförsäljningen: Telefon +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket	
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, FIN-000251 Helsingfors, Finland	
Tryckeri/ tryckningsort och -år	Vammalan Kirjapaino oy, Vammala 2004	

Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute (SYKE)	Date October 2004
Author(s)	Maria Gästgifvars, Annakaisa Sarkanen, Mikael Frisk, Hannu Lauri, Kai Myrberg, Pekka Alenius, Oleg Andrejev, Ossi Mustonen, Heli Haapasaari and Alexander Andrejev	
Title of publication	Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisenusteet Suomenlahdella (Surface drifter experiments and drift trajectory forecast in the Gulf of Finland)	
Parts of publication/ other project publications	The publication is available in the internet: http://www.ymparisto.fi/julkaisut	
Abstract	<p>Surface drifting buoys were used to track the drift induced by wind and currents of the uppermost sea layer and to measure the surface currents in the Gulf of Finland. The experiments were performed during three days in May 2003. The data collected was used to verify several models suitable to simulate drift of oil, chemicals or any objects in the sea. Here forecast and hindcast simulation results are set against the observations.</p> <p>The report describes the design of experiments and how they were carried out as well as the weather conditions during the experiment. A short review of the operational oil drift prediction programmes and research models used in Finland is presented. The weather and sea conditions of the Gulf of Finland are analysed as well as wind and current forecasts and their effect on drift trajectory forecasts.</p> <p>When wind and currents are simulated correctly the drift prediction programmes are able to reproduce accurately the drift in the sea conditions. Still, the forecasts contain uncertainties that need to be taken into account when predictions are used in oil spill pollution prevention and response or search and rescue activities.</p>	
Keywords	models, modelling, verification, weather forecasts, currents, oil spills, water protection, Baltic Sea, Gulf of Finland	
Publication series and number	The Finnish Environment 720	
Theme of publication	Environmental protection	
Project name and number, if any		
Financier/ commissioner	Finnish Environment Institute	
Project organization		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1807-5
		952-11-1808-3 (PDF)
	No. of pages 57	Language Finnish
	Restrictions Public	Price 18 EUR
For sale at/ distributor	Edita Publishig Ltd., P.O. Box 800, FIN-00043 Edita Finland, Phone +358 20 450 00 Mail orders: Phone +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket	
Financier of publication	Finnish Environment Institute, BOX 140, FIN-00251 Helsinki, Finland	
Printing place and year	Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2004	



YMPÄRISTÖN- SUOJELU

Ajelehtimiskokeet ja kulkeutumisenusteet Suomenlahdella

Suomenlahdelle ja koko Itämerelle on kehitetty kulkeutumisenusteohjelmia, joita voidaan käyttää apuna muun muassa öljyntorjunnassa ja merialueen etsinnöissä. Suomenlahdella toteutettiin toukokuussa 2003 ajelehtimiskokeita, joissa seurattiin mereen laskettujen esineiden kulkeutumista virtausten ja tuulen vaikutuksesta. Kulkeutumishavaintoja vertailtiin mallisimulointeihin, joita tehtiin useilla Suomessa käytössä olevilla kulkeutumislaskentaohjelmilla. Tässä työssä esitellään ajelehtimiskokeiden toteutus, käytetyt kulkeutumislaskentaohjelmat sekä pohditaan sää- ja virtaus-tietojen merkitystä kulkeutumislaskennoissa. Julkaisu tarjoaa käytännön tietoa öljyntorjunnassa ja meripelastuksessa toimiville sekä kaikille merialueen kulkeutumisenusteista kiinnostuneille.

Julkaisua on saatavissa myös Internetissä:
<http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

ISBN 952-11-1807-5 (nid.)
ISBN 952-11-1808-3 (PDF)
ISSN 1238-7312

Myynti:
Edita Publishing Oy
PL 800, 00043 EDITA, vaihde 020 450 00
ASIAKASPALVELU
puhelin 020 450 05, faksi 020 450 2380
Edita-kirjakauppa Helsingissä:
Annankatu 44, puhelin 020 450 2566

