



ÖLJYN LEVIÄMISEN ESTIMOINTI ARVIOINTITÄULUKOIDEN AVULLA OSANA OPERATIIVISTA ÖLJYNTORJUNTATYÖTÄ SAIMAALLA

Elias Altarriba

Elias Altarriba

ÖLJYN LEVIÄMISEN ESTIMOINTI ARVIOINTI- TAULUKOIDEN AVULLA OSANA OPERATIIVISTA ÖLJYNTORJUNTATYÖTÄ SAIMAALLA

sökö



XAMK TUTKII 2

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
KOTKA 2017

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Elias Altarriba

Taitto- ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-043-2 (PDF)

ISSN: 2489-4575 (verkkójulkaisu)

julkaisut@xamk.fi

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on toteutettu osana SököSaimaa-hanketta, missä Saimaan syväväyläalueelle luodaan Sökö-mallin mukainen öljyntorjuntasuunnitelma. Suunnitelmia laadittaessa ja tarkoituksenmukaisia torjuntataktiikoita valittaessa oleellista on huomioida öljyn leviämismekaniikka, mihin vaikuttavat pintajännitysfyysiikka ja alueella vallitsevat olosuhteet. Asiaa voidaan tutkia numeerisesti soveltamalla muun muassa Navier-Stokesin virtausmalleja tai Euler-Lagrangen elementtimalleja. Myös analyyttiset menetelmät, kuten Fayn leviämismalli, ovat sovellettavissa tarkasteltaessa leviämistä välittömästi onnettomuuden jälkeisinä tunteina. Tässä raportissa käsitellään Fayn leviämismalliin perustuvaa lähestymistapaa ja sen soveltamismahdollisuuksia operatiivisessa öljyntorjunnassa. Tuloksena on kenttätöihin soveltuvat leviämismallitaulukot, joiden avulla voidaan approksimoida öljylautan käyttäytymistä lähituntien aikana vuodon tapahduttua ja edesauttaa näin tarkoituksenmukaisten torjuntatoimien valintaa.

Asiasanat: Öljyn leviäminen vedessä, Fayn leviämismalli, öljyonnettomuus, öljyvahinko

Keywords: Oil spread, Fay spread model, oil spill, oil accident

ESIPUHE

Tämä tutkimus on tehty osana SököSaimaa-hanketta, missä Saimaan syväväyläalueelle luodaan kattava suunnitelma öljyvahinkojen varalle. Kiitokset kaikille tätä tutkimusta tukeneille ja rahoittaneille tahoille, joista merkittävämpänä rahoittajana on Suomen öljynsuojarahasto. Myös Saimaan alueen pelastuslaitoksilla ja muilla asiaan liittyvillä yhteistyötahoilla on merkittävä rooli öljyntorjuntasuunnitelmien valmistumiseen. Kiitokset hedelmällisestä yhteistyöstä ja lukuisista kommentteista Emmi Rantavuolle ja Justiina Haloselle.

Elias Altarriba, TKI-asiantuntija

Kotka, 16.11.2017

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	4
ESIPUHE.....	5
1 JOHDANTO.....	7
2 Öljyn leviämisen estimointi Fayn pintajännitysmenetelmällä.....	10
2.1 Leviämismalli.....	10
2.2 Tuulen ja virtauksen vaikutus leviämiseen.....	12
2.3 Öljyn vuotaminen jatkuvana virtana.....	18
2.4 Öljyn haihtuminen.....	21
3 LEVIÄMISTAULUKOT	24
4 PÄÄTELMÄT.....	28
LÄHTEET	30
LIITTEET.....	34

1 JOHDANTO

Öljyvahinko-onnettomuuksissa veteen vuotaneen öljyn leviämisen ennakoiminen on tärkeää onnistuneen torjuntatyön ja vahingon rajaamisen kannalta. Erityisesti kevyet öljyalaadut, kuten dieselit ja kevyet polttoöljyt, leviävät veden pinnalle ohueksi kalvoksi nopeasti. Lisäksi muodostuneen öljylautan liikkeisiin vaikuttavat tuulet ja alueella vallitsevat veden pintavirtaukset.

Saimaan alueella pintavirtaukset ovat hyvin tavallisia (Korhonen, 2007; Kuusisto, 1978). Järvialueen päävirtaus on pääpiirteiltään hyvin ennustettavissa noudattaen latvavesiltä kohti Vuoksea kulkevaa pääsuuntaa. Useissa tapauksissa päävirtaus on yhteneväinen syväväylästä linjauksen kanssa. Ympäristökeskuksen toimesta laajempia vesistöalueita yhdistävien kapeikkojen ja salmien ajantasaiset virtaamamäärät ja virtaamahistoria tunnetaan suhteellisen hyvin (Korhonen, 2006; Korhonen & Haavanlammi 2012), mutta sitä vastoin muiden vesialueiden osalta vallitsevat virtaukset ovat tunnetut vain yleisellä tasolla. Lisäksi laajemmilla vesialueilla, missä virtaus on hitaampaa, tuulen ja sään vaikutus erityisesti pintavirtauksiin on merkittävä (Hietala, 2015).

Saimaan alueella ei alusliikenteessä muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta käytetä raskasta polttoöljyä eikä öljytuotteiden säiliöaluskuljetuksia tällä hetkellä tapahdu. Pääosa aluksista käyttää polttoaineenaan kevyttä polttoöljyä tai dieseliä, bensiiniä on käytössä lähinnä kokoluokaltaan pienemmissä veneissä. On arvioitu (Halonen, Häkkinen ja Kauppinen, 2017), että mahdollinen öljyvuoto rahtialuksen karilleajon tai muun törmäyksen seurauksena olisi todennäköisesti vakavassa tapauksessa kokoluokaltaan 20-30 kuutiometriä kevyttä polttoöljyä. Teollisuuslaitoksissa on Saimaan ranta-alueilla lisäksi kapasiteetiltaan useiden satojen kuutiometriä maasäiliöitä, mutta varoaltaat huomioiden tällaisen säiliön hallitsematon tyhjeneminen kokonaisuudessaan veteen on epätodennäköistä (Malk, 2017). Lisäksi alueella on myös välittömästi rannan läheisyydessä kulkevia rautateitä ja maanteitä, missä tapahtuu öljytuotteiden säiliökuljetuksia mahdollistaen näin onnettomuustapauksen seurauksena vesiöljyvahingon syntymisen.

Alusonnettomuuksien todennäköiset riskipaikat ovat syväväylän kapeikoissa ja voimakkaasti virtaavissa salmissa. Saimaan alueella sattuville öljyvahingoille tyypillisenä piirteenä voidaan pitää tämän vuoksi öljyn ajautumista ran-

taan hyvin nopeasti vuodon tapahduttua (Halonen, Häkkinen ja Kauppinen, 2017). Saimaalla on lisäksi kaksi luontoarvoiltaan merkittävää kansallispuistoa, lukuisia uhanalaisia lajeja ja virkistyskäyttöön varattuja ranta-alueita (Hietala, 2015). Toisaalta Saimaan alueen öljyntorjuntavalmiuden kannalta etuna ovat avomerivahinkoihin verrattuna pelastustoimen varsin lyhyet vasteajat sekä todennäköisten öljyvahinkojen mittasuhteiden pienuus verrattuna esimerkiksi Suomenlahden mahdollisiin tankkerionnettomuuksiin (Heino et al., 2017).

Öljyvahinkojen mallinnusmenetelmät ovat pääasiassa kehitetty suurten vahinkojen mallintamiseen, minkä johdosta monet menetelmistä ovat fysikaalisilta perusteiltaan yleisluontoisia (Fingas, 1995; Fingas, 2015; Jeffery, 1973; Lehr et al., 2002; Paladino & Maliska, 2000). Saarettomilla merialueilla vallitsevat pintavirtaukset ovat yleensä yleisellä tasolla ennustettavia ja tuulen vaikutus öljylautan liikkeisiin on myös suhteellisen hyvin ennakoitavissa pitkien pyyhkäisymatkojen ja esteettömän virtauskentän ansiosta. Saimaalla tavallista on, että sekä alueellinen virtauskenttä että paikalliset tuuliolosuhteet vaihtelevat merkittävästi pohjan- ja pinnanmuotojen mukaan (Korhonen, 2007; Kuusisto, 1978). Saaristoisilla alueilla ilmapvirtaus voi muodostaa vesialueille verrattuna suhteellisen korkeankin rajakerroksen, minkä johdosta veden pintaa pyyhkivä tuuli heikkenee tai on hyvin turbulენტista (Löfgren et al., 2009). Toisaalta saarten muotojen ansiosta tuuli voi myös kanavoitua voimakkaammaksi salmissa, saarten välissä tai niemenkärjissä, ja sen suunta voi vaihdella pinnanmuodoista riippuen. Vastaavasti virtauskenttä on ennustettavissa luotettavasti ainoastaan voimakkaasti virtaavissa salmissa. Muualla erityisesti pintavirtauksiin vaikuttavat merkittävästi myös tuuliolosuhteet sekä pohjanmuodot, jotka voivat tehostaa pintavirtausta esimerkiksi matalikkojen kohdalla.

Toisaalta Saimaan alueella välittömästi öljyvahingon aiheuttaneen onnettomuuden jälkeen tapahtuvaa öljyn leviämistä veden pinnalla simuloivien mallien yleistettävyyttä helpottavat monet tekijät: Pelastustoimen nopeiden vasteaikojen seurauksena tehokkaat torjuntatoimet voidaan aloittaa yleensä 1–2 tunnin kuluessa onnettomuudesta. Lisäksi tiedetään, että suurella todennäköisyydellä veteen vuotaneet öljy-laadut ovat dieseliä tai kevyttä polttoöljyä. Öljyvahingon kokoluokka jää todennäköisesti vakavassakin vuototapauksessa muutamiin kymmeneen kuutiometriin, pahimmissakin tapauksissa puhutaan muutaman sadan öljykuution vuotamisesta veteen. Tämän kokoluokan vuodoissa voidaan olettaa, että pääasiassa öljyn leviämisenopeuteen vaikuttaa veden pintajännitys-fysiikka (Fay, 1969; Fay, 1971; Fingas, 1995; Fingas, 2015). Kevyet polttoöljyt ja dieselit ovat myös selkeästi vettä kevyempiä, minkä johdosta ne pyrkivät

nousemaan veden pinnalle välittömästi ja hyvälaatuisina polttoaineina ne eivät sisällä merkittävästi leviämiseen vaikuttavia epäpuhtauksia. Kyseiset öljyt ovat myös juoksevia nesteitä sellaisissa lämpötiloissa, missä Saimaan vesi pysyy sulana. Muutamassa tunnissa säästyminen ei myöskään merkittävästi vielä muuta öljyn ominaisuuksia (Misha & Kumar, 2015) eikä haihtumistakaan ehdi suurissa määrin tapahtua (Lehr, 2001).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda Saimaan alueella tapahtuviin öljyvahinkoihin sovellettavissa olevat arviointitaulukot öljyn käyttäytymisestä vedessä. Tarkoituksena on, että öljyntorjuntatoimiin osallistuva henkilöstö voi käyttää niitä apuna operatiivisessa kenttätoiminnassa suunniteltaessa puomituksia tai muita torjuntatoimia. Tavoitteena on, että taulukoiden avulla öljyn leviäminen voidaan ennakoida välittömästi onnettomuuden jälkeisten 1-3 tunnin kuluessa, jotka ovat kriittisiä torjuntatoimien onnistumisen ja vahingon rajaamisen kannalta. Pidempikestoiseen öljyn leviämisen simulointiin eivät nämä taulukot sovellu eikä niitä sellaiseen ole tarkoitettukaan. Leviämismallit on laskettu vettä kevyemmille, juokseville öljyalaaduille, kuten kevyille polttoöljyille tai dieselille. Lisäksi mukaan on sisällytetty taulukko, jolla voidaan arvioida öljyn haihtumista neljän ensimmäisen vuorokauden kuluessa.

2 ÖLJYN LEVIÄMISEN ESTIMOINTI FAYN PINTAJÄNNITYS- MENETELMÄLLÄ

2.1 Leviämismalli

Analyttisillä leviämismalleilla tarkoitetaan mallinnusmenetelmiä, joissa öljylautan leviäminen mallinnetaan soveltaen analyttisesti ratkaistavissa olevia algebraali- tai differentiaaliyhtälöitä käyttäen (Berry et al., 2012; Fingas, 2015; Lehr et al., 2002). Tällaisista menetelmistä tunnetuin on Fayn leviämismalli (Fay 1969; Fay 1971). Kyseisessä mallissa ideaalisen öljylautan leviäminen tasanaisesti tyynen veden pinnalle jaetaan kolmeen vaiheeseen. Näistä vaiheista inertiaalivaiheeksi kutsutaan välittömästi öljyvuodon jälkeen ilmenevää tilaa, missä veteen vuotanut öljy nousee veden pinnalle ja pyrkii asettumaan tasapainoasemaan pääasiassa painovoiman ja hitausvoimien vaikutuksesta. Tarkasteltaessa öljyn levittäytymistä tyynen avoveteen, voidaan inertiaalivaiheen öljylautan kehän laskennallinen säde määrittää yhtälöllä:

$$r_{in} = k_i (\Delta g V t_{in}^2)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

jossa k_i on empiirinen kerroin ($k_i=1,14$), Δ öljyn ja veden tiheyksien eroavuus (kg/m^3), g gravitaatiokiihtyvyyys (m/s^2), V veteen vuotaneen öljyn tilavuus (m^3) ja t aika inertiaalivaiheen alusta (s). Inertiaalivaiheessa öljy leviää ympäristöön usein paksuna lauttana ja hitausvoimien vaikutuksesta lautan reunat ovat usein keskimääräistä paksumpia hitausvoimien vaikutuksesta. Inertiaalivaihe on merkittävä erityisesti suurten öljyvuotojen yhteydessä, mutta pienten vuotojen osalta vaihe on usein lyhyt. Fayn mukaan (Fay, 1971) inertiaalivaihe päättyy viimeistään lautan saavuttaessa alan:

$$A_{in} = \pi \frac{k_v^4}{k_i^2} \left(\frac{V^5 g \Delta}{v_w^2} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

jossa k_v on viskoottisen vaiheen empiirinen kerroin ($k_v=1,45$) ja v_w on veden kinemaattinen viskositeetti (m^2/s). Öljyn ja veden tiheyden kerroin määritellään yhtälöllä:

$$\Delta = \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w}, \quad (3)$$

jossa ρ_w on veden tiheys (kg/m^3) ja ρ_o öljyn tiheys (kg/m^3). Pinta-alasta voidaan laskea lautan säde inertiaalivaiheen päättyessä:

$$r_{in} = \sqrt{\frac{A_{in}}{\pi}}. \quad (4)$$

Inertiaalivaihetta seuraa viskoottinen vaihe (Buckmaster, 1973; Chebbi, 2014; Fay, 1971), missä öljylautta pysyy vielä suhteellisen paksuna, mutta lähestyy tasapainoasemaansa veden pinnalla. Hitausvoimien vaikutuksesta tapahtuvaa laajenemista ei enää merkittävässä määrin tapahdu, vaan laajenemisnopeuden ratkaisee pääasiassa öljylautan ja sen alla olevan veden väliset viskoottiset voimat. Leviämissäde ajan suhteen määritetään yhtälöllä:

$$r_{visk} = k_v \left(\frac{v^2 g \Delta (t_{in} + t_{visk})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{v_w}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (5)$$

ja vastaavasti viskoottisesti laajentuvan öljylautan pinta-ala:

$$A_{visk} = \pi k_v^2 \left(\frac{v^2 g \Delta (t_{in} + t_{visk})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{v_w}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Isoissa öljyvuodoissa saattaa esiintyä ilmiö, missä viskoottinen vaihe näkyy öljylautan hitaana leviämisenä (Fay, 1969). Tällainen vaihe on havaittu muun muassa Torrey Canyonin öljyonnettomuudessa vuonna 1967 (Fay, 1971). Tämä ilmiö johtuu siitä, että lautta on vielä liian paksu pintajännitysvoimien dominoimaan nopeaan leviämiseen. Kuitenkin lautta on niin ohut, että painovoiman seurauksena tasapainoasemaan hakeutumisesta aiheutuvat hitausvoimat ovat selkeästi pienempiä verrattuna öljylautan ja veden välisiin viskoottisiin voimiin.

Viimeinen leviämisvaihe on leviämisenopeuden osalta kaikista nopein öljyn levitessä ohueksi kalvoksi veden pinnalle (Fay, 1969; Fay 1971). Tässä vaiheessa veteen valuneen öljyn määrällä on ainoastaan välillistä vaikutusta leviämiseen. Pääasiassa leviämisenopeuden ratkaisevat nyt pintajännitysvoimat. Lautan leviämisen säde ratkaistaan yhtälöllä:

$$r_{pin} = k_t \left(\frac{\sigma_w^2 (t_{in} + t_{visk} + t_{pin})^3}{\rho_w^2 v_w} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

ja vastaavasti pinta-ala yhtälöllä:

$$A_{pin} = \pi k_t^2 \left(\frac{\sigma_w^2 (t_{in} + t_{visk} + t_{pin})^3}{\rho_w^2 v_w} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

jossa k_t on empiirinen kerroin ($k_t=2,3$) ja σ_w on veden pintajännitys (N/m). Viskoottisen vaiheen päättymiseen ei ole yksittäistä sääntöä, mutta yleisesti ottaen öljylautan ollessa alle 10 mm paksu voidaan olettaa pintajännitysvaiheen dominoivan leviämistä. Kevyillä öljytuotteilla tämä vaihe voi alkaa jo aiemminkin öljyn noustessa selkeästi vettä kevyempänä nopeasti veden pintaan. Saimaan alueella tapahtuvissa öljyvahingoissa pintajännitysvaiheen voidaan olettaa dominoivan kauttaaltaan, sillä veteen pahimmillaankin vuotaneet öljymäärät ovat kuitenkin suhteellisen pieniä, öljy on kevyttä ja todennäköisesti veteen vuotava öljymäärä ei sinne joudu yhdellä kertaa, jolloin lautta jää paksuimmillaankin ohueksi.

2.2 Tuulen ja virtauksen vaikutus leviämiseen

Tuulen ja veden virtauksen vaikutusta Fayn mallia noudattavan öljylautan liikkumiseen voidaan arvioida resultanttivektorioperaatiolla. Veden pinnalla lautana oleva öljy liikkuu veden pintavirtauksen vauhtia pohjan suhteen. Saimaan kokoluokan öljyvahinko-onnettomuuksia simuloitaessa (Halonen, Häkkinen ja Kauppinen, 2017) öljyn voidaan arvioida liikkuvan tätä vauhtia välittömästi öljyn veteen joutumisen jälkeen, sillä hitausvoimien huomioiminen ei kaikkien muiden epätarkkuustekijöiden joukossa todennäköisesti oleellisesti parantaisi mallin tarkkuutta.

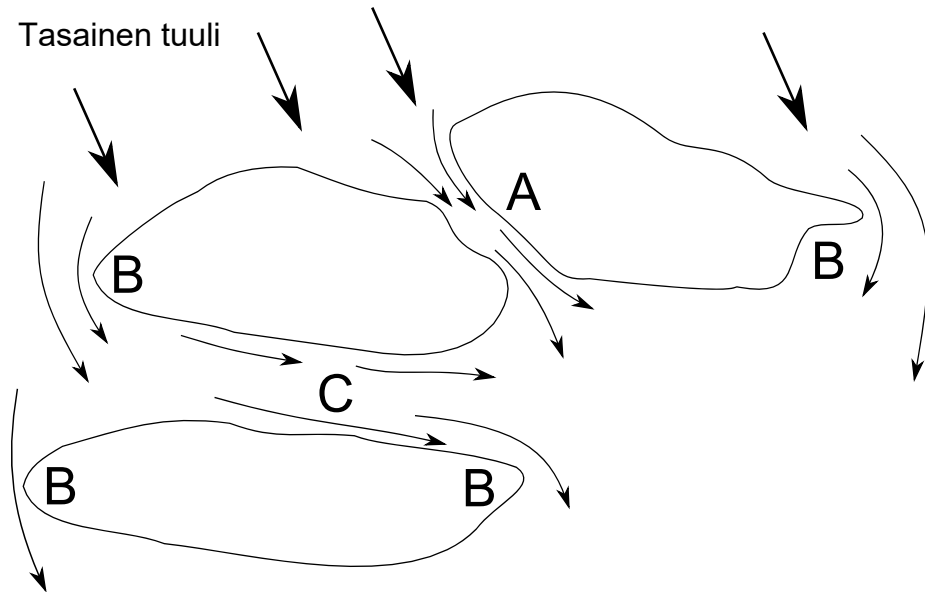
Virtausten simuloimisessa haastavaa on kuitenkin monissa paikoissa hyvin epähomogeeninen virtauskenttä. Ainoastaan voimakkaasti virtaavissa salmissa virtauksen voimakkuus ja suunta on suhteellisen helposti havainnoitavissa, mutta muualla päävirtauksen pysyvyydestä huolimatta pintavirtaukset voivat vaihdella paljonkin (Korhonen, 2007). Pitkäkestoisesti puhaltava tuuli voimistaa pintavirtauksia. Tämän ja vallitsevan päävirtauksen seurauksena erityisesti matalikkojen, niemiä, salmien ja muiden kapeikkojen kohdalla voivat virtausten suunnat paikallisista olosuhteista riippuen myös vaihdella vuorokausien välillä. Toisaalta kuitenkin sääolosuhteista johtuvat virtausten muutokset eivät aiheuta kovinkaan voimakkaita pintavirtauksia (yleensä alle 1 cm/s), vaikka alueellisia eroja luonnollisesti on.

Tuulen vaikutusta on avomerellä tapahtuvissa öljyvahingoissa yleensä mallinnettu kuvaamalla öljylautan tuulesta aiheutunutta liikettä liikevektorilla, minkä suuruuden oletetaan olevan noin 3 % tuulen nopeudesta (Fingas, 2015). Näin arvioiden tuuli liikuttaa öljylauttaa veden pinnalla taulukon 1 mukaan:

TAULUKKO 1. Öljylautan nopeus eri tuulen voimakkuuksilla (3 % sääntö).

Tuulen nopeus	Öljylautan nopeus	Öljylautan nopeus	Öljylautan nopeus
2,5 m/s	0,08 m/s	4,8 m/min	0,29 km/h
5,0 m/s	0,15 m/s	9,0 m/min	0,54 km/h
7,5 m/s	0,23 m/s	13,8 m/min	0,83 km/h
10,0 m/s	0,30 m/s	18,0 m/min	1,08 km/h
12,5 m/s	0,38 m/s	22,8 m/min	1,37 km/h
15,0 m/s	0,45 m/s	27,0 m/min	1,62 km/h
20,0 m/s	0,60 m/s	36,0 m/min	2,16 km/h

Saariston vaikutusta tuulen käyttäytymiseen veden pinnan tuntumassa ohjaa voimakkaasti saarten korkeus. Matalatkin saaret, joissa kasvaa täysikasvuista, tiheää metsää, muodostavat usein 20–30 metrin korkuisen tuuliesteen, jolla on jo merkittävää vaikutusta vedenpinnassa vaikuttavaan tuuleen (Löfgren et al., 2009). Lisäksi järvillä aallokko on tavallisesti matalaa (mutta myös terävää ja lyhyttä), minkä johdosta ilmavirtauksen rajakerros jää merialueisiin verrattuna matalaksi. Tuulen käyttäytymistä saaristossa havainnollistetaan kuvassa 1.

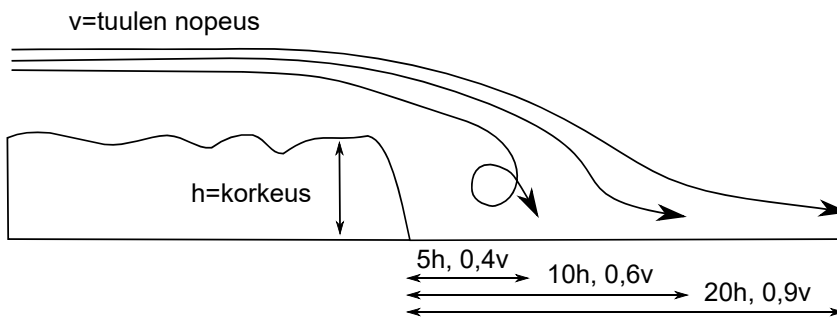


KUVA 1. Tuulen ohjautuminen saarten välissä

Kuvassa tasainen selältä puhaltava tuuli saavuttaa saariston. Saaret ovat tavanomaisia, metsäisiä saaria, joissa tiheäkasvuisen havumetsän latvat ulottuvat noin 30 metrin korkeudelle vedenpinnasta. Tasainen ilmavirta kanavoituu kapeikossa

(kohdassa A), jolloin sen nopeus kasvaa ilmanpaineen laskiessa. Tuulen jatkuessa riittävän pitkään voimistuu myös salmessa ilmenevä veden virtaus. Saaret muodostavat ilmapirrille esteen, jolloin niiden kärjissä (B) tuulen nopeus voimistuu. Kolmantena esimerkkinä on kohta C, jossa kuvassa ylemmän saaren yli puhaltava tuuli kohtaa salmen jälkeen toisen saaren, jolloin tuuli pyrkii kääntymään salmen suuntaiseksi ollen myös voimakkaampi vastarannalla. Mikäli tämä vastaranta on kovin jyrkkä, ovat tuuliolosuhteet varmasti turbulenttiset.

Saarten yli puhaltavalle tuulelle voidaan määrittää myös omat nyrkkisääntönsä. Yleisellä tasolla puhuttaessa tuulten käyttäytyminen saarten tai muiden veden suhteen jyrkkäreunaisten esteiden jälkeen noudattaa nyrkkisääntöä, missä este vaikuttaa tuuliolosuhteisiin noin 20-kertaa esteen korkeuden mittaisella etäisyydellä (Löfgren et al., 2009). Tätä havainnollistetaan kuvassa 2. Tavallista myös on, että tuulisellakin säällä välittömästi saaren rannan tuntumassa suojaisella puolella voi olla hyvinkin tyyntä siinä missä vähän kauempaa löytyy alue, jossa tuuli on puuskainen ja suunnaltaan vaihteleva.



KUVA 2. Saaren korkeuden vaikutus alueelliseen tuuleen

Laskentaesimerkkejä tuulen nopeudesta ja sen vaikutusalueesta on löydettävissä taulukosta 2. Verrattaessa tätä kuvissa 1 ja 2 osoitettuun tuulten käyttäytymiseen, voidaan tehdä karkeita arvioita alueellisista tuulen voimakkuuksista ja niiden vaikutuksesta öljylautan liikkeisiin.

TAULUKKO 2. Saaren korkeuden vaikutus alueelliseen tuuleen.

Tuulen nopeus	Saaren korkeus	5 h	10 h	20 h
5 m/s	20 m	2,0 m/s, 100 m	3,0 m/s, 200 m	4,5 m/s, 400 m
10 m/s	20 m	4,0 m/s, 100 m	6,0 m/s, 200 m	9,0 m/s, 400 m
5 m/s	30 m	2,0 m/s, 150 m	3,0 m/s, 300 m	4,5 m/s, 600 m
10 m/s	30 m	4,0 m/s, 150 m	6,0 m/s, 300 m	9,0 m/s, 600 m

Toistaiseksi tutkimusta ei juurikaan ole tehty sen suhteen, miten hyvin edellä mainittu 3 % sääntö pätee yleisellä tasolla saaristo-olosuhteissa. Myös 3 % säännön soveltaminen riippuu olosuhteista, jolloin käytännössä aiheeseen liittyvä aiempi tutkimus huomioiden joudutaan usein puhumaan 1–6 % säännöstä (Fingas, 2015). Saaristossa saaret toimivat tuuliesteinä ja aiheuttavat virtauskenttään turbulenssia kuvissa 1 ja 2 osoitetulla tavalla, jolloin pintavirtausta kehittävä tuuli ei välttämättä ole voimakkuudeltaan verrattavissa avomeren laminaarisempiin tuuliin. Toisaalta saaret voivat kuitenkin myös kanavoimalla voimistaa alueellisia ilmavirtauksia lähellä veden pintaa, jolloin asialla saattaa olla merkittävääkin vaikutusta pintavirtauksiin ja näin myös öljyn leviämiseen. Suomen saaristoiset olosuhteet huomioiden tämän asian lisätutkimus olisi tarpeellista. Tämän vuoksi taulukkoarvoja sovellettaessa on tärkeää muistaa alueellisten tuulisuusolosuhteiden tuntemisen tärkeys. Ilmatieteen laitoksen ylläpitämien sääasemien tuulitiedot eivät yksin ole riittävä informaation lähde puhuttaessa kapeikoissa tai tiheässä saaristossa veden pinnassa vaikuttavista tuulista. Käytännössä kokemukseen ja virtausfysiikkaan perustuen Saimaan alueella tuulen vaikutusta pintavirtauksiin kannattaa approksimoida olettamalla tuulen aiheuttaman pintavirtauksen olevan 0,3–1 % tuulen nopeudesta (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Öljylautan nopeus eri tuulen voimakkuuksilla (0,5 % prosentin vaikutus)

Tuulen nopeus	Öljylautan nopeus	Öljylautan nopeus	Öljylautan nopeus
2.5 m/s	0,0125 m/s	0,75 m/min	0,045 km/h
5,0 m/s	0,0250 m/s	1,50 m/min	0,090 km/h
7,5 m/s	0,0375 m/s	2,25 m/min	0,135 km/h
10,0 m/s	0,0500 m/s	3,00 m/min	0,180 km/h
12,5 m/s	0,0625 m/s	3,75 m/min	0,225 km/h
15,0 m/s	0,0750 m/s	4,50 m/min	0,270 km/h
20,0 m/s	0,1000 m/s	6,00 m/min	0,360 km/h

Kun virtausten tai tuulten alueelliset nopeudet on saatu selville tai pystytty arvioimaan riittävän luotettavalla tavalla, voidaan niiden yhteisvaikutus öljylautan liikkeisiin laskea vektorioperaatiolla. Saimaan alueella etäisyydet ovat joka tapauksessa niin pieniä, että maapallon kaarevuutta tai erilaisia karttakoordinaatistomenetelmiä (esimerkiksi ETM tai WGS) ei tarvitse erikseen huomioida. Sama pätee maapallon pyörimisliikkeen vaikutukseen. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi vallitsevat fluidien virtaukset ovat joka tapauksessa yleisluontoisia arvioita, jolloin koordinaatistomenetelmien hyödyntäminen tai koriolisvoimien (tuulen nopeuden kasvaessa maapallon pyörimisliike pyrkii kääntämään tuulen

suunnan myötäpäivään pohjoisella pallonpuoliskolla) huomioiminen ei laske-
taa oleellisilta osin parantaisi, ainoastaan monimutkaistaisi.

Resultanttivektorin määrittämisessä on kuitenkin syytä muistaa erilaiset tavat ilmaista tuulen ja virran suunta. Tuuli tuo ja virta vie, eli pohjoistuuli puhalttaa pohjoisesta etelään ja vastaavasti pohjoiseen vievä virta etelästä pohjoiseen. Jotta virheitä ei tulisi, on sekä tuuli että virta kuvattava normaalin tavan mukaan liikevektoreina, mitkä osoittavat fluidin tosiliikkeen suunnan pohjan suhteen. Oletetaan veden virtaavan pohjoisesta etelään 0,2 m/s ja lounaistuulen puhaltavan 15 m/s. Öljy on levinnyt veteen suuremmalla selkäalueella, joten oletetaan tuulen aiheuttaman pintavirtausnopeuden olevan 1 % tuulen nopeudesta (eli 0,15 m/s). Näin pohjoisesta etelään virtaavan veden nopeusvektori on komponenttimuodossa:

$$\mathbf{v}_{virta} = 0 \frac{m}{s} \bar{i} - 0,20 \frac{m}{s} \bar{j}. \quad (9)$$

Vastaavasti lounaistuulen aiheuttaman pintavirtauksen nopeusvektori on muotoa:

$$\mathbf{v}_{tuuli} = 0,15 \cos 45^\circ \frac{m}{s} \bar{i} + 0,15 \sin 45^\circ \frac{m}{s} \bar{j} \quad (10)$$

Nopeusresultantin päätepiste lasketaan yhtälöllä:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{resultantti} &= 0 + 0,15 \cos 45^\circ \frac{m}{s} \bar{i} + 0,15 \sin 45^\circ - 0,20 \frac{m}{s} \bar{j} \\ &= 0,11 \frac{m}{s} \bar{i} - 0,09 \frac{m}{s} \bar{j}, \end{aligned} \quad (11)$$

ja resultantin pituus vastaa todellista nopeutta:

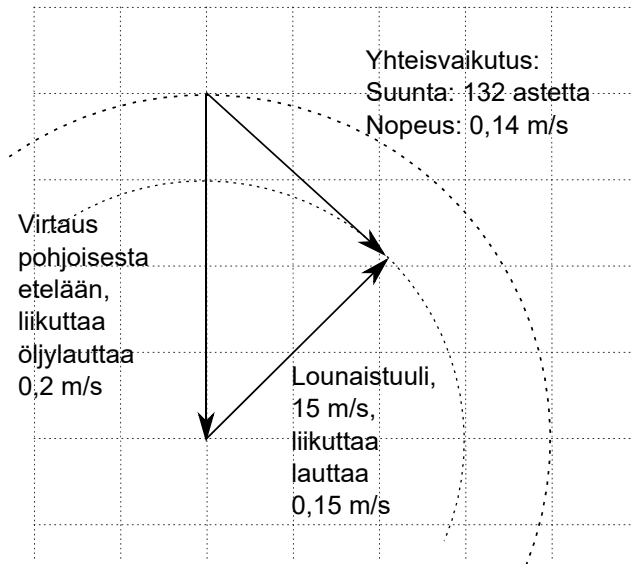
$$\mathbf{v}_{resultantti, pituus} = \sqrt{\left(0,11 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(-0,09 \frac{m}{s}\right)^2} = 0,14 \frac{m}{s}, \quad (12)$$

minkä tosisuunta on:

$$\mathbf{v}_{suunta} = 90^\circ + \arctan\left(\frac{0,0939 \frac{m}{s}}{0,1061 \frac{m}{s}}\right) = 90^\circ + 41,52^\circ = 131,52^\circ \approx 132^\circ \quad (13)$$

Resultanttivektori voidaan määrittää helposti myös piirtämällä, jolloin matemaattista osaamista asian suhteen ei vaadita. Piirtämisessä oleellista kuitenkin on, että tuulen ja virtauksen suunnat piirretään kartalle tai paperille huolellisesti, minkä lisäksi sekä tuulta että virtaa kuvaavien vektoreiden pituuksien tulee olla keskenään piirretty oikeassa suhteessa (kartalle piirrettäessä myös kartan mittakaava on huomioitava). Jos siis edellä kuvatussa esimerkissä virtauksen no-

peus on tuo 0,20 m/s ja tuulen vaikutus öljyn liikkeisiin veden pinnalla 0,15 m/s, voidaan sopia, että ruutupaperin ruutu vastaa tässä tilanteessa nopeutta 0,05 m/s. Täten virtausvektorin pituus olisi neljä ja tuulen vaikutusvektorin pituus kolme ruutua. Tämän jälkeen vektorit asetetaan paperille siten, että toiseksi piirrettävä vektori (piirtojärjestyksellä ei ole väliä) alkaa ensimmäisen päästä:



KUVA 3. Tuulen ja virtauksen resultantin piirtäminen

Lopputuloksena voidaan alkupisteen ja toiseksi piirretyn vektorin päätepisteen välille piirtää resultanttivektori. Tämän vektorin pituus on tuulen ja virtauksen yhteisvaikutuksen seurauksena öljylautan liikenopeus ja vektorin suunta määrittää liikenopeuden tosisuunnan. Mikäli tuuli tai virta on arvoltaan nolla tai voidaan arvioida sellaiseksi, helpottuu tehtävä huomattavasti. Tuolloin öljylautta liikkuu pelkästään tämän yhden tekijän suhteen.

Esimerkkejä öljylautan liikkeistä virtausten tai tuulten mukana on löydettävissä taulukosta 4, jolloin arvioita voidaan tehdä myös taulukon perusteella:

TAULUKKO 4. Öljylautan liikenopeuden muunnostaulukko

cm/s	m/s	m/min	m/h	km/h
1,0 cm/s	0,01 m/s	0,6 m/min	36 m/h	0,036 km/h
2,5 cm/s	0,025 m/s	1,5 m/min	90 m/h	0,09 km/h
5,0 cm/s	0,05 m/s	3,0 m/min	180 m/h	0,18 km/h
10,0 cm/s	0,10 m/s	6,0 m/min	360 m/h	0,36 km/h
15,0 cm/s	0,15 m/s	9,0 m/min	540 m/h	0,54 km/h

2.3 Öljyn vuotaminen jatkuvana virtana

Luvuissa 2.1 ja 2.2 esitetyt mallit lähtevät oletuksesta, että öljyvuoto tapahtuu kerralla suhteellisen lyhyessä aikaikkunassa. Tällainen voisi olla esimerkiksi aluksen törmäminen kiinteään esteeseen, minkä seurauksena aluksen runko vaurioituu siten, että sen polttoainesäiliö tyhjenee veteen kertatapahtumaan verrattavissa olevalla tavalla. Fayn mallit ovat parhaimmillaan juuri tämän kaltaisen vuodon leviämisenopeutta arvioitaessa (Fay, 1969; Fay, 1971) välittömästi onnettomuuden jälkeen. Lisäksi tuulen ja virran vaikutus öljylautan liikkeisiin onnettomuuden jälkeisten lähituntien aikana on mallinnettavissa helpoiten öljyn ollessa kokonaisuudessaan vedessä.

Yleensä öljyvahinkojen tapahtumaketju ei kuitenkaan ole näin suoraviivainen (Halonen, Häkkinen ja Kauppinen, 2017; Heino et al., 2017). Pohjakosketuksen seurauksena pohja ja polttoainesäiliöt voivat vaurioitua, mutta etenkin säiliöiden ollessa vajaita on todennäköistä, että säiliö vuotaa sisäänpäin vettä kevyemmän polttoaineen noustessa säiliön todennäköisesti ehjään yläosaan. Toisaalta tällaisissakin tilanteissa erityisesti virtaavissa vesissä runkovaurion geometriasta riippuen muodostua säiliöön imua tai pyörteilyä (White, 2011), minkä seurauksena sisällä oleva polttoaine huuhtoutuu veteen vähän kerrassaan. Vastaavasti vaurio voi olla sen verran pieni, että polttoainesäiliö tyhjenee suihkumaisena virtana muutaman tunnin kuluessa.

Pidempiaikaisen vuodon luotettava simulointi taulukkoarvojen perusteella on huomattavasti hankalampaa. Veteen heti tapahtumaketjun alussa vuotanut öljy ehtii olla jo pidempään tuulten ja veden virtauksen vaikutuksessa, ja se on voinut ajautua jo kauaskin vuodon lähteestä vuotamisen vielä jatkuessa. Toisaalta öljyn joutuminen veteen vähän kerrassaan lisää todennäköisyyttä, että suuremman vuodon leviämisyysikä noudattaa pääasiassa pintajännitysvaihetta (Fay, 1971), mikä osaltaan suoraviivaistaa leviämistaulukoiden soveltamismahdollisuuksia. Käytännössä (Fay, 1969; Fay, 1971; Suchon, 1970) pintajännitysvaihe on dominoiva aina, kun öljykalvon paksuus veden pinnalla on alle 10 millimetriä. Lisäksi ainakin Fayn (Fay, 1969) mukaan käytännössä pintajännitysvaihe saattaa vallita aiemminkin, sillä jo aallokostakin johtuen etenkin ohuemmat kalvot eivät tietenkään ole homogeenisia paksuudeltaan, mikä voi viskoottisen vaiheen päättää ainakin alueellisesti jo selkeästikin ideaalitulannetta aikaisemmin.

Veteen vuotaneen öljyn määrä ei Fayn teorian mukaan suoraan vaikuta öljyn leviämisenopeuteen pintajännitysvaiheessa (ks. yhtälö 7). Välillistä vaikutusta

luonnollisesti on: Itse leviämisenopeus on teorian perusteella riippumaton vuotaneesta öljyn määrästä (olettaen siis pintajännitysvaiheen dominoivan leviämistä). Kuitenkin pintajännitykseen perustuva leviäminen ensin hidastuu ja lopulta pysähtyy öljykalvon ohetessa riittävästi. Tähän ei tarkkoja raja-arvoja ole ilmeisesti olemassa, mutta kalvon paksuuden ohentuessa lähelle 0,001 millimetriä öljyn sisäisten molekyyliäsiidosten voimat hidastavat pintajännityspeeriaatteella tapahtuvaa leviämistä, jolloin Fayn yhtälö ei enää ole sellaisenaan soveltamiskelpoinen (Fay, 1971; Suchon, 1970). Tuolloin öljykerroksen sateenkaaren värit alkavat myös olla vaikeasti havaittavissa. Veteen vuotaneen öljyn määrän jatkuva lisääntyminen jatkuvan vuodon takia paksuntaa öljykalvoa, jolloin leviäminen ei pysähdy vaan jatkuu pintajännityspeeriaatteella. Tämän vuoksi öljykalvon tosiasiallisen paksuuden arvioiminen on oleellista pidempään jatkuvissa öljyvuo-doissa.

Suhteellisen tasaisesti veden pinnalle levinneen öljykalvon keskimääräinen pak-suus määritetään yhtälöstä 7 johdetulla yhtälöllä:

$$h_{kalvo} = \frac{V(t)}{\pi k_t^2 \left(\frac{\sigma_w^2 (t_{in} + t_{visk} + t_{pin})^3}{\rho_w^2 \nu_w} \right)^{\frac{1}{2}}} . \quad (14)$$

Olettaen vuodon olevan tasaista ja määrältään suhteellisen pientä (enintään muutamia kuutiometrejä minuutissa), voidaan inertiaali- ja viskoottisen leviä-misvaiheen olettaa olevan merkityksettömän lyhyt, jolloin kalvon paksuutta määrittävä yhtälö redusoituu muotoon:

$$h_{kalvo} = \frac{V(t)}{\pi k_t^2 \left(\frac{\sigma_w^2(t)^3}{\rho_w^2 \nu_w} \right)^{\frac{1}{2}}} , \quad (15)$$

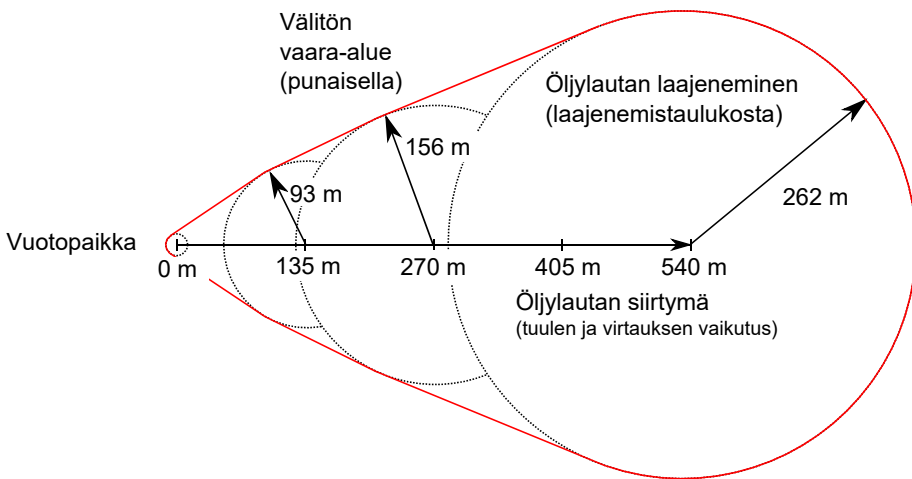
missä h_{kalvo} on öljykalvon paksuus (m), V on veteen vuotaneen öljymäärän ko-konaistilavuus vuodon alkamisesta (m^3), k_t on empiirinen vakio (2,3), σ_w veden pintajännitys (N/m), t vuodon alusta kulunut aika (s), ρ_w veden tiheys (kg/m^3) ja ν_w veden kinemaattinen viskositeetti (m^2/s). Yhtälöstä 15 voidaan ratkaista aika ja sijoittamalla öljykalvon h paksuudeksi valittu arvo, voidaan approksimoida aikaa, mikä kuluu pintajännitysvaiheen leviämisen päättymiseen:

$$t = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{V(t) \rho_w \nu_w}}{\pi k^2 h_{kalvo} \sigma_w} . \quad (16)$$

Yhtälön 16 soveltamisessa oleellista on kuitenkin muistaa taustalla olevan Fayn mallin fysikaalinen yksinkertaisuus. Öljylautan oletetaan laajenevan ideaalisesti tasaisena, hajoamattomana lauttana, mitä ei tietenkään tosiasiaassa tapahdu eten-

kään, kun vuodosta on kulunut jo useampi tunti. Erityisesti tuulet ja virtaukset hajottavat kalvoltaan ohuen lautan.

Kuitenkin jatkuvan öljyvudon tapauksessakin Fayn mallit voivat olla oikein sovellettuna käyttökelpoisia. Tuulen ja virtauksen vaikutusta voidaan approksimoida luvussa 2.2 käytetyllä tavalla, jolloin on mahdollista arvioida jatkuvasti veteen vuotavan öljyn leviämisen vaara-alue kohtuullisella tarkkuudella. Mikäli öljyvuohto on välittömästi onnettomuuden tapahduttua ollut suurempi (esimerkiksi 10 m^3 öljyä arvioidaan valuneen veteen kertavuotoon verrattavissa olevalla tavalla), minkä jälkeen vuoto on jatkunut pienempänä (esimerkiksi noin 100 l/min tunnin ajan), voidaan tällainen huomioida yhdistämällä kertavuodon ja jatkuvan vuodon mallit tuulen ja virtauksen vaikutus huomioiden kuvassa 4 esitetyllä tavalla. Oletetaan tässä tuulen ja virtauksen resultantin nopeudeksi $0,15 \text{ m/s}$, jolloin vuodon alussa kertavuotoon verrattavissa olevalla tavalla veteen valunut öljy on tunnissa liikkunut 540 m .



KUVA 4. Leviävän öljylautan muodostama vaara-alue

Mikäli tuulta tai virtausta ei merkittävässä määrin esiinny, yksinkertaistaa tämä myös yhdistelmäöljyvudon kaltaista tilannetta. Tämä johtuu siitä, että pintajännitys vaiheen leviämiseen veteen vuotanut öljymäärä vaikuttaa ainoastaan välillisesti. Itse leviämisenopeuteen sillä ei ole vaikutusta, vaan lähinnä siihen, miten pitkään pintajännitysleviäminen jatkuu öljylautan pysyessä riittävän paksumana pintajännitysleviämisen kannalta.

Toinen oleellinen asia sekä jatkuvan että kerralla tapahtuvan öljyvudon leviämisen mallintamisessa Fayn teorian avulla on huomioida oletus öljyn kellu-

misesta veden pinnalla. Pintajännitysteorian soveltaminen voi alkaa vasta siitä tilanteesta, kun öljy on noussut pinnalle. Kevyet öljyalaadut, kuten kevyt polttoöljy, dieselpolttoaineet ja bensiinit selkeästi vettä kevyempinä nousevat pinnalle suhteellisen nopeasti. Koska Saimaan alueella tapahtuvassa öljyvahingossa veteen vuotaa todennäköisimmin juuri näitä öljyalaatuja, on öljylautan käyttäytymisen arviointi huomattavasti helpompaa. Raakaöljyn tai raskaan polttoöljyn osalta tilanne on monimutkaisempi öljyn tiheyden ollessa hyvin lähellä makean veden tiheyttä. Tuolloin öljylautan kohoaminen veden pinnalle ei välttämättä tapahdu suoraviivaisesti, vaan se voi jäädä ainakin osittain väliveteen pintautuen myöhemmin.

Mikäli vuodon lähde on kuitenkin syvällä veden alla, voi öljyn pintautuminen kestää jonkin aikaa ja virtaavissa vesissä öljy voi kulkeutua ennen pintautumista kauemmas vuotopaikalta. Tällainen tilanne voi ilmetä, mikäli öljyä vuotaa veteen vedenalaisesta putkesta tai uponneesta aluksesta. Uponneiden alusten tilanteessa voi aluksesta nousta pintaan myös muuta kelluvaa, öljyistä jätettä. Tämän vuoksi vedenalaisten öljyvuotojen osalta puomituksia ei pidä asettaa liian lähelle ensin havaittua vuotokohtaa ja tilannetta on tarkkailtava, kunnes saadaan varmuus veden pinnalle kohoavan öljyn käyttäytymisestä nousun aikana.

2.4 Öljyn haihtuminen

Öljyn haihtumiseen vedestä vaikuttavat sekä vallitsevat olosuhteet että veteen vuotaneen öljyn laatu (Fingas, 2015). Koska Saimaalla pääasiassa käytetään kevyitä polttoöljyjä tai dieseleitä, käsitellään tässä raportissa ainoastaan näiden öljytuotteiden haihtumista. Öljyntorjunnan kannalta ominaisuuksiltaan samankaltaiset vahinkotuotteet helpottavat torjuntasuunnitelmien tekemistä. On kuitenkin syytä noteerata, että teollisuuden, maantie- tai rautatieliikenteen lähellä vesialueita tapahtuvissa onnettomuuksissa voi veteen päästä myös edellä kuvatuista poikkeavia öljyalaatuja, joiden haihtumisominaisuudet voivat poiketa merkittävästikin tässä raportissa kuvatuista tuotteista.

Kevyet öljyalaadut haihtuvat nopeasti. Bensiinit haihtuvat useimmissa tapauksissa lähes kokonaan vuorokauden (Fingas, 2015) kuluessa veteen joutumisesta. Myös kevyiden polttoöljyjen ja dieselin haihtuminen on melko nopeaa, vaikkakaan ne eivät haihtumisnopeudellaan saavuta bensiinituotteita. Haihtumisnopeuteen vaikuttavat merkittävästi öljyalaadun lämpötila, sääolosuhteet, öljyn

säistymisaste ja öljykalvon paksuus (Fingas, 1995; Lehr, 2001; Vandermeulen & Hrudey, 1984).

Veteen joutuneen öljyn lämpötilan voidaan Saimaan alusöljyvahinkotapauksissa pitää samana kuin järveden pintalämpötilaa. Saimaalla tämä vaihtelee alueittain, vuodenajan ja suursäätilan mukaan (Korhonen, 2002). Suojaisilla, matalilla ja virtaamattomilla vesialueilla voi lämpimänä kesänä pintaveden lämpötila olla selkeästi yli 20°C, siinä missä voimakkaasti virtaavissa salmissa pintaveden lämpötila voi samaan aikaan jäädä 15°C tuntumaan. Toukokuussa ja loka-marraskuussa vedet ovat kylmiä, usein lämpötilan jäädessä alle 10°C. Jäät lähtevät yleensä huhti-toukokuun vaihteessa ja Saimaa jäätyy uudelleen tavallisesti joulukuussa (Korhonen, 2002).

Fayn laskennallinen malli yksinkertaisuudestaan huolimatta osoittaa selkeästi, että todennäköisissä alusöljyvahingoissa Saimaalla öljylautta levittäytyy nopeasti hyvin ohueksi kerrokseksi veden pinnalle. Kuten taulukoista (luku 3, taulukot 6 ja 7) voidaan havaita, pahimmissakin tapauksissa öljykalvon paksuus on nopeasti alle millimetrin. Tällaisissa tapauksissa erityisesti lämpiminä kesäpäivinä haihtuminen on todennäköisesti nopeaa.

Haihtumismäärien arviointiin on kehitetty erilaisia approksimointimenetelmiä. Fysikaalisesti menetelmät poikkeavat toisistaan. Esimerkiksi Mackayn ja Mantsugun (Mackay & Mantsugu, 1973) esittämä malli olettaa öljyn haihtuvan jokseenkin samaa vauhtia veden kanssa. Tämä malli huomioi öljylautan laajuuden, tuulen vaikutuksen sekä Schmidtin luvun avulla myös haihtumiseen vaikuttavan massadiffuusion. Tästä mallista on johdettu lukuisia kehittyneempiä malleja, kuten Suttonin (1934) tutkimukseen osin perustuvat Brightonin (Brighton 1990; Brighton, 1995) mallit.

Tutkimuksissa paljon käytetty haihtumismalli on Stiverin ja Mackayn (1984) esittämä malli, missä tietynä aikana haihtunut öljytilavuus lasketaan kaavalla:

$$V_{\text{haiht.tilav.}} = \frac{Pv}{RT} \frac{KA\Delta t}{V_0}, \quad (17)$$

missä P on öljyseoksen höyrynpaine (Pa), v on nesteen moolitilavuus (m^3/mol), R moolinen kaasuvakio, T lämpötila (K), K vallitsevasta tuulesta riippuva masakerroin, A öljylautan ala (m^2), V_0 veteen vuotaneen öljyn määrä (m^3) ja t laskettuun haihtumismäärään kulunut aika (s).

Mielenkiintoisena poikkeamana näistä, useampaan fysikaaliseen tekijään perustuvista malleista on Fingas (2015) esittänyt empiirisiin kokeisiin perustuvan, yksinkertaisen haihtumiskaavan eri öljyalauduille. Tilastoihin perustuen noin 1,5 mm öljykalvon paksuisista öljyalaudoista puhuttaessa osa öljyalauduista haihtuu ajan suhteen logaritmisesti ja osa ajan neliöjuuressa (muun muassa dieselit ja kevyet polttoöljyt). Oletuksena Fingasın yhtälössä lisäksi on, että öljy ei noudata samoja haihtumisperiaatteita kuin vesi, vaan erityisesti säästyneet öljy-vesiseokset voivat muodostaa ilmaa vastaan rajakerroksen, jolloin haihtumisnopeuden muutokset vallitseviin olosuhteiden nähden vakautuvat. Tämän lähtökohdan näkökulmasta esimerkiksi tuulen tai öljykalvon paksuuden vaikutusta haihtumisnopeuteen olisi usein yliarvioitu, vaikka toisaalta empiiriset kokeet tuulen vaikutuksesta ainakin laboratorio-olosuhteissa näyttäisivät vahvistavan tuulen haihtumista tehostavaa vaikutusta (Fingas, 2015; Lehr, 2001). Tämä on syytä pitää mielessä sovellettaessa Fingasın esittämää haihtumisyhtälöä. Fingasın haihtumiskaavaa on sovellettu myös SököSaimaa-hankkeessa (Häkkinen, 2017) ja sen etuna ovat laskentaan tarvittavat yksinkertaiset lähtötiedot. Kuten kaavasta voi hyvin nähdä, siinä painotetaan pääasiassa vallitsevaa lämpötilaa ja haihtumisaanjaksoa, sääolosuhteita tai öljykalvon muutoksia siinä ei ole huomioitu millään tavoin. Kaava antaa haihtumisprosentin $d\%$ valitulla ajanjaksolla:

$$d\% = (0,0254D + 0,01(T_c - 15))\sqrt{t}, \quad (18)$$

missä D on öljytuotteen tislautumisaste valitussa lämpötilassa, T_c on lämpötila celsiusasteina ja t aika minuutteina. Mikäli Fingasın mallin tuloksia vertaa esimerkiksi Stiven-Mackayn malliin (Lehr, 2001), näyttäisi Fingasın malli antavan jonkin verran hitaampia tuloksia haihtumisnopeudelle. Kuitenkin, kuten Häkkinenkin raportissaan toteaa (Häkkinen, 2017), parin vuorokauden kuluessa lämpötilasta riippuen dieseleistä ja kevyistä polttoöljyistä haihtuu noin 30–40 %. Mikäli siis öljyvuoto saadaan eristettyä rannoista, päästäneen suuresta osasta öljyä eroon odottamalla sen haihtumista.

3 LEVIÄMISTAULUKOT

Tässä luvussa esitetään yksittäisen ja jatkuvan vuodon leviämistäulukot, laskennallinen öljylautan leviämisenopeus sekä öljytilavuuden haihtumisprosentit eri lämpötilaolosuhteissa. Leviämistäulukoissa oletetaan Fayn pintajännitysvaiheen (Fay, 1969; Fay, 1971) dominoivan leviämistä ja haihtumisprosentit ovat lasketut Fingas in haihtumiskaavalla (Fingas, 2015). Leviämistäulukoissa on esitetty myös kalvon keskimääräiseen paksuuteen perustuva arvio öljylautan ulkonäöstä perustuen Bonn in sopimukseen (BAOAC, 2002) öljyn visuaalisen havainnoinnin numerointiluokitusmenetelmästä (taulukko 5).

TAULUKKO 5. BAOAC-öljyvuo don visuaalisen ilmeen koodisto.

Numero	Ulkonäkökuvaus	Määrä (m ³ /km ²)	Kalvon paksuus (mm)
1	Hopeinen / hailakka	0,04 – 0,3	0,00004 – 0,0003
2	Sateenkaaren väritys	0,3 – 5,0	0,0003 – 0,005
3	Metallinen väri	5,0 – 50	0,005 – 0,05
4	Epäjatkua öljy laadun todellinen väri	50 – 200	0,05 – 0,2
5	Jatkuva öljy laadun todellinen väri	yli 200	yli 0,2

Öljykalvon paksuuden havainnointiin silmämääräisesti vaikuttaa vallitseva säätila sekä kulma, mistä havainnoija tarkkailee öljylauttaa. Ohuimmillaan öljykalvo vaikuttaa hailakan hopeiselta riippumatta veteen vuotaneen öljyn laadusta. Visuaalisesti huomattavasti helpommin havaittavissa on sateenkaaren väritykseltä vaikuttava öljylautta. Tältä vaikuttava öljylautta onkin usein ihmisten keskuudessa parhaiten tunnettu ja se usein aiheuttaakin suurta huolta ihmisissä riippumatta siitä tosiasiaista, että sateenkaaren väreissäkin loistava lautta on paksuudeltaan niin ohut, että sen kerääminen on usein käytännössä mahdotonta. Metallisen värinen öljylautta vaikuttaa teräksisen harmaalta eikä heijasta enää spektrin värejä. Metallisen värisestä öljystä taivas ja pilvet usein heijastuvat selkeästi, jos vedenpinta on riittävän tasainen. Riippumatta veteen vuotaneen öljyn laadusta, nämä kolme lautan paksuusluokkaa vaikuttavat visuaalisesti samoilta. Vasta öljyn todellisen värin tullessa esiin lautan paksuuden ylittäessä 0,05 mm, on vuotaneen öljyn tyyppiä mahdollista päätellä silmämääräisesti. Dieselpolttoaineet vaikuttavat usein lähes värittömiltä ja raskas polttoöljy on väriltään mustaa. Raakaöljyn väritys on joko mustaa tai ruskeaa.

Taulukossa 6 on esitetty laskelmat yksittäisen öljyvuo don leviämisestä ajan

suhteen. Oletuksena on, että leviämistä dominoi Fayn pintajännitysmalli. Aikaikkunaksi on valittu 1-180 minuuttia, sillä voidaan olettaa, että viimeistään kahden tunnin kuluessa Saimaan alueella öljyntorjuntakalusto saadaan normaalissa tapauksessa paikalle. Taulukossa sarakkeissa on esitetty yksittäisen öljyvudon suuruusluokka (m³) ja riveillä vudon alusta laskien pääasiassa 15 minuutin välein öljylautan säde ja halkaisija, sekä keskimääräinen öljylautan paksuus ja sen visuaalinen ulkonäkö.

TAULUKKO 6. Kertavuodon leviäminen (veden lämpötila +25°C).

Aika vudon alusta	Öljylautan koko		Öljylautan leviämisenopeus					ÖLJYVUDON SUURUUS (m ³)			
								10		5	
(min)	Säde (m)	Halkaisija (m)	cm/s	m/s	m/min	km/h	solmua	Öljykalvon paksuus (mm)	Väri	Öljykalvon paksuus (mm)	Väri
1	14	27	22,8	0,23	13,7	0,82	0,44	16,9449	tod. väri	8,4725	tod. väri
5	46	92	15,3	0,15	9,2	0,55	0,30	1,5156	tod. väri	0,7578	tod. väri
15	104	209	11,6	0,12	7,0	0,42	0,23	0,2917	tod. väri	0,1458	liiki tod. väri
30	176	351	9,8	0,10	5,9	0,35	0,19	0,1031	liiki tod. väri	0,0516	liiki tod. väri
45	238	476	8,8	0,09	5,3	0,32	0,17	0,0561	liiki tod. väri	0,0281	metalli
60	295	591	8,2	0,08	4,9	0,30	0,16	0,0365	metalli	0,0182	metalli
75	349	699	7,8	0,08	4,7	0,28	0,15	0,0261	metalli	0,0130	metalli
90	400	801	7,4	0,07	4,4	0,27	0,14	0,0198	metalli	0,0099	metalli
105	450	899	7,1	0,07	4,3	0,26	0,14	0,0157	metalli	0,0079	metalli
120	497	994	6,9	0,07	4,1	0,25	0,13	0,0129	metalli	0,0064	metalli
135	543	1086	6,7	0,07	4,0	0,24	0,13	0,0108	metalli	0,0054	metalli
150	587	1175	6,5	0,07	3,9	0,23	0,13	0,0092	metalli	0,0046	sateenkaari
165	631	1262	6,4	0,06	3,8	0,23	0,12	0,0080	metalli	0,0040	sateenkaari
180	674	1347	6,2	0,06	3,7	0,22	0,12	0,0070	metalli	0,0035	sateenkaari

Taulukon 6 arvot on laskettu oletuksella, että vuoto tapahtuu lyhyessä ajassa. Käytännössä Fayn pintajännitysmallin perusteella öljyn leviämisenopeus ei riipu vuotaneen öljyn määrästä, joten leviämisen prosessin käynnistyttyä öljykalvon paksuuden ollessa riittävä leviäminen jatkuu laskennallisella nopeudella, vaikka vuoto tapahtuisi tosiasiallisesti jonkin verran pidemmän ajanjakson aikana. Kuitenkin, mikäli vuototapahtumaa ei voida pitää yksittäisenä kertavuotona, voi tosiasiallinen öljykalvon paksuus vaihdella merkittävästi öljylautan eri osissa, millä voi olla sopivissa olosuhteissa vaikutusta myös leviämisenopeuteen. Lisäksi huomioitavaa on, että laskennalliset öljykalvon paksuuden arvot suuremmissa vudodoissa (5 ja 10 m³) minuutin kohdalla noudattaisivat todennäköisesti sekä inertiaali- että viskoottisen vaiheen leviämismalleja. Kuitenkaan tällä ei arvioida olevan merkittävää epätarkkuutta kokonaisuuden kannalta.

Öljykalvon ohentuessa lähelle 0,001 millimetriä ei leviämistä enää voi luotettavasti arvioida pintajännitysmallin avulla. Tämän vuoksi taulukossa 6 ei ole lainkaan laskennallisia arvoja sellaisille tapauksille, missä lautun paksuus menee alle tuo paksuuden. Usein näissä tilanteissa lautta hajoaa nopeasti tuulen ja aal-

tojen vaikutuksesta, mikä onkin nähtävissä esimerkiksi öljylautoista otettuihin ilmakehiin. Myöskään öljyn kerääminen näin ohuista lautoista on käytännössä mahdotonta, joten öljyntorjuntasuunnitelmien kannalta niillä ei ole merkitystä.

Taulukossa 6 ja 7 on ilmaistu tilanne, jossa öljyä vuotaa veteen jatkuvana virtana. Fayn pintajännitysmalli edellä kuvatulla tavalla noudattaa samaa laskennallista leviämisenopeutta, mutta sitä vastoin keskimääräiseen, laskennalliseen öljykalvon paksuuteen tällä vuotomallilla on suuri merkitys. Kalvon pysyminen paksumpana johtaa leviämisen jatkumiseen Fayn pintajännitysmallin mukaan. Puhuttaessa lautan öljykalvon keskimääräisestä paksuudesta ja siitä seuraavasta visuaalisesta ilmeestä on syytä muistaa, että huomiot tulee tehdä katsoen lautan keskimääräistä ulkonäköä. Reunoilla, missä öljykalvo on todellisuudessa aina ohuempi, voi lautta loistaa sateenkaaren väreissä vaikka keskellä väritys olisikin metallinen. Tämä koskee siis niin taulukon 6 kuin taulukon 7 arvoja. Tarkemman tiedon puutteessa tästä voi tehdä myös päätelmiä, missä vaiheessa leviämisen prosessi tosiasia on.

TAULUKKO 7. Jatkuvan vuodon leviäminen (veden lämpötila +25°C).

Aika vuodon alusta	Öljylautan koko		Öljylautan leviämisenopeus					Öljyvuoodon suuruus (m ³ /min)			
								3		2	
(min)	Säde (m)	Halkaisija (m)	cm/s	m/s	m/min	km/h	solmua	Öljykalvon paksuus (mm)	Väri	Öljykalvon paksuus (mm)	Väri
1	14	27	22,8	0,23	13,7	0,82	0,44	5,0835	tod. väri	3,3890	tod. väri
5	46	92	15,3	0,15	9,2	0,55	0,30	2,2734	tod. väri	1,5156	tod. väri
15	104	209	11,6	0,12	7,0	0,42	0,23	1,3125	tod. väri	0,8750	tod. väri
30	176	351	9,8	0,10	5,9	0,35	0,19	0,9281	tod. väri	0,6187	tod. väri
45	238	476	8,8	0,09	5,3	0,32	0,17	0,7578	tod. väri	0,5052	tod. väri
60	295	591	8,2	0,08	4,9	0,30	0,16	0,6563	tod. väri	0,4375	tod. väri
75	349	699	7,8	0,08	4,7	0,28	0,15	0,5870	tod. väri	0,3913	tod. väri
90	400	801	7,4	0,07	4,4	0,27	0,14	0,5358	tod. väri	0,3572	tod. väri
105	450	899	7,1	0,07	4,3	0,26	0,14	0,4961	tod. väri	0,3307	tod. väri
120	497	994	6,9	0,07	4,1	0,25	0,13	0,4641	tod. väri	0,3094	tod. väri
135	543	1086	6,7	0,07	4,0	0,24	0,13	0,4375	tod. väri	0,2917	tod. väri
150	587	1175	6,5	0,07	3,9	0,23	0,13	0,4151	tod. väri	0,2767	tod. väri
165	631	1262	6,4	0,06	3,8	0,23	0,12	0,3957	tod. väri	0,2638	tod. väri
180	674	1347	6,2	0,06	3,7	0,22	0,12	0,3789	tod. väri	0,2526	tod. väri

Öljykalvon ohetessa hyvin ohueksi (alle 0,001 mm) leviämistä hidastaa öljykalvon sisäiset molekyyli-tason voimat, jolloin Fayn mallia ei enää sellaisenaan voida soveltaa. Myöskään säästymistä ja muita luonnonilmiöitä ei Fayn malli huomioi, mutta tuulten ja virtausten vaikutus on mahdollista arvioida kappaleessa 2.2 esitetyllä tavalla. Tämä tekee näistä taulukoista käyttökelpoisia erityisesti ensitorjunnan vaiheessa, jolloin oikeilla toimenpiteillä voidaan vahinkoa rajata tuntuvasti.

Kuten taulukoista 6 ja 7 voidaan havaita, Saimaalle tehtyjen öljyvahinkorisianalyysien ja niistä seuraavien leviämismallien perusteella vuotolautan öljykalvosta tulee nopeasti hyvin ohut. Usein alle 1 mm paksuisista lautoista öljyn kerääminen muuttuu hankalaksi, minkä johdosta monissa tapauksissa haihtumiselle joudutaan antamaan suuri rooli veteen vuotaneen öljyn poistamisessa. Fingas (2015) esittämän kaavan perusteella voidaan muodostaa laskentataulukko 8, missä on esitetty haihtunut öljymäärä ajan funktiona. Lämpötilalla on suuri vaikutus haihtumisnopeuteen, mikä näkyy erityisesti katsottaessa haihtumisprosentteja 3–4 vuorokauden kuluttua öljypäästöstä.

TAULUKKO 8. Öljyn laskennallinen haihtuminen ajan suhteen (1–36 h).

Lämpötila	Aika vuodon alusta						
	1 h	6 h	12 h	18 h	24 h	30 h	36 h
0,5 °C	4 %	11 %	15 %	19 %	21 %	24 %	26 %
2,5 °C	5 %	11 %	16 %	19 %	22 %	25 %	27 %
5,0 °C	5 %	12 %	16 %	20 %	23 %	26 %	28 %
7,5 °C	5 %	12 %	17 %	21 %	24 %	27 %	30 %
10,0 °C	5 %	13 %	18 %	22 %	25 %	28 %	31 %
12,5 °C	5 %	13 %	18 %	23 %	26 %	29 %	32 %
15,0 °C	6 %	13 %	19 %	23 %	27 %	30 %	33 %
17,5 °C	6 %	14 %	20 %	24 %	28 %	31 %	34 %
20,0 °C	6 %	14 %	20 %	25 %	29 %	32 %	35 %
22,5 °C	6 %	15 %	21 %	26 %	30 %	33 %	37 %
25,0 °C	6 %	15 %	22 %	27 %	31 %	34 %	38 %

Fingas (2015) empiiriset kokeet on tehty käyttäen 1,5 mm paksua öljykalvoa (Fingas, 2015). Verrattaessa tätä taulukoiden 6 ja 7 laskennallisiin öljykalvoihin voidaan todeta, että tavallisissa tapauksissa kalvot ovat selkeästi tätä ohuempia. Koska öljy on aivan veden pinnalla, olisi perusteltua tehdä hyvin ohuille kalvoille haihtumistutkimus, missä auringon ja lämmön vaikutusta tutkittaisiin erityisesti tällaisissa tapauksissa. Tyynellä säällä virtaamattomissa vesissä voi öljykalvon lämpötila nousta yllättävän korkeaksi, jolloin haihtumisprosentit voivat teoriassa nousta taulukossa 8 esitettyjä ylemmäksikin. Joka tapauksessa tämä on asia, missä lisätutkimusta erityisesti järviolosuhteissa olisi tehtävissä lisää paljonkin.

4 PÄÄTELMÄT

Tässä artikkelissa esitettyjen leviämistaulukoiden tehtävänä on edesauttaa operatiivisen öljyntorjunnan suunnittelua ja johtamista välittömästi öljyvahingon alkuvaiheessa. Taulukoiden laskennalliset arvot perustuvat Fayn pintajännitysvaiheen leviämismalliin. Kyseinen malli on varsin yksinkertainen, minkä vuoksi jo muutaman tunnin kuluttua mallin antamiin laskennallisiin tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti erityisesti epähomogeenisessa virtaus- ja tuulikentässä toimittaessa, mikä on hyvin yleinen tilanne saaristoisella Saimaalla. Lähituntien aikana öljyvuodon alettua tällä arvioidaan kuitenkin olevan selkeästi vähemmän merkitystä, sillä syvyydeltään vaihtelevilla alueilla virtauskentän tunteminen tarkempaa simulointia ajatellen on joka tapauksessa approksimointia johtuen tarkkojen virtausarvojen puutteesta. Myös tuuliolosuhteiden vaikutus saaristoisilla alueilla riippuu paljon tuulen käyttäytymisestä veden pinnassa, mihin vaikuttavat saarten korkeudet, muodot, välimatkat ja asemoituminen tuulen suhteen merkittäväällä tavalla. Suuremmilla selillä tuuliolosuhteet ovat ennustettavammat, mutta kuten Saimaan alueen riskianalyysit ovat osoittaneet, ovat todennäköisimmät riskialueet kuitenkin kapeilla väyläosuuksilla salmissa ja saarten ympäröimissä ränneissä.

Alueellisten, veden pinnalla vaikuttavien tuuliolosuhteiden huomioiminen tämän vuoksi onkin tehtävä aina tapauskohtaisesti ja siihen on hyvä käyttää mahdollisuuksien mukaan myös onnettomuusalueksen sekä tiedustelua tekevien yksiköiden mahdollisia tuulimittareita. Mikäli mittareita ei ole käytettävissä voi tuuliolosuhteita arvioida myös silmämääräisesti suunnan ja puuskaisuuden perusteella. Nämä tiedot yhdistettynä sääasemien antamaan dataan auttavat luomaan kokonaiskuvaa tuuliolosuhteista onnettomuusalueella. Luvussa 2.2 esitelty 3 % sääntö tuulen vaikutuksesta pintavirtauksiin on alun perin luotu meriolosuhteisiin ja on todennäköistä, että se antaa laskennallisesti todellista selkeästi suuremman liikenopeuden öljylautalle saariston turbulenttisissa tuuliolosuhteissa. Toisaalta järvi- ja kevyempänä fluidina reagoi helpommin tuulen vaikutukseen ja matalamman aallokon johdosta veden pinnan päällä ilmenevä voimakkaan turbulenttinen rajakerros on ohuempi. Lisätutkimusta asiassa siis tarvitaan, mutta todennäköisesti Saimaalla tuulen vaikutus öljylautan liikenopeuteen on 0,3–1 % tuulen nopeudesta. Toistaiseksi tämä on kuitenkin vain kokemusperäinen arvio.

Virtausolosuhteiden arviointia helpottaa päävirtauksien suhteellinen pysyvyys. Tuuliolosuhteista riippumattomien virtauksien voimakkuuteen vaikuttavat pitkäaikaisemmat luonnonilmiöt, kuten sateisuus ja edellisen talven lumitilanne. Syke havainnoi aktiivisesti suurempien järvialueiden välissä olevien salmien virtauksia, mikä antaakin hyvää pohjadataa myös öljyntorjuntaa ajatellen arvioitaessa vuosittaisia virtausvoimakkuuksien vaihteluita. Kuitenkaan näillä menetelmillä ei saada tarkempaa dataa pintavirtauskentästä edes mittausalueilla puhumattakaan mittausalueiden ulkopuolisista virtausolosuhteista. Epäsäännöllisesti vuosien varrella tehtyjen pintavirtausmittausten tulosten osalta yhteenvetona voidaan lähinnä todeta virtauskentän vaihtelevan alueellisesti erityisesti vallitsevien sääolosuhteiden ja pohjanmuotojen johdosta. Kuitenkin virtaavien alueiden tuntemisessa öljyntorjuntaan osallistuvan henkilöstön paikallistuntemus auttaa paljon, lisäksi vallitsevia pintavirtauksia voidaan onnettomuustilanteissa silmämääräisesti arvioida havainnoimalla veden liikettä kiinteiden esteiden, kuten viittojen suhteen. Rannan tuntumassa virtaus on adheesiosta johtuen yleensä hitaampaa, minkä johdosta havainnointia erityisesti matalien rantojen suhteen tulisi välttää.

Kevyiden öljytuotteiden nopea haihtuminen erityisesti lämpimissä olosuhteissa helpottaa öljyjätteen keräystyötä vahingon satuttua. Fingasin haihtumiskaavan mukaan 2–3 päivän aikana, lämpötilan ollessa noin 20°C yli 50 % dieselistä haihtuu veden pinnalta. Kylmemmissä olosuhteissa tästä jäädyään selvästi, mutta tuolloinkin merkittävä osuus öljytuotteesta haihtuu. Nopeasti veden pinnalle leviävä öljy, ohueksi käyvä öljykalvo ja nopeahko haihtuminen ratkaisee monissa tapauksissa, mitä menetelmiä öljyntorjuntaan kannattaa käyttää. Selvästi alle 1 millimetrin paksuisten öljykalvojen mekaaninen kerääminen vedestä on hankalaa. Toisaalta rantojen saastuminen hidastaa haihtumista öljyn imeytyessä maamateriaaliin.

Parhaimmillaan tässä tutkimuksessa kehitettyjä taulukoita voidaan käyttää tehtaässä päätöksinä tarkoituksenmukaisista torjuntamenetelmistä. Vaikka öljyvuo- don kaltaisia, fysiikaltaan monimutkaisia ilmiöitä ei voikaan taulukoiduilla arvoilla kuvata realistisesti, antavat taulukot kuitenkin lähituntien aikana sovellettavissa olevan kuvan öljyvahingon aiheuttamasta vaara-alueesta, mikä todennäköisesti tulee saastumaan ilman aktiivisia torjuntamenetelmiä. Yhdistettynä tehokkaaseen tiedusteluun, logistisesti oikein sijoitettuun ja riittävään torjuntakalustoon ja osaavaan henkilöstöön, voidaan monen tyyppisiä öljyvahinkoja rajata ja aiheutuneita seurauksia näin vähentää. Parhaimmillaan hyödyt voivat olla siis merkittäviä.

LÄHTEET

Berry, A., Dabrowski, T., Lyons, K. 2012. The oil spill model oiltrans and its application to the Celtic sea. *Marine pollution bulletin*, vol. 64(11), pp. 2489–2501.

Bonn agreement oil appearance code. Www-dokumentti. Saatavissa: environmentalunit.com/documentation/01_aerial_observation/baoac_presentation.pdf [Viitattu 24.7.2017].

Brighton, P.W.M. 1990. Further verification of a theory for mass and heat transfer from evaporating pools. *Journal of hazardous materials*, vol. 23(2), pp. 215–234.

Brighton, P.W.M. 1985. Evaporation from a plane liquid surface into a turbulent boundary layer. *Journal of fluid mechanics*, vol. 159, pp. 323–345.

Buckmaster, J., 1973. Viscous-gravity spreading of an oil slick. *Journal of fluid mechanics*, vol. 59(3), pp. 481–491.

Chebbi, R. 2014. Viscous-gravity spreading of oil on water: Modeling and challenges. *International journal of chemical engineering and applications*, vol. 5(2), pp. 186–189.

Fay, J.A. 1969. The spread of oil slicks on a calm sea. In Hoult, D.P. (ed.): *Oil on the sea*. New York: Plenum.

Fay, J.A. 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. *Proceedings the joint conference on prevention and control of oil spills*, Washington D.C., pp. 463–467.

Fingas, M. 2015. *Handbook of oil spill science and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Fingas, M. 1995. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation. *Journal of hazardous materials*, vol. 42(2), pp. 157–175.

Halonen, J., Häkkinen, J.J., Kauppinen, J. 2017. Saimaan syväväylän alusliikenteen riskialueet alusöljyvahingon näkökulmasta. Teoksessa Malk (toim.), Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn- ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Heino, H., Voroshilin, D., Heikkilä, H., Halonen, J., Häkkinen, J.J. 2017. Haverialuksen miehistön ensitoimenpiteet alusöljyvahingossa. Teoksessa Malk (toim.), Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn- ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Hietala, M. 2015. Virtavedet ja järvialueet (Boris-työpaja 20–21.5.2015).

Häkkinen, J.J. 2017. Öljyvahinkoskenaarioiden mallinnus Saimaan vesistössä. Teoksessa Malk (toim.), Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn- ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Jeffery, P.G., 1973. Large-scale experiments on the spreading of oil at sea and its disappearance by natural forces. International oil spill conference proceedings, no. 1, pp. 469–474.

Korhonen, J. 2002. Suomen vesistöjen lämpötilaolot 1900-luvulla. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Korhonen, J. 2007. Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Korhonen, J. (toim.) 2006. Hydrologinen vuosikirja 2001–2005. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Korhonen, J. & Haavanlammi, E. (toim.) 2012. Hydrologinen vuosikirja 2006–2010. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Kuusisto, E. 1978. Suur-Saimaan vesitase ja tulovirtaaman ennustaminen. Helsinki: Vesihallitus, vesientutkimuslaitoksen julkaisuja.

Lehr, W. 2001. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior. *Advances in ecological sciences* 9, pp. 51–90.

Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R. 2002. Revisions of the Adios oil spill model. *Environmental modelling & software*, vol. 17(2), pp. 189–197.

Löfgren, K-E., Stenström, F., Jylhä, P., Ollaranta, J., Ranta, M., Sundman, E., Österman, T., Kervinen, C., Suorlahti, E. 2009. Veneilijän merenkulkuoppi II, rannikonavigointi. Helsinki: Suomen navigaatioliiton julkaisuja 8A.

Mackay, D., Mantsugu, R.S. 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. *Canadian journal of chemical engineering*, vol. 51, pp. 434–439.

Malk, V. 2017. Vaarallisten aineiden varastoinnin sekä maantie- ja rautatiekuljetusten ympäristöriskikohteet Itä-Suomessa. Teoksessa Malk (toim.), Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn- ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Mishra, A.K. & Kumar, G.S. 2015. Weathering of oil spill: Modeling and analysis. *International conference on water resources, coastal and ocean engineering. Aquatic procedia* 4, pp. 435–442.

Paladino, E.E. & Maliska, C.R. 2000. Mathematical modeling and numerical simulation of oil spill trajectories on the sea. Federal university of Santa Catarina, Brazil.

Reji, P. & Renu, P. 2013. Review on marine oil spill trajectory modeling and ESI mapping with a focus on the Kerala coastal environment. *Journal of engineering*, vol. 3(11), pp. 56–61.

Stiver, W., Mackay, D. 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental science & technology*, vol. 18, pp. 834–840.

Suchon, W. 1970. An experimental investigation of oil spreading over water. PhD thesis. Massachusetts institute of technology.

Sutton, O.G. 1934. Wind structure and evaporation in a turbulent atmosphere. Proceedings of the royal society A, vol. 146(858), pp. 701–722.

Vandermeulen, J.H., Hrudey, S.E. 1984. Oil in fresh water: chemistry, biology, countermeasure technology: Proceedings of the symposium in fresh water. Edmonton, Alberta, Canada, 15–19 Oct. 1984.

White, F. M. 2011. Fluid mechanics (7th ed.). New York: McGraw-Hill.

LIITTEET

LIITE 1. Veden kinemaattinen ja dynaaminen viskositeetti, tiheys ja pintajännitys lämpötilan funktiona

Veden lämpötila (°C)	Kinemaattinen viskositeetti (mm ² /s)	Kinemaattinen viskositeetti (m ² /s)	Dynaaminen viskositeetti (mPa·s)	Veden tiheys (kg/m ³)	Veden pintajännitys (N/m)
0	1,787	1	1,787	999,8	0,07565
1	1,7303	1,7303E-06	1,7303	999,9	0,075510
2	1,6736	1,6736E-06	1,6735	999,9	0,075364
3	1,6191	1,6191E-06	1,619	1000	0,075221
4	1,5674	1,5674E-06	1,5673	1000	0,075078
5	1,5182	1,5182E-06	1,5182	1000	0,074935
6	1,4716	1,4716E-06	1,4715	999,9	0,074792
7	1,4272	1,4272E-06	1,4271	999,9	0,074649
8	1,3849	1,3849E-06	1,3847	999,9	0,074506
9	1,3447	1,3447E-06	1,3444	999,8	0,074363
10	1,3063	1,3063E-06	1,3059	999,7	0,07422
11	1,2696	1,2696E-06	1,2692	999,6	0,074072
12	1,2347	1,2347E-06	1,234	999,5	0,073036
13	1,2012	1,2012E-06	1,2005	999,4	0,073184
14	1,1692	1,1692E-06	1,1683	999,2	0,073628
15	1,1386	1,1386E-06	1,1375	999,1	0,07348
16	1,1092	1,1092E-06	1,1081	998,9	0,073332
17	1,0811	1,0811E-06	1,0798	998,8	0,073184
18	1,0541	1,0541E-06	1,0526	998,6	0,073036
19	1,0282	1,0282E-06	1,0266	998,4	0,072888
20	1,0034	1,0034E-06	1,0016	998,2	0,07274
21	0,9795	9,795E-07	0,9775	998	0,072586
22	0,9565	9,565E-07	0,9544	997,8	0,072432
23	0,9344	9,344E-07	0,9321	997,5	0,072278
24	0,9131	9,131E-07	0,9107	997,3	0,072124
25	0,8926	8,926E-07	0,89	997	0,07197

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU

- 1 *Srujal Shah - Kari Dufva: CFD modeling of airflow in a kitchen environment. Towards improving energy efficiency in buildings. 2017.*
- 2 *Elias Altarriba: Öljyn leviämisen estimointi arviointitaulukoiden avulla osana operatiivista öljyntorjuntatyötä Saimaalla. 2017.*



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu