

# Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa

Hannele Holttinen

VTT Energia

Seppo Liukkonen & Karl-Johan Furustam

VTT Valmistustekniikka

Mauri Määttä

TKK, Lujuusopin laboratorio

Erkki Haapanen

Ins.tsto Erkki Haapanen Ky

Esa Holttinen

Energia-Ekono Oy



ISBN 951-38-5001-3  
ISSN 1235-0613

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

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

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

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

VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja konetekniikka, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 5888

VTT Tillverknings teknik, Skepps- och maskinteknik, Teknikvägen 12, PB 1705, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 5888

VTT Manufacturing Technology, Maritime and Mechanical Engineering,  
Tekniikantie 12, P.O.Box 1705, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 5888

Kansikuva: Tunø Knob offshore-tuulivoimapuisto Tanskassa (kuva: Vestas A/S)

Toimitus Leena Ukskoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1998

Holttin, Hannele, Liukkonen, Seppo, Furustam, Karl-Johan, Määttä, Mauri, Haapanen, Erkki & Holttin, Esa. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa [Offshore wind power in ice infested waters of Gulf of Bothnia]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 828. 118 s. + liitt. 13 s.

**Avainsanat** electric power generation, wind energy, windmills, wind power generation, coasts

## Tiivistelmä

Tuulivoiman laajamittainen potentiaali on merellä, missä tuuliolosuhteet ovat rannikkoa paremmat ja alueiden käyttörajoitukset lievemät. Merelle rakennettaessa tulee kuitenkin huomattavia lisäkustannuksia varsinkin perustuksista ja merikaapelista.

Tässä raportissa luodaan katsaus offshore- eli merituulivoimaan Euroopassa, erityisesti toteutettujen ja suunniteltujen hankkeiden perustustekniikoihin ja kustannuksiin. Suomessa merituulivoimaa tarkastellaan Perämeren matalikoiden kannalta.

Perämeren alueella on laajoja matalikoita, jotka soveltuvat tuulivoiman tuottamiseen. Merkittävän ongelman muodostavat jäiden aiheuttamat kuormat, jotka rasittavat perustuksia ja voimalaitosta. Tässä raportissa Perämeren jääoloja ja jääkuormia tarkastellaan laajasti merituulivoimaloiden suunnittelun taustatiedoiksi. Jälle sopivat lujusarvot ja jään aiheuttamat staattiset ja dynaamiset kuormitustapaukset ja niiden laskenta käydään läpi. Merkittävin kuormitus syntyy jään murtuessa rakennetta vasten. Kartion muotoiselle rakenteelle kuorma putoaa jopa kolmannekseen ja myös dynaamiset rasitukset pienenevät huomattavasti. Megawattiluokan tuulivoimaloiden sijoittamiselle suositellaan paikkoja, joilla liikkuvien jäiden paksuus on alle 40 cm. Lisäksi tuulivoimalaan suositellaan rakennettavaksi jääkartio vesirajaan, jolloin jääkuormat jäävät alle 1 MN tasolle.

Merituulivoiman tekninen potentiaali Suomen Perämeren matalikoilla, Vaasasta Tornioon, on yli 40 TWh/a, kun vaaditaan 7 m/s keskituulenoisuus, alle 10 m veden syvyys ja liikkuvien jäiden maksimipaksuus 40 cm. Potentiaali on laskettu täyttämällä kaikki yllä olevat ehdot täyttävät alueet tuulivoimalaitoksilla (lähes 2 000 km<sup>2</sup>, yli 11 000 voimalaa, vajaat 17 000 MW). Käytännössä

toteutuskelpoisia alueista on vain osa, kun otetaan huomioon alueiden käytön rajoitukset (mm. merenkulku, luonnonsuojelu ja puolustusvoimat).

Merituulivoimalaitosten perustusten materiaaleissa ja pintakäsittelyissä on kiinnitettävä huomio teräksen korroosion ja betonin huokosveden jääytymisen estoon sekä pohjan eroosioon. Kulkutiet tuulivoimalaitokseen on tehtävä siten, että sinne nousu on mahdollista sekä kohtuullisessa aallokossa että talvella jäiden aikaan. Mitoituksen tulee ottaa huomioon sekä paikalliset korkeat jääpaineet että laajalta alalta kertyvät kokonaisjääkuormat niin staattisina kuin dynaamisina. Aaltokuormien laskennassa on huomioitava aaltojen taajuussisältö sekä aallon iskut rakenteeseen ja se, kuinka korkealle pärskeet nousevat. Erisyvyiset vedet vaativat erilaisia perustus- ja pystytystekniikoita. Raportissa tarkastellaan lähemmin elementeistä rakennettua kasuuni-perustusta erisyvyisiin vesiin. Pystytysvaihtoehdoista tarkastellaan lähemmin voimalan ja perustuksen uittoa, ja niille tehdään alustavat vakavuustarkastelut.

Yhden megawattiluokan tuulivoimalan perustuksen kustannukset asennuksineen alle 10 m syvyiseen veteen ovat arviolta 1,5–2,5 miljoonaa markkaa. 10 laitoksen merituulipuistolle tehdyt alustavat kustannusarviot osoittavat, että merituulivoima on vielä selvästi maalle rakennettavaa kalliimpaa, 33–35 p/kWh verrattuna 26 p/kWh. Rakennettaessa suuria merituulipuistoja kustannukset tuotettua kWh kohti putoavat. Esimerkiksi Tanskassa vuosituhannen vaihteessa rakennettavien merituulipuistojen (100 tuulivoimalaa, 150 MW) tuotantokustannuksiksi arvioidaan noin 30 p/kWh (maalle rakennettaessa noin 20 p/kWh). Tuulivoimalaitoskoko on 10 viime vuoden aikana kasvanut sadan kilowatin kokoluokasta megawattiluokkaan. Tällä hetkellä 1,5 MW voimalaitoksia on kaupallisesti saatavilla, ja nimenomaan merituulivoimaa ajatellen on aloitettu 2–3 MW laitosten suunnittelu. Perustustekniikoiden kehittyessä ja suuria yksiköitä rakennettaessa on merituulivoimalla mahdollista saavuttaa maalle rakennettavan tuulivoiman kustannukset ainakin siinä vaiheessa, kun parhaat rannikkopaikat on jo rakennettu.

Holttinen, Hannele, Liukkonen, Seppo, Furustam, Karl-Johan, Määttänen, Mauri, Haapanen, Erkki & Holttinen, Esa. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa [Offshore wind power in ice infested waters of Gulf of Bothnia]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Julkaisuja – Publikationer 828. 118 p. + app. 13 p.

**Keywords** electric power generation, wind energy, windmills, wind power generation, coasts

## Abstract

The large scale potential of wind power is at sea, where wind resource is better than on land, and the restrictions of area use are not as severe as on land. There are, however, significant extra costs especially from foundations and network (sea cable).

In this report an overview of offshore-wind power in Europe is taken. In Finland, offshore wind power is considered for the shallow waters of Gulf of Bothnia.

There are large shallow areas in Gulf of Bothnia which are suitable for offshore wind power. The sea bottom is mostly flat with good load-bearing capacity. A significant problem is caused by the ice cover in wintertime causing loading on foundations and wind turbine. In this report the ice conditions and ice loads are studied as background information for foundation design. The loading cases and computing are presented. The most significant loads are caused by moving ice breaking against the structures. For conical structures the loads are reduced to one third and also the dynamic loads are significantly reduced. The recommendations for megawatt-class turbines are to build an ice cone and to choose the site so as to avoid areas where moving ice is thicker than 40 cm. These restrict the ice loads to less than 1 MN.

The technical potential of offshore wind power in Gulf of Bothnia is estimated as more than 40 TWh/a, when the annual wind speed of at least 7 m/s, water depth of less than 10 m and moving ice thickness of less than 40 cm are required. The potential estimate is calculated by filling all above mentioned areas with wind turbines: nearly 2 000 km<sup>2</sup>, more than 11 000 turbines, nearly 17 000 MW. In practise the potential is far less when taking into account the restrictions for area use (f.ex. navigation, nature conserve and defence).

The foundations of offshore wind turbines are more demanding than on land. The foundation techniques for different water depths vary. In this report a massive foundation made of elements is studied for different water depths. For the installation floating the turbine together with the foundation is studied with preliminary stability consideration.

The cost of one megawatt turbine foundation installed to water depths less than 10 m ranges from 1.5 to 2.5 million FIM. The estimated cost calculations for 10 offshore wind turbines show that offshore wind power is still clearly more expensive as land based wind power: 33–35 p/kWh compared to 26 p/kWh. When the turbine size and size of offshore wind park is raised, and the foundation techniques are improved, the costs of offshore wind power will become competitive with land based wind power, at least at a stage where the best sites on land have been built.

# Alkusanat

Tämä raportti on valmistunut osana NEMO2-ohjelman Offshore-tuulivoiman perustus- ja pystytystekniikoiden kehittäminen -projektia. Tutkimusta ovat TEKESin lisäksi rahoittaneet Kokkolan energialaitos ja Korpelan Voima sekä VTT Energia, Ins.tsto Erkki Haapanen Ky, Revon Sähkö ja VTT Valmistustekniikka.

Projektipäällikkönä toiminut dipl.ins. Hannele Holttinen on koonnut ja muokannut raportin tekstit ja kirjoittanut pääosin kohdat 1.1–1.2, 3.5.1, 7.2 ja luvun 10. Prof. Mauri Määttänen on kirjoittanut kohdat 1.3, 2.1, 2.7, 4, 5.1, 6, 7.1 ja 7.4. dipl.ins. Seppo Liukkonen on kirjoittanut pääosin kohdat 2, 5.2–5.4 ja ins. Karl-Johan Furustam kohdan 9.2.1. Luku 3 on pääosin dipl.ins. Esa Holttisen käsialaa, ja kohdat 1.4, 7.3, 8 ja 9.2 dipl.ins. Erkki Haapasen.

Tekijät haluavat osoittaa kiitoksensa perustus- ja pystytyskustannusten arvioimisesta YIT:lle ja Suomen Merityölle. Erityisesti kiitämme projektiin osallistuneiden sähkölaitosten edustajia Juhani Paanasta ja Juhani Asiaista aktiivisesta osallistumisesta hankkeeseen.

Espoossa 20.3.1998,

Tekijät

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat	7
Symboliluettelo	11
1. Taustaa	14
1.1 Suomen aikaisemmat potentiaalikartoitukset	14
1.2 Merituulivoima Euroopassa	14
1.2.1 Kokemuksia toteutetuista merituulivoimahankkeista	15
1.2.2 Laajojen tuulipuistojen rakentaminen	16
1.3 Ympäristöolosuhteet Perämerellä	18
1.4 Ympäristövaikutusten huomioiminen	20
2. Perämeren jääolosuhteet	21
2.1 Jääolosuhteet	22
2.2 Jäätalven pituus	23
2.3 Tasaisen jään paksuus	24
2.4 Liikkuvan jään maksimipaksuus	25
2.5 Jääolojen yleiskuvaus	28
2.6 Jääolosuhdearviot esimerkkipaikoille	29
2.7 Jään lujuusarvot ja mitoitusolosuhteet Perämerellä	30
3. Merituulivoiman potentiaaliset sijoituskohteet Perämerellä	34
3.1 Tuulisuusanalyysi	34
3.2 Syvyysaineisto	35
3.3 Jääolojen tuomat rajoitukset	35
3.4 Potentiaalisten alueiden määrittäminen	36
3.5 Rakennus- ja tuotantopotentiaalit	36
3.5.1 Tuulivoimaloiden keskinäinen varjostusvaikutus	37
3.5.2 Tuotantoarvio	37
3.5.3 Tekniset rakennus- ja tuotantopotentiaalit	38
3.6 Potentiaaliarvion virhelähteitä	40



3.7	Potentiaalia rajaavia tekijöitä	42
3.7.1	Etäisyys sähköverkkoon	42
3.7.2	Kuljetus- ja pystytystekniset kysymykset	42
3.7.3	Jääkuormat	42
3.7.4	Visuaaliset vaikutukset	42
3.7.5	Kilpailevat alueidenkäyttöintressit	43
4.	Jäävaikutukset	45
4.1	Jäävaikutusskenaariot	45
4.1.1	Liikkuvan jään nopeus ja voima	45
4.1.2	Rakenteeseen kiinnijäätyminen, adheesio	46
4.1.3	Hidas sitkeä jään murto	46
4.1.4	Nopea hauras jään murto	46
4.1.5	Dynaamiset efektit	47
4.1.6	Jään lämpölaajeneminen	47
4.1.7	Vedenpinnan korkeusvaihtelu	48
4.1.8	Jäätäminen	49
4.2	Jääkuormat	49
4.2.1	Jään murskautuminen pystyrakennetta vasten	49
4.2.2	Jään taivutusmurto kartioita vasten	51
4.2.3	Lämpölaajenemiskuorma	52
4.2.4	Adheesiokuormat	53
4.2.5	Jään lommahtaminen	54
4.3	Dynaamiset kuormat	56
4.3.1	Värähtelyjä aiheuttavat kuormat	56
4.3.2	Iskukuormat	58
4.3.3	Jääkuorman satunnaisvaihtelu	59
4.3.4	Oletettu jäävoimafunktio	59
4.3.5	Itseherätteinen dynaaminen jääkuorma	62
5.	Aaltokuormat	63
5.1	Aaltojen synty ja vaikutukset	63
5.2	Aaltokuormien laskentamenetelmä	65
5.3	Aaltokuormien suuruusluokka Perämerellä	68
5.4	Yhteenvedo aaltokuormista	71
6.	Jäänhallintatekniikat	72
6.1	Kiinteät esteet	72
6.2	Jääkasauman hallinta	73

7. Offshore-perustustekniikat	74
7.1 Merirakenteet jäissä	74
7.2 Tuulivoimaloiden perustukset merellä	77
7.2.1 Kasuuni / Tunø Knob, Tanska	78
7.2.2 Junttapaalu	79
7.3 Perämerelle suunniteltu perustus	82
7.3.1 Perustuksien materiaalivalinta	83
7.3.2 Perustustyypin valinta	83
7.3.3 Voimalan kiinnitys perustuksiin	84
7.3.4 Jääkartio	84
7.3.5 Perustuksen pohjan valmistelu	86
7.3.6 Matalikolle perustaminen	87
7.3.7 Perustus 3–5 metrin syvyyteen	89
7.3.8 Perustus 5–10 metrin syvyyteen	91
7.4 Eroosiosuojaus	92
8. Voimalalle asetettavat vaatimukset meriolosuhteissa	94
8.1 Jääolosuhteiden aiheuttamat vaatimukset voimalalle	94
9. Pystytystekniikat	96
9.1 Pystytys merellä	96
9.2 Uitto	97
9.2.1 Uiton vakavuustarkastelu	100
10. Merituulivoiman kustannukset	106
10.1 Perustusten kustannusvertailu	106
10.2 Tuulivoimahankkeen kustannusarvio	107
10.3 Projektikoon ja vesisyvyyden vaikutus kustannuksiin	109
11. Yhteenveto	112
Lähdeluettelo	114

## LIITTEET

Liite 1: Perämeren tekninen merituulivoimapotentiaali. Syvyys- ja tuulisuusvyöhykkeet sekä jäiden asettamat rajoitukset.

Liite 2: Kartion jäävoimakaavan kertoimet (Ralston)

Liite 3: Värähtelyanalyysi 1,5 MW voimalalle

# Symboliluettelo

$\alpha$	kartiokulma vaakatasosta
$\sigma_b$	taivutuslujuus
$\sigma, \sigma_c$	jään puristuslujuus
$\sigma_p$	paikallinen pintapaine
$\dot{\epsilon}$	venymänopeus
$\mu$	kitkakerroin
$\xi$	kerroin
$\eta$	kerroin
$\omega$	taajuus
$\pi$	vakio, pii
$\tau_a$	adheesiolujuus
$\tau$	leikkauslujuus
$\rho_w, \rho$	veden tiheys
$\phi$	kulma
$\Delta$	uppouman massa
$a$	annuiteetti
$A$	vakio
A1–A4	kertoimia
B1–B2	kertoimia
$b$	kuormitusalueen leveys
$C_a$	kontaktikerroin
$C_D$	vastusvoimakerroin
$C_M$	hitausvoimakerroin

$C_s$	jännitys jakaumakerroin
$d$	rakenteen leveys projisoituna jään liikesuuntaan; vaimennusmatriisi
$D_T$	kartion kaulan halkaisija
$D$	rakenteen halkaisija
$e_\phi$	dynaaminen vakavuusvarsi
$E$	kimmokerroin; vuosituotanto
$f$	aaltokuorma
$f_I$	aaltokuorman hitausvoima
$f_D$	aaltokuorman vastusvoima
$F_c$	jäävoima
$F$	jäävoima; kuormitusvektori
$F_a$	adheesiovoima
$g$	maan vetovoiman kiihtyvyys
$GZ$	oikaiseva momenttivarsi
$h$	jään paksuus; kWh-hinta
$H$	jäävoiman vaakakomponentti; aallon korkeus
$H_s$	merkitsevä aallonkorkeus
$I$	kerroin
$Inv$	investointikustannus
$k$	jäykkyysmatriisi
$k_1$	muotokerroin
$k_2$	kontaktikerroin
$k_3$	sivusuhtekijä
$KC$	Keulegan-Carpenter-luku

L	etäisyys rannasta; jään karakteristinen pituus; aallon pituus
m	massamatriisi
M	oikaiseva momentti
n	roottorin lapojen lukumäärä
N	aaltojen lukumäärä
o	käyttökustannus
P	lommahduskuorma
p	viskoplastisen lommahduksen tarvitsema jännitys
RPM	roottorin pyörimisnopeus
S	aallon kasvumatka
T	jakson pituus
$T_0$	ominaismuodon jakson pituus
t	aika
$u$	siirtymävektori
$\dot{u}$	nopeusvektori
$\ddot{u}$	kiihtyvyyksvektori
$u_m$	vesipartikkelin maksiminopeus
V	jään liikenopeus; jäävoiman pystykomponentti; lämpölaajenemisnopeus; pystysuora adheesiovoima; aallon etenemisnopeus
W	tuulen nopeus; dynaaminen vakavuustyö
z	syvyyskoordinaatti

# 1. Taustaa

Tuulivoiman laajamittainen potentiaali on merellä. Lyhytkin siirtyminen rantaviivalta merelle parantaa tuuliolosuhteita huomattavasti. Lisäksi erilaiset alueiden käytön rajoitukset säätelevät tuulivoimaloiden rakentamista merellä vähemmän kuin maalla. Merelle rakentaminen aiheuttaa kuitenkin maalle verrattuna huomattavia lisäkustannuksia. Kaapelointimatka pitenee ja vaativampi, mereen tehtävä perustus nostaa perustamiskustannuksia. Perustusten lisäkustannukset saattavat olla vielä suuremmat sijoituspaikoilla, joilla aallokko tai jäät aiheuttavat kuormia voimalan perustukseen ja rakenteisiin.

Tuulivoimalaitoskoko on viimeisten 10 vuoden aikana kasvanut megawattiluokkaan. Vuonna 1997 markkinoiden yleisin kokoluokka oli 600 kW, mutta 1,5 MW voimalaitoksia oli jo markkinoilla. Suurempi voimalaitoskoko on erityisen houkutteleva rakennettaessa merelle, koska perustuskustannukset eivät kasva suhteessa saavutettuun tuotantoetuun.

## 1.1 Suomen aikaisemmat potentiaalikartoitukset

Suomessa merituulivoiman potentiaalia on kartoitettu aikaisemmin kahdessa selvityksessä. Ensimmäisen tuulivoiman potentiaalikartoituksen yhteydessä vuonna 1989 tuotantopotentiaaliksi arvioitiin 1 TWh vuodessa/150 km<sup>2</sup> puuttumatta tarkemmin siihen, mihin merituulivoimaa voisi sijoittaa (Peltola, 1989).

Tuulivoiman rakentamista luodoille on selvitetty vuonna 1994. Tällöin potentiaaliksi luodoille ja saariin arvioitiin 30 TWh/a, josta noin 4 TWh voitaisiin rakentaa olemassa olevaa rannikon sähköverkkoa vahvistamatta (Somnardal et al., 1994). Luodoille rakentaminen vähentää perustuskustannuksia olennaisesti verrattuna meren pohjaan perustamiseen mutta parantaa tuotantoa merkittävästi verrattuna mantereelle rakentamiseen. Toistaiseksi ei luodoille rakentamista ole koetettu Suomessa, kun suunniteltu demonstraatiohanke Espoon Suvisaaristossa kaatui kesäasukkaiden vastustukseen. Luonnonsuojelu ja loma-asutus rajoittavat voimakkaasti myös luotojen käyttöä tuulivoimatuotantoon.

## 1.2 Merituulivoima Euroopassa

Euroopassa merituulivoimaa on rakennettu kolmessa maassa: Tanskassa, Ruotsissa ja Hollannissa on kussakin kaksi toteutettua hanketta. Englannissa on vireillä offshore-demonstraatiohanke. Tanskassa, Hollannissa ja Ruotsissa on suunnitelmat suurille, yli 100 MW tuulipuistoille.

### 1.2.1 Kokemuksia toteutetuista merituulivoimahankkeista

Tähän mennessä maailmassa on toteutettu kuusi merituulivoimaprojektia: kaksi Tanskassa, kaksi Hollannin IJselmeerillä ja kaksi Ruotsissa (taulukko 1). Kaikki hankkeet ovat suhteellisen lähellä rannikkoa, ja veden syvyys asennuspaikoilla on 3–6 m.

*Taulukko 1. Toteutetut merituulivoimahankkeet: kapasiteetti (MW), etäisyys rannikosta (km), kokonaisinvestointi (milj. mk) ja keskimääräinen vuosituotanto.*

Maa/Paikka	kpl	Koko/Valmistaja	MW	Vuosi	km	Invest. Mmk	Tuotanto MWh/a
Ruotsi/Nogersund	1	220 kW/WindWorld	0,22	1990			
Tanska/Vindeby	11	450 kW/Bonus	4,95	1991	1,5	62	11 700
Hollanti/Lely	4	500 kW/Nedwind	2,0	1994	1	27	4 000
Tanska/Tunø Knob	10	500 kW/Vestas	5,0	1995	6	62	15 000
Hollanti/Dronten	19	600 kW/Nordtank	11,4	1996	0,3	113	
Ruotsi/Bockstigen	5	500 kW/WindWorld	2,5	1997	4	24	8 000

Merellä tuuli on selvästi tasaisempaa kuin mantereella, koska esteitä ei ole. Pienempi puuskaisuus saa aikaan sen, että myös väsymiskuormitus on pienempää, ja on todennäköistä, että tuulivoimalaitoksilla on merellä pitempi elinikä kuin maalla. Merituulivoimalaitoksen eliniälle voidaan todennäköisesti käyttää 20 vuoden sijaan 25 vuotta. Lisäksi perustukset voidaan suunnitella 50

vuoden käyttöä, jolloin on mahdollisuus hyödyntää samoja perustuksia kahdelle tuulivoimalaitokselle.

Tanskassa on merituulivoiman rakentamisen yhteydessä havaittu, että kauempana rannikosta laitosten tuotantoarviot ovat ylittyneet jopa 30 % (Madsen, 1996). Aiemmin arveltiin, että merialueille rakennettaessa laitosten keskinäistä etäisyyttä on kasvatettava, koska laminaarisempi tuuli aiheuttaa virtauskentän häiriöitä kauemmas roottorin taakse kuin mantereella. Kokemukset Tunø Knobin merituulipuistosta ovat osoittaneet, että voimaloiden keskinäinen varjostusvaikutus on arvioitua vähäisempi.

Sijoitettaessa merituulivoimalaitoksia usean kilometrin päähän rannikosta on mahdollista lisätä roottorin pyörimisnopeutta. Tämä aiheuttaa voimalan käyntiäänien lisääntymistä mutta kasvattaa tuotantoa. Tunø Knobin tapauksessa pyörimisnopeutta lisättiin 30:stä 33:een kierrokseen minuutissa, ja kokemusten mukaan pyörimisnopeutta on mahdollista tästä vielä lisätä.

Merituulivoimaloiden käyttökokemukset ovat osoittaneet, että luoksepääsyä tulisi vielä kehittää: esimerkiksi Tunø Knobin tuulivoimaloille ei pääse nousemaan, jos aallonkorkeus on yli metrin (Poulsen, 1997).

Merituulivoiman kustannukset ovat olleet selvästi suurempia kuin maalle rakennettavan tuulivoiman. Esimerkiksi Vindebyn tuotantokustannukset ovat noin 52 p/kWh ja Tunø Knobin 43 p/kWh (ilman demonstraatiovaiheeseen liittyviä kustannuksia 38 p/kWh). Viimeisimmässä toteutetussa projektissa Ruotsissa arvioitiin kustannusten olevan jo lähes 30 p/kWh. Kustannukset ovat lisäksi laskemassa, kun uudet megawattiluokan laitokset tulevat markkinoille ja perustustekniikat kehittyvät (kustannuksista tarkemmin luvussa 10).

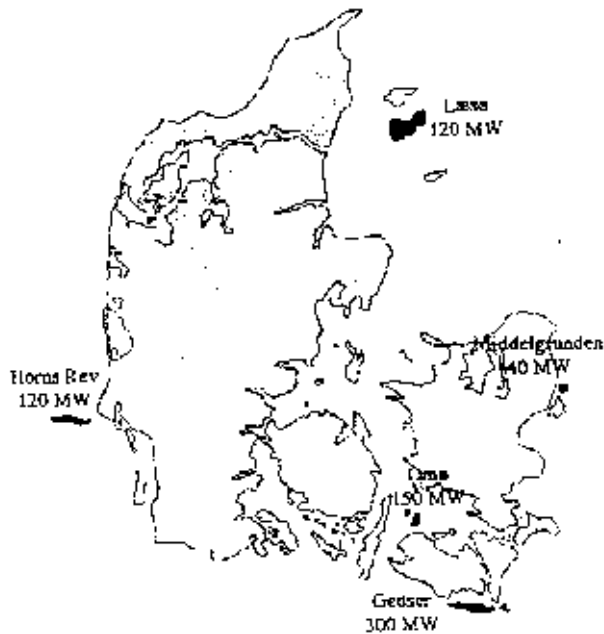
### **1.2.2 Laajojen tuulipuistojen rakentaminen**

Tanskassa, Hollannissa ja Ruotsissa on suunnitteilla 100–200 MW kokoisia tuulipuistohankkeita, joiden arvioitu tuotantokustannus on 30–40 p/kWh (maalle rakennetuissa hankkeissa 20–25 p/kWh).

Tanskassa voimakas panostus tuulivoiman rakentamiseen johtuu osaltaan hiilidioksidipäästöjen vähentämistarpeesta. Kesällä 1997 julkaistiin



suunnitelma, jossa kaavailaan 4 000 MW tuulivoiman rakentamista merelle vuoteen 2030 mennessä. Suunnitelman julkaisi komitea, jossa on mukana kahden suurimman voimayhtiön (ELSAM ja ELKRAFT) sekä Tanskan hallituksen edustajia. Tuulivoimalle etsittiin alueita, joissa ei ole muita merenkäytön intressejä (mm. kalastus, puolustusvoimat, luonnonsuojelu), jotka ovat 4–10 m syvyisiä ja 15–30 km etäisyydellä mantereeseen. Soveltuvia alueita löytyi noin 1 000 km<sup>2</sup> (8 000 MW).



*Kuva 1. Tanskan merituulivoimalaitokset Vindeby ja Tunø Knob sekä suunnitellut merituulipuistopaikat.*

Tuulivoimaa on Tanskassa tarkoitus rakentaa 120–150 MW puistoina, jotka sijoitetaan niin kauas rannikolta kuin on teknistaloudellisesti järkevää eli noin 15–30 km etäisyydelle. Suunnitelman ensimmäisessä vaiheessa on identifioitu kuusi aluetta, joille rakennetaan yhteensä yli 700 MW tuulivoimaa vuosina 2000–2006. Investointikustannusten odotetaan putoavan noin 25 %:lla Tanskan ensimmäisten merituulipuistojen tasosta, eli olevan 10–12 milj. DKK/MW.

Sähkön tuotantokustannuksiksi on arvioitu 0,35–0,38 DKK/kWh (noin 28–30 p/kWh).

Hollannissa on pitkän tähtäimen suunnitelmana 3 000 MW tuulivoimaa vuonna 2020. Tästä puolet eli 1 500 MW on suunniteltu toteutettavaksi merelle. Hollannissa on tehty vastaava kartoitus kuin Tanskassa potentiaalisista merituulivoiman alueista lähellä rannikkoa. Tällä hetkellä on vireillä ensimmäinen suuri merituulipuisto, 100 MW, sijoitettavaksi noin 8 km päähän rannikosta. Suunnitelman mukaan rakentaminen tapahtuu aikaisintaan vuonna 2001 (de Bruijne, 1997). Ensimmäisen suuren tuulipuiston tuotantokustannukset ylittävät 40 p/kWh. Jotta kaukana rannikosta sijaitsevan merituulipuiston tuotantokustannukset olisivat kohtuulliset, on puiston koon oltava 100–200 MW. Suuren tuulipuiston taloudellinen riski yhdistettynä kokemuksen puutteeseen saa aikaan sen, että on järkevämpää sijoittaa ensin lähemmäksi rantaa pienempi puisto, vaikka tuotantokustannukset olisivatkin suuremmat (Martin, 1998).

Ruotsissa on vireillä muutama merituulivoimahanke: Eurowind suunnittelee pääsevänsä ensimmäisenä maailmassa pystyttämään 1,5 MW laitoksia merelle, kun Tanskan ja Ruotsin väliseen salmeen nousee näillä näkymin 32 kpl saksalaisvalmisteisiä Enerconin laitoksia vuonna 1999, samassa yhteydessä Öresundin sillan rakentamisen kanssa. Renewable Energy Ab:llä on yhteensä 750 MW suunnitelmat samoille seuduille vuosituhaten vaihteessa (Wizelius, 1997).

### **1.3 Ympäristöolosuhteet Perämerellä**

Jäätyvillä merialueilla rakenteet ovat alttiina ankarille ympäristön rasituksille. Merivedessä ja myös paljon vedenpinnan yläpuolella on korrodoiva ympäristö, jota vielä auttaa alhaisessa veden lämpötilassa vallitseva korkea happipitoisuus. Vesirajan alueella tapahtuvissa toistuvissa jäätymis-sulamisjaksoissa huokoisten materiaalien, kuten betonin, mureneminen (eroosio) kiihtyy.

Liikkuvan jään aiheuttamat kuormat tulevat Perämerellä aaltokuormia merkittävämmiksi. Jää aiheuttaa sekä eroosiota että korkeita paikallisia painekuormia ja suuria kokonaiskuormia. Jääkuormat vaikuttavat sekä vaakasuoraan että pystysuoraan, kun rakenteeseen kiinnijäänyt jää murtuu veden pinnan korkeuden vaihteluiden seurauksena. Jää saattaa kasautua

rakennetta vasten tukkien normaalit kulkureitit. Lisäksi jääta voi muodostua rakenteen pintaan suoraan aiheuttaen rakenteen painon kasvua ja tuulivoimalaitoksen lapojen tapauksessa epätasapainoa ja hyötysuhteen heikentymistä.

Aaltokuormat ovat yksi merirakenteiden mitoituskriteeri. Perustettaessa tuulivoimalaitoksia matalaan veteen rannikon läheisyydessä ollaan aina tekemisissä matalan veden aaltojen kanssa huolimatta myrskyn nostattamasta keskivedenpinnasta. Pohjan muoto aiheuttaa kaikkialla aaltoliikkeen taittumista ja johtaa interferenssiin eri suunnista taittuneiden aaltojen kanssa esimerkiksi saaren tai matalikon edustalla. Ristiaallokossa aallon korkeus ja energia voivat olla huomattavasti suurempia kuin alkuperäisellä syvästä vedestä saapuneella aallolla.

Aallot aiheuttavat huuhtoutumiseroosiota, joka vielä korostuu rakenteen vieressä virtausnopeuden kiihtyessä. Tuulivoimaloiden perustuksissa on käytettävä eroosiosuojausmenetelmiä, joissa hieno maa-aines sidotaan päälle asetetuilla asteittain karkenevilla kivillä.

Tuulivoimalaitosten pystytysvaiheessa aaltojen vaikutus on otettava huomioon myös asennuksen kestoajan, käytetyn kaluston ja uittovakavuuden kannalta. Paikallisten aaltotilastojen perusteella voidaan arvioida, mihin vuodenaikaan asennukset ovat mahdollisia ja kuinka pitkiä asennuskelpoisia sääikkunoita esiintyy.

Vesisyvyys vaikuttaa usealla eri tavalla merirakenteen suunnitteluun. Perustus- ja asennustekniikat ovat erilaisia syvässä tai matalassa vedessä. Aaltomuoto ja kuormat muuttuvat riippuen aallonpituuden suhteesta vesisyvyyteen. Matalassa vedessä ei voi esiintyä liikkuvia ahtojäitä, mutta sen sijaan jään kasautuminen tapahtuu helpommin.

Rakenteiden suunnittelussa on huomioitava kaikkien ympäristötekijöiden vaikutukset. Rakennemateriaaleissa ja pintakäsittelyissä on kiinnitettävä huomio teräksen korroosion ja betonin huokosveden jäätyminen estoon sekä pohjan eroosioon. Kulkutiet tuulivoimalaitokseen on tehtävä siten, että sinne nousu on mahdollista sekä kohtuullisessa aallokossa että talvella jäiden aikaan. Perustusrakenteiden muotoilulla voidaan pienentää jääkuormia merkittävästi. Mitoituksen tulee ottaa huomioon sekä paikalliset korkeat jääpaineet että laajalta alalta kertyvät kokonaisjääkuormat niin staattisina kuin dynaamisina.

Aaltokuormien laskelmissa on huomioitava aaltojen taajuussisältö sekä aallon iskut rakenteeseen ja se, kuinka korkealle pärskeet nousevat. Aaltokuormat tulevat merkittäviksi erityisesti leveillä rakenteilla.

## 1.4 Ympäristövaikutusten huomioiminen

Tuulivoimalaitokset aiheuttavat ympäristövaikutuksia lähinnä rakennustöiden aikana. Käytön aikana vaikutuksia tulee käyntiäänestä ja visuaalisesta haitasta sekä pyörivän roottorin aiheuttamasta vaarasta linnuille.

Merituulivoiman rakentamisen aikana joudutaan yleensä tekemään ruoppauksia ja aiheutetaan muita häiriöitä asennuspaikalla. Ruoppauksen aiheuttama veden samentuminen on kestoaltaan lyhyt ja sen vaikutus on hetkellinen. Hyvin aroissa paikoissa samentumista voidaan vähentää käyttämällä selkeytysallasta ruoppaustuotteen väliavarastona. Koska ruoppaus joudutaan tekemään vain kerran, kun perustus ja tuulivoimalaitos pystytetään, on vaikutus huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi laivaväylien kohdalla, joissa ruoppauksia joudutaan tekemään säännöllisin väliajoin.

Kalojen ja meren eläinten elinrytmillä saattaa olla vaikutuksia sopivan pystytysajankohdan valintaan. Esimerkiksi kutu- tai pesintäaikana tulisi välttää merkittäviä toimenpiteitä.

Vaikutukset linnustolle on selvitettävä paikkakohtaisesti.

Tuulivoimalan perustuksien aiheuttamat pitkäaikaisvaikutukset ovat lähinnä merenpohjan elämää rikastuttavia, koska rakenteet tarjoavat kiintopisteen ja turvapaikan monille eliöille. Tuulivoimaloiden ympärille kehittyy oma ekologinen lokero, joka hyödyntää sen antamaa suojaa. Tuulivoimala ei itse tuota ravinteita tai muita jätteitä ympäristöön.

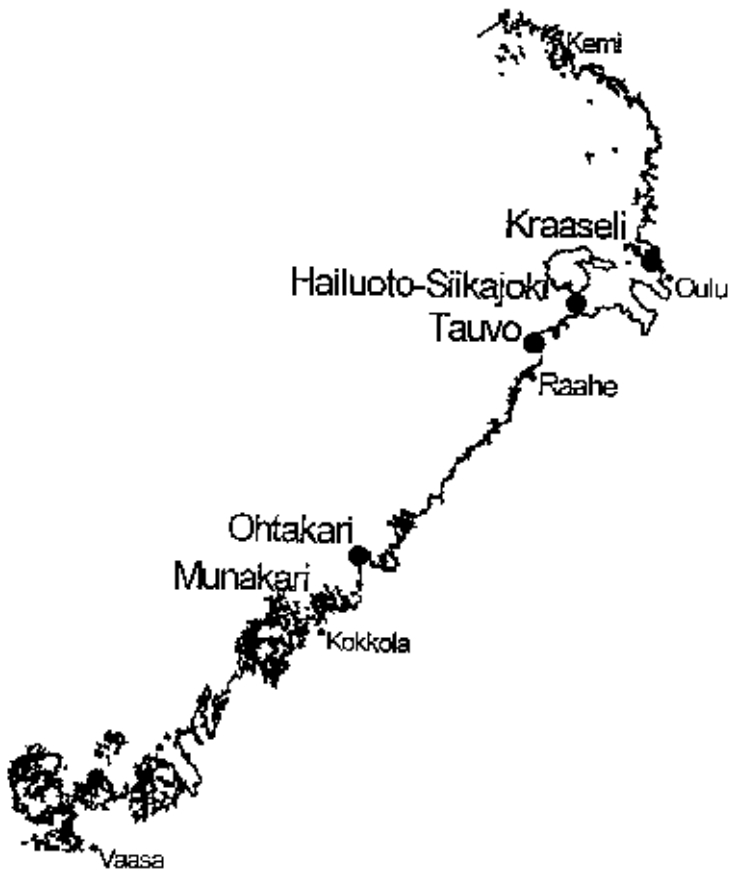
## 2. Perämeren jääolosuhteet

Nykyiset merituulivoimalat sijaitsevat kaikki käytännöllisesti katsoen avovesialueilla. Jäätä alueilla esiintyy harvoin ja esiintyessään se on niin ohutta, ettei se rakenteiden mitoituksen kannalta ole olennainen tekijä. Perämerellä meri jäätyy joka vuosi, joten jään aiheuttamat kuormat ovat alueelle mahdollisesti rakennettavien tuulivoimaloiden perustusten kannalta tärkeitä.

Koska perustuskustannukset ovat merituulivoimalan talouden kannalta olennaisia, tarkat jääolosuhdetiedot yhdessä oikeiden mitoituskriteereiden kanssa ovat merituulivoimaloiden perustamisen kannalta erittäin tärkeitä. Perämeren jääolosuhteiden kuvauksessa on jään paksuuden sekä ajallisen että paikallisen ulottuvuuden lisäksi keskitytty erityisesti jään liikkeisiin. Jään liikkuvuus on merituulivoimalan samoin kuin muidenkin kiinteiden merirakenteiden kannalta olennaisin jääkuormiin vaikuttava tekijä.

Kohdassa 2.1 kuvataan lyhyesti jäiden aiheuttamat kuormat; tarkempi kuormien käsittely on luvussa 4. Perämeren jääolojen kuvauksessa on keskitytty rantakaistalle Kokkolasta Ouluun, ja erityistarkastelun on saanut muutama esimerkkitapaus: Munakarin–Hällskärsuddenin alue Kokkolan edustalla, Ohtakarin alue Lohtajan edustalla, Siikajoella Tauvon alue sekä Hailuodon ja Siikajoen välinen alue ja Oulun edustalla Kellon Kraaselin alue (kuva 2).

Tässä raportissa kuvattu jääolosuhdetutkimus perustuu jääolosuhdetutkimuslentoihin keskitalven olosuhteissa ja jäiden lähdön aikaan vuonna 1997, tutustumis- ja jäämittausmatkaan maaliskuussa 1997 sekä Merentutkimuslaitoksen jäähavainnoitsijoiden haastatteluihin.



*Kuva 2. Karttakuva Perämeren alueesta ja esimerkkitaupaukset.*

## 2.1 Jääolosuhteet

Syntyvastaan johtuen merijää on vain harvoin homogeenista. Useimmiten se muodostuu erikokoisten palasten yhtenäytymisenä sekarakenteiseksi (Michel, 1978). Vain rannan läheisyydessä tuulen puhaltaessa rannalta päin tai tyynellä voi syntyä täysin tasainen ja yhtenäinen jääkenttä.

Tuulen ajaessa muodostunutta jäätä liikkeelle jää voi murtua esteitä vasten tai ajautua päällekkäin. Varsin yleistä on ahtojäävallien tai ahtojääkenttien muodostuminen. Ahtojäissä on tyypillisesti pinnan yläpuolella irtonaisista lohkeista ja lumesta muodostunut purjeosa sekä vedenalainen köli, joka on

noin kymmenkertainen verrattuna perusjään paksuuteen. Perämeren matalissa vesissä köli varsin usein pohjautuu. Jos pakkaskausi jatkuu ahtojäävallin muodostumisen jälkeen, lähellä vesirajaa oleva ahtojäävallin osa konsolidoituu eli irtonaiset lohkarit jäätyvät kiinni toisiinsa. Ahtojääkasoja muodostuu erityisesti karikoiden päälle. Toisinaan tuulet ajavat kiintojään rannalle korkeiksi valleiksi. Myös leveän rakenteen edustalle syntyy helposti jääkasaumia.

Talvella jää paksuuntuessaan ankkuroituu rannikon läheisyydessä karikoihin ja rantaan muodostaen kiintojäävyöhykkeen. Tällä alueella kovatkaan tuulet eivät saa jäätä enää liikkeelle myöhemmin talvella. Tyypillisesti kiintojää vakiintuu, kun jää on kasvanut yli 30 cm paksuuteen. Kiintojäävyöhykkeellä tapahtuu vain hidasta jään lämpölaajenemisesta johtuvaa liikettä, minkä aiheuttamat jääkuormat ovat paljon pienempiä kuin tuulen liikuttaman vastaavan jään voimat.

Keväällä lämpötilan kohotessa ja auringon säteilyn vaikutuksesta jää alkaa heiketä. Sulaminen alkaa matalikoista ja virtapaikoista. Rannikon edustalla oleva kiintojää voi lähteä silloin liikkeelle ja muodostaa kevään jääkasoja. Nämä eivät kuitenkaan konsolidoidu eivätkä liiku yhtenäisen jääkentän ajavan voiman puuttuessa ja sulavat sitten vähitellen paikoilleen.

Jäätä liikkeelle ajavana voimana on Suomen rannikoilla tärkein tuuli. Merivirrat ja Coriolis-efekti ovat merkityksettömiä. Sen sijaan myrskyn nostattama tulva-aalto edistää jään irtautumista kiinnikkeistään kareihin ja saariin helpottaen jään liikkeelle lähtöä. Tuulten ja ilmanpaineen vaihteluiden aiheuttamat merenpinnan korkeusvaihtelut aikaansaavat pystysuoria kuormia rakenteeseen, mikäli jää on ehtinyt jäätyä kiinni rakenteeseen. Vedenpinnan korkeusvaihtelut ovat kuitenkin niin hitaita, että niistä syntyy vain pieniä jääkuormia.

## 2.2 Jäätalven pituus

Perämeri jäätyy joka vuosi, ja jäätalven keskimääräinen pituus on 4–6 kuukautta (Leppäranta et al., 1988, s. 9–10). Jäätyminen alkaa pohjoisesta lähtien. Ensin jäätyvät matalat ja suojaiset lahdet ja rannikkovedet. Oulun ja Kemin edustalla rannikkovedet alkavat jäätyä marraskuun alussa. Merenkurkku jäätyy joulukuun aikana. Vaikka rannikkovedet ja Merenkurkku ovat jäässä, niin keskellä Perämerta on vielä avovettä. Koko Perämeren umpeenjäätyminen tapahtuu

yleensä tammikuun puoliväliin mennessä. Alkupalven jäänmuodostus on kuitenkin voimakkaasti sääolosuhteista riippuvainen, ja Perämerellä jäänmuodostuksen vaihteluväli syksyisin saattaa olla jopa kaksi kuukautta (Leppäranta et al., 1988, s. 9).

Jäät sulavat Perämereltä yleensä toukokuussa, Merenkurkusta toukokuun ensimmäisellä puoliskolla ja Oulun ja Kemien edustalta toukokuun jälkimmäisellä puoliskolla. Jäiden lähtö on niiden muodostumista huomattavasti nopeampaa. Yleensä jäät sulavat Perämerellä 2–3 viikossa (Palosuo et al., 1982, s. 7). Jäänlähdon ajankohta vaihtelee yleensä vähemmän kuin jäänmuodostusajankohta, ja Perämerellä jäiden lähtö vaihtelee vuosittain noin yhden kuukauden (Leppäranta et al., 1988, s. 9).

Kokkolan edustalla keskimääräinen jääpäivien lukumäärä vuodessa on 95 päivää, eli jäätalven pituus on hieman yli 3 kuukautta joulukuun loppupuolelta maaliskuun loppupuolelle. Ohtakarissa keskimääräinen jääpäivien lukumäärä vuodessa on 120 päivää, eli jäätalven pituus on lähes 4 kuukautta joulukuun puolivälistä huhtikuun puoliväliin. Siikajoen korkeudella jääpäiviä on yli 150, eli jäätalvi kestää toukokuun alkuun, ja Oulun edustalla lähes 180 eli jäätalven pituus on lähes 6 kuukautta marraskuun alkupuoliskolta toukokuun alkupuoliskolle (Seinä et al., 1996, s. 30, 68).

### **2.3 Tasaisen jään paksuus**

Jään maksimipaksuus yhden talven aikana Perämerellä Oulun edustalla on yleensä n. 70 cm. Kovina talvina maksimipaksuus yltää lähes 110 cm:iin (Leppäranta et al., 1988, s. 41) Hailuodon edustalla on mitattu jopa 122 cm (Lepistö, 1997). Merenkurkussa vastaavat luvut ovat n. 50 cm normaalina talvena ja n. 80 cm kovana talvena.

Kokkolan edustalla ja Ohtakarissa tasaisen jään maksimipaksuus keskimääräisen talven aikana on noin 50 cm. Suurin koskaan havaittu tasaisen jään paksuus on 90 cm, mitattuna Repskärin kohdalla. Tavossa tasaisen jään maksimipaksuus keskimääräisen talven aikana on noin 65 cm. Suurin koskaan havaittu tasaisen jään paksuus on 100 cm, tosin mitattuna Ulkopauhassa, noin 17 km Tavon niemestä lounaaseen. Siikajoen ja Hailuodon välisellä alueella tasaisen jään maksimipaksuus keskimääräisen talven aikana on noin 70 ja suurin



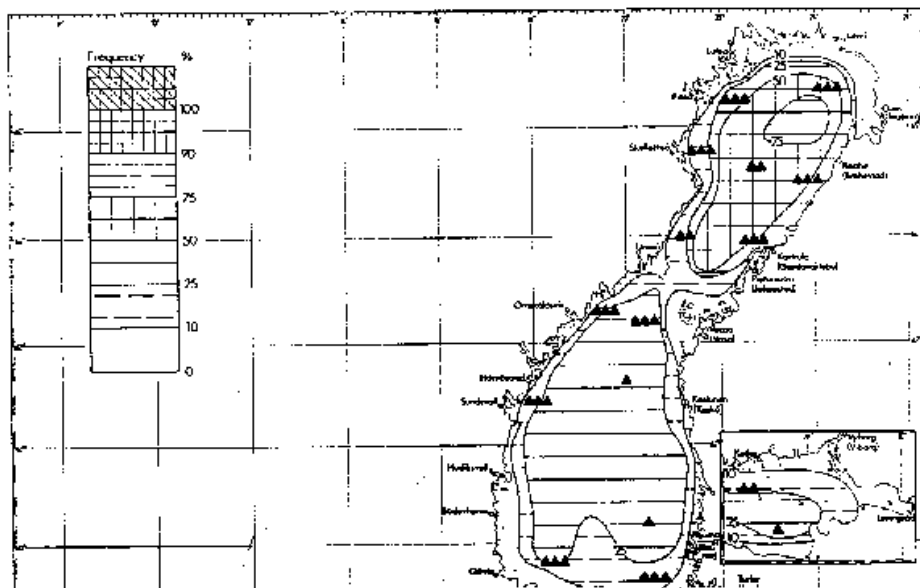


vedenpinnan nousu alle vuorokaudessa on täysin mahdollista (Pinola, 1997 ja Mäkinen & Kronqvist, 1997), mikä kykenee irrottamaan jään luotojen, saarten ja mantereen rannasta. Mikäli mantereen edustalla ei ole saaristoa, kuten on asianlaita Perämerellä esim. Kokkolan ja Hailuodon välisellä alueella, niin jää saattaa ajelehtia avomerelle suurina lauttoina aivan rannasta lähtien. Tuulen kääntyessä lännen puoleiseksi jää palaa avomereltä ja törmää rannikon edustalla merirakenteisiin. Jään liikemäärä on varmasti riittävä murtamaan jään merirakenteita vasten, joihin saattaa kohdistua huomattavia jääkuormia. Jään liike alkutalvesta tapahtuu yleensä tasaisen jään lauttoina.

20–30 cm paksun jään liikkuminen edellä kuvatulla tavalla on yleistä (Mäkinen & Kronqvist, 1997), mutta jopa 50 cm paksun jään on havaittu liikkuvan suurina lauttoina Marjaniemen edustalla (Lepistö, 1997). Kerran 30 vuodessa tavattavan liikkuvan jään maksimipaksuus on 37 cm Kokkolan edustalla, 35–39 cm Siikajoen edustalla, ja 26 cm Oulun edustalla (Palosuo et al. 1982, s. A1).

Alkutalven jälkeen Perämeren jääpeite stabiloituu rannoilla. Jään paksuus kasvaa niin, ettei mahdollinen vedenpinnan nousukaan enää kykene irrottamaan jäätä rannoista. Jään liikettä keskemällä Perämerta tapahtuu kuitenkin koko talven ajan. Vaikka koko Perämeri onkin jo jäässä, niin tuulten vaikutuksesta jää kuitenkin liikkuu. Keskelle merta syntyy railoja ja avovesialueita ja jää ahtautuu rannikoita vasten. Tällöin syntyy ahtojäätä, jonka runsas esiintyminen on Perämerelle tyypillistä.

Kuvassa 4 on esitetty jään ahtautumisaste ja ahtojään esiintymistodennäköisyys Perämerellä (SMHI & Merentutkimuslaitos, 1982, s. 210). Kolme kolmiota, jotka kuvaavat suurinta mahdollista ahtautumisastetta, osoittavat, että koko Perämeren rannikko lähtien Kokkolasta ja kiertäen Perämeren pohjukan kautta aina Ruotsin Skellefteåhon asti on voimakkaasti vallintuvaa aluetta. Kulloinkin vallitsevista tuulen suunnista riippuen valjeja esiintyy runsaammin joko Suomen tai Ruotsin rannikolla. Liikkuvan jään todennäköisyyskäyrissä on lisäksi huomattavaa, että Kokkolan ja Hailuodon välillä liikkuva jää ulottuu aivan rantaviivaan asti noin 25 %:n todennäköisyydellä (ei kuitenkaan paksu jää).



Kuva 4. Ahtojään määrä tyypillisesti maaliskuussa Perämerellä (SMHI & Merentutkimuslaitos, 1982, s. 210).

Vaikka liikkuva jää kuvassa 4 ulottuukin aivan rantaan asti Kokkolan ja Hailuodon välillä, niin ahtojäävallit eivät kuitenkaan pääse ajelehtimaan aivan rantaviivaan saakka. Mikäli saaria tai luotoja ei ole estämässä vallien rantautumista, niin vallit kuitenkin pohjautuvat matalaan veteen ennen rantaviivaa. Tämä oli selvästi nähtävissä tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyillä tutkimuslennoilla. Kuvassa 5 on esitetty valokuva helmikuun 1:sen päivän tutkimuslennolta Ohtakarín ja Tauvon väliltä. Kuva esittää tyypillistä tilannetta, jossa jää lahdissa ja lähellä rantaviivaa on pysynyt suhteellisen hyvin kiinteänä tasojäänä, vaikka lentoa edeltänyt kova luoteismyrsky oli pakannut Perämeren jäät Suomen rannikolle. Kuvassa on lisäksi selvästi nähtävissä vallivyö, joka todennäköisesti on pohjautunut ja kulkee rantaviivan suuntaisesti muutaman sadan metrin etäisyydellä uloimpien niemenkärkien ulkopuolitse. Ilmeisesti vallivyö seuraa tiettyä vedensyvyyskäyrää. Merikortin perusteella arvioituna syvyyskäyrä voisi olla 5 metrin käyrä. Vallilla, jonka kólin (vedenalaisen osan) syvyys on 5 metriä, tulisi olla 0,5–1,5 metriä korkea purje (vedenpinnan yläpuolinen osa). Kuvassa 5 vallien purjeen korkeudet näyttäisivät

olevan 1–2 m. Tämän kokoiset vallit ovat tyypillisiä, keskikokoisia Itämeren valleja (Leppäranta & Hakala, 1989, s. 173).



*Kuva 5. Todennäköisesti pohjautunut vallivyö rannikon edustalla Ohtakarín ja Tauvon välillä. Kuva otettu 1.2.1997.*

## 2.5 Jääolojen yleiskuvaus

Perämeren jäät ovat tyypillisesti erittäin liikkuvia koko talven ajan. Tasaista kiintojäätä tavataan tässä tutkimuksessa kartoitetulla alueella vain sisäsaaristossa lähellä Kokkolaa ja Oulua. Suurin osa tutkitusta rannikkoalueesta, eli alue Kokkolan saaristosta Hailuotoon, on avointa ilman saaristoa rannikon edustalla. Tämä aiheuttaa sen, että jäät kyseisellä alueella ovat erittäin liikkuvia aivan rantaviivaan asti. Erityisesti syksyisin jopa 40 cm paksu jää saattaa irrota rannasta ja liikkua suurina tasaisen jään lauttoina. Jään liikkeiden seurauksena syntyy päällekkäin ajautuneita liikkuvia lauttoja, joiden paksuus saattaa olla jopa 80 cm. Jäiden liikkeet johtavat myös jääkentän voimakkaaseen vallitumiseen. Vallit liikkuvat muun jääkentän mukana lähes rantaviivaan saakka alueella, jolla ei ole saaristoa. Yleisenä piirteenä vallien rantautumisesta todettiin, että ne pohjautuvat yleensä rannikon edustalla vedensyvyyskäyrälle, jonka syvyydeksi

arvioitiin noin 5 m. Tutkitulla rannikkokaistalla 5 m:n syvyyskäyrä kulkee yleensä parin sadan metrin–parin kilometrin etäisyydellä rannikon niemenkärjistä. Jään kiinnijäätyminen rakenteeseen voi aiheuttaa lisäkuormia jään lähtiessä liikkeelle sekä pystysuuntaisia kuormia vedenpinnan kohotessa.

## 2.6 Jääolosuhdearviot esimerkkipaikoille

Suunnitellulle rakennuspaikalle tulee aina tehdä jääolosuhdearvio erikseen ja samoin tulee haastatella alueen jääoloja seuranneita asiantuntijoita. Seuraavassa esimerkit viidelle paikalle:

1. Kokkolan edustalla jää on tasaista kiintojäätä suurimman osan talvea. Alkutilvesta on havaittu 15–20 cm paksun tasaisen jään liikkuvan lauttoina. Lähimmät vallit pysähtyvät uloimpien saarien, Trullögrundin ja Poroluodon, linjalle.

2. Ohtakaran edustalla jää on erittäin liikkuvaa koko talven. Sen seurauksena alueella esiintyy sekä paksua ‘tasaista’ jäätä, joka koostuu päällekkäin ajautuneista lauttoista, että valleja. On mahdollista, että köliltään lähes 5 m:n syvyinen valli voisi alueella ajautua käytännöllisesti katsoen aivan rantaviivaan asti. Kiintojäätä alueella tavataan yleensä vain Vattajan niemen itäpuolella. Vielä Vattajan niemen pohjoisrantaan, kohtaan josta Ohtakaran pengertie lähtee, on havaittu kertyvän jäärykkiöitä, joiden korkeus on ollut useita metrejä.

3. Tauvon edustalla jää on alkutilvesta liikkuvaa. Etelämyrskyllä vedenpinnan kohoamisen myötä jää irtoaa rannoilta ja saattaa liikkua jopa koko Yrjänänlahden kokoisena lauttona (Pinola, 1997). Myöhemmin talvella jää stabiloituu rannikon tuntumassa siten, että Tauvon niemen kohdalle jää noin 2–4 km leveä suhteellisen kiinteän oloinen tasaisen jään kaista. Tämän kaistan ulkoreunaan pohjautunevat suuremmat ahtojäävallit, joiden ulkopuolella alkaa voimakkaasti vallitunut jääkenttä, joka säistä riippuen liikkuu koko talven ajan.

4. Siikajoen ja Hailuodon välisellä alueella jää on alkutilvesta liikkuvaa. Etelämyrskyllä vedenpinnan kohoamisen myötä jää irtoaa rannoilta ja liikkuu tasaisen jään lauttoina. Hailuodon Rautaleton rantaan syntyy jäärykkiöitä (Lepistö, 1997). Isomatala ja sen eteläpuolinen karikko näyttäisivät muodostavan koillispuolelleen suojaosan alueen, jossa jää ei liikkuisi, mutta toukokuussa 1995 tälläkin alueella on havaittu jäärykkiöitä (Lepistö, 1997).

Ahtojäävalleja ei ole tavattu Hailuodon ja Siikajoen Varessäikän välisessä salmessa. Jää alueella on suurimmaksi osaksi tasaista kiintojäättä, joka ei välttämättä liiku joka talvi, mutta useina vuosina on jään liikettä havaittu Hailuodon ja Siikajoen välisessä salmessa, joten jään liikkeeseen on varauduttava.

5. Oulun edustalta löytyy matalikoita, joissa jää on tasaista kiintojäättä. Syksyllä jää syntyy paikalla ja kasvaa yleensä pohjaan saakka pysyen näin paikallaan koko talven. Keväällä jää sulaa paikallaan (Rautavuoma, 1997). Vedensyvyys esim. Kellon Kraaselin alueella on paikoitellen vain parikymmentä senttimetriä.

## **2.7 Jään lujuusarvot ja mitoitusolosuhteet Perämerellä**

Jään lujuusarvot riippuvat monista tekijöistä: lämpötilasta, suolapitoisuudesta, jään kidekoosta ja kuormitusnopeudesta. Tässä kohdassa tarkastellaan jään lujuusarvoja ja mitoitus tapauksia Perämerellä tuulipuistojen suunnitelluissa sijoituspaikoissa.

Taulukkoon 2 on kerätty oleelliset tuulivoimalaitosten perustusten jäävoimamitoituksen tarvitsemat jään lujuusarvot. Kiinteän merirakenteen, kuten merituulivoimalan, tapauksessa relevantteja jään lujuusominaisuuksia ovat vaakasuuntainen puristuslujuus ja kartiomaisen rakenteen tapauksessa taivutuslujuus. Jään kimmokertoimella on yleensä vähemmän merkitystä, mutta se vaikuttaa kuitenkin mm. jääkentän karakteristiseen pituuteen, joka puolestaan on vaikuttava tekijä esim. jääkentän lommahdustarkasteluissa. Taulukossa 2 ilmoitetaan lisäksi paikallinen pintapaine, leikkaus- ja adheesiolujuudet ja kitka. Max tarkoittaa suurinta käytännössä esiintyvää arvoa alkutalven kylmällä jäällä ja kuormitusnopeudella, joka vastaa sitkeän ja hauraan jään murtumisen muutosaluetta. Min on vastaavasti jo lämmenneen ja heikentyneen kevätjään lujuusarvo. Max edustaa siten sitä tilannetta, jossa jään liikenopeus johtaa suurimpaan mahdolliseen jäävoimaan.

VTT Valmistustekniikan Laiva- ja konetekniikan lujuusmittausten perusteella Perämeren lähes suolattomalle jäälle tyypillisiä vaakasuuntaisia puristuslujuuden arvoja ovat 2,0–4,5 MPa sydäntalvella. Keväällä, kun ilman ja siten myös jään lämpötilat kohoavat, jään lujuus heikkenee. Loppukeväästä

lähes sulamispisteessä olevan jään horisontaalinen puristuslujuus voi olla vain 0,3 MPa. Edellä mainitut lujuusarvot on mitattu läpimitaltaan n. 10 cm:n koekappaleilla. Jään lujuusominaisuuksissa on havaittu mittakaavatekijä: pienillä koekappaleilla mitatut lujuusarvot ovat huomattavasti suurempia kuin suurilla (Sanderson, 1986, s. 364–365). Esimerkiksi 0,2 x 0,2 m<sup>2</sup> alueelle voi keskimääräinen puristuslujuus nousta arvoon 10 MPa mutta 1,0 x 1,0 m<sup>2</sup> alueelle vain 2 MPa tasolle. Pitkäaikainen kokemus Perämeren reunamerkeistä on osoittanut, että suurin käytännössä esiintyvä puristuslujuus on alle 2,5 MPa. Mitoituksessa kerrostuneen paksun jään lujuutena voi käyttää pienempiä lujuuden arvoja kuin alkuperäistä yhtenäistä jäätä koskevia.

*Taulukko 2. Jään mitoituslujuusarvot (Max) ja mitoitusjääolosuhteet Perämerellä.*

		Max	Min	
Paikallinen pintapaine	$\sigma_p$	10		MPa
Puristuslujuus	$\sigma_c$	2,5	1,2	MPa
Taivutuslujuus	$\sigma_b$	0,7	0,3	MPa
Leikkauslujuus	$\tau$	0,6	0,2	MPa
Adheesiolujuus	$\tau_a$	0,4	0,1	MPa
Kimmokerroin	E	6,0	3,0	GPa
Kitka	$\mu$	0,3	0,05	-
Liikkuvan kiintojään paksuus		40		cm
Liikkuvan kerrostuneen jään paksuus		60		cm
Ahtojään kolin syvyys		5		m
Maksimi veden korkeus		+1,2		m
Minimi veden korkeus		-0,5		m

Jäällä puristuslujuus on selvästi vetolujuutta suurempi. Teoreettisesti taivutuslujuus on yhtä suuri kuin vetolujuus. Taivutuslujuus riippuu siitä, murretaanko jää ylös- vai alaspäin. Tämä johtuu jään lämpötilaprofiilista paksuussuunnassa ja kidekoon muutoksista, jotka vaikuttavat jään lujuusarvoihin. Myös kuormitusnopeudella on suuri merkitys. Taivutuslujuuden tyypillisiä arvoja Perämeren jäälle ovat 0,35–0,70 MPa sydäntalvella ja 0,25–0,35 MPa keväällä.

Jään leikkauslujuutta on mitattu huomattavasti vähemmän kuin puristus- tai taivutuslujuutta. Syynä on se, että puhdasta leikkausjännitystilaa on vaikea toteuttaa, koska testitilanteessa on helposti mukana muita jännityskomponentteja. Laboratoriomittakaavassa on mitattu yli 1 MPa leikkauslujuuden arvoja. Luonnon täydessä mittakaavassa taas on päädytty noin 0,6 MPa maksimiarvoihin. Vähäisestä datan määrästä johtuen mitoituksessa on otettava leikkauskuormitustilanteisiin suurempi varmuuskerroin.

Myös rakenteeseen kiinnijäätyminen eli adheesiolujuus on leikkauslujuutta, nyt vain jään ja rakenteen välillä. Vallitsevan lämpötilan tai jään suolapitoisuuden lasku sekä kuormitusnopeuden kohoaminen kasvattavat adheesiolujuutta. Adheesiolujuutta on mitattu vain pienikokoisilla testikappaleilla. Saadut arvot ovat esimerkiksi teräksellä 0,1–1,0 ja betonilla 0,4 ja 0,8 MPa välillä (Oksanen, 1982). Polyeteeni- tai teflonpinnoitteella adheesiolujuus laskee alle 0,3 MPa tason. Em. arvot on saatu suurilla, adheesiolujuuden maksimin antavilla kuormitusnopeuksilla. Jään lähtiessä liikkeelle vaakasuunnassa tai vedenkorkeuden muuttuessa kuormitusnopeudet ovat kuitenkin hyvin alhaisia. Sen takia on taulukossa 2 päädytty adheesiolujuuden mitoitusravoon 0,4 MPa.

Jään kimmokerroimen dimensio on sama kuin lujuuden, mutta se ei ole lujuusarvo vaan ilmaisee materiaalin sisäistä jäykkyyttä. Jääkuormiin kimmokerroin vaikuttaa jään murtuessa taivutuksella rakennetta vasten sekä siihen voimatasoon, mikä tarvitaan jääkentän lommahduksessa. Mitä suurempi kimmokerroin, sitä suuremmat jääkuormat syntyvät. Täysin ehyen monikiteisen jään kimmokerroin on noin 9 GPa. Se ei riipu merkittävästi lämpötilasta. Sen sijaan jäässä olevat huokokset, railot ja muut epäjatkuvuudet pienentävät tehollisen kimmokerroimen luonnon mittakaavassa käytännössä noin 2–8 GPa tasolle. Edustavana arvona voidaan pitää 6 GPa:ia. Jään lämpötilan kohotessa ja esim. sen taivutuslujuuden laskiessa keväällä myös kimmokerroimen on havaittu hieman laskevan. Kimmokerroimen mittaustuloksissa on kuitenkin yleensä niin paljon hajontaa, ettei sen laskusta keväällä ole saatu täysin luotettavaa kuvaa. Siksi 6 GPa:ia ehdotetaan käytettäväksi jään kimmokerroimenä koko talven.

Karhea pinta ja alhainen lämpötila kasvattavat kitkakerrointa. Pintapaineen ja nopeuden vaikutukset voivat johtaa joko kitkakertoimen nousuun tai pienenemiseen tilanteesta riippuen. Tyypillisesti jään ja karkean teräspinnan



välinen staattinen kitkakerroin  $\mu$  on alle 0,30 ja betonin vastaavasti 0,50. Liikekitkat jäävät alle 0,10 tason.

Vedenpinnan korkeusvaihtelut Perämerellä ovat pääsääntöisesti tuulen aiheuttamia. Vuorovedellä tai ilmanpaineen vaikutuksilla on vain vähäinen merkitys. Suurin vedenpinnan nousu syntyy, kun myrskytuuli etenee lounaasta likimain samalla nopeudella kuin tulva-aalto etenee. Ajoksessa on mitattu yli 2 m tulva-aaltoja. Pohjois- tai koillistuulten puhaltaessa veden pinnan lasku on vähäisempää, alle metri. Talvella jääkannen välittäessä tuulen voimia karikoihin ja rantoihin jäävät vedenpinnan vaihtelut vähäisemmiksi; ohjearvona voi käyttää +1,2 ja -0,5 m:ä.

Nyt selvitystyön kohteena olevalla Kokkolan ja Oulun välisellä Perämeren rannikkoalueella on tuulipuistoja suunniteltu rannan läheisyydessä olevalle kiintojäävyöhykkeelle. Vesisyvyys alueella on matalaa, mikä estää suurten ahtojäävallien liikkeen mutta mahdollistaa jään kasautumisen karikoille ja myös rakenteiden edustalle.

Esimerkiksi Kokkolan edustan sijoituspaikalle jääkuormat voi mitoittaa taulukon 2 perusteella. Jääolosuhteiltaan vaativampiin paikkoihin (kuten esim. Ohtakarille) suositellaan valittavaksi vaativampi seuraavista:

1) Rakennetta vasten murtuva 80 cm paksu tasainen jää, joka koostuu kahdesta 40 cm:n kerroksesta. Oletetun kaltainen jään liike on todennäköinen alkutalvesta, jolloin jään lujuus on suuri, mutta koska jääkenttä koostuu kahdesta päällekkäin ajautuneesta kerroksesta, sen horisontaaliselle puristuslujuudelle ehdotetaan laskelmissa käytettäväksi arvoa 1,8 MPa ja taivutuslujuudelle arvoa 0,53 MPa. Jään kimmokertoimelle ehdotetaan käytettäväksi arvoa 6 GPa.

2) Rakenteeseen törmäävä jäävalli, jonka köli on 5 m:n syvyinen ja purje 1,7 m:n korkuinen. Konsolidoituneen eli vallin sisäisen yhteenjäätäneen kerroksen paksuudeksi ehdotetaan 1,0 m:ä (Leppäranta & Hakala 1989, s. 171).

Tässä tapauksessa voimalan suojaaminen sopivalla jäidenhallintatekniikalla tulisi tutkia. Jään kiinnijäätyminen rakenteeseen jään lähtiessä liikkeelle on huomioitava. Vedenpinnan kohotessa jään kiinnijäätyminen rakenteeseen aiheuttaa pystysuuntaisia kuormia.

### **3. Merituulivoiman potentiaaliset sijoituskohteet Perämerellä**

Tässä luvussa esitetään alustava potentiaaliarvio merituulivoiman rakentamiseen soveltuvista alueista Perämerellä. Rajaavina kriteereinä on käytetty tuulen keskinopeutta, veden syvyyttä ja liikkuvien jäiden paksuutta. Muita rakentamisedellytyksiä ja -rajoituksia ei ole tarkasteltu. Alueiden käyttörajoitukset vaikuttavat potentiaalia huomattavasti rajoittavana.

Offshore-tuulivoimaloissa käytetään 20 kV muuntamoita tuulivoimalaitosyksiköissä, jolloin on mahdollisuus joko vetää 20 kV linja tuulipuistoista rannikon 110 kV linjaan, tai laajojen tuulipuistojen tapauksessa rakentaa 20/110 kV muuntamo merelle ja vetää 110 kV linja rannikolle. Koska 110 kV sähköverkko kulkee Perämeren alueella Siikajoen–Hailuodon aluetta lukuun ottamatta muutaman kilometrin päässä rantaviivasta, ei tässä tarkastella sähköverkon aiheuttamia rajoituksia potentiaalisille tuulipuistoille.

#### **3.1 Tuulisuusanalyysi**

Työssä analysoitiin tuulen keskituulennopeus Perämeren merialueilla WASP-ohjelmaan ja Suomen Tuuliatlakseen perustuen (Tammelin, 1991). Tuuliatlastiedostoina käytettiin

- Kemi Ajosta Tornioista Haukiputaalle ulottuvalla alueella
- Hailuoto Marjaniemeä Hailuodossa, Oulun seudulla sekä Siikajoella
- Ulkokallaa Pattijoelta Kokkolaan ulottuvalla alueella
- Valassaaria Luodosta Vaasaan ulottuvalla alueella.

Maastonkuvauksena käytettiin WASP-ohjelmalle digitoituja karttoja. Kartoitettava alue rajautui etelässä Vaasan keskustaan ja pohjoisessa Tornioon.

Alueelliset tuulikartat laadittiin 1 km hilavälillä karttalehdille, joiden koko on noin 30 x 50 km. Keskituulennopeus laskettiin 50 m korkeudella maan- tai

merenpinnasta. Tuulikartoissa alin esitetty tuulennopeus on 6 m/s ja vyöhykkeiden jakoväli 0,5 m/s.

### 3.2 Syvyysaineisto

Syvyysaineisto hankittiin Maanmittaushallituksen 1 : 50 000 Karttatietokannasta. Niiltä alueilta, joilta numeerista syvyysaineistoa ei saatu, digitoitiin 6 m ja 10 m syvyyskäyrät Merenkulkuhallituksen 1 : 50 000 merikartoista. Hailuodon pohjoispuoleisesta alueesta ei numeerista syvyysaineistoa ollut saatavana. Alueen laajuuden vuoksi ei tältä alueelta tehty manuaalista digitointia. Lisäksi Kalajoella oli yksi pieni alue, josta numeerista syvyysaineistoa ei ollut saatavissa lainkaan. Koska aineistoa ei ollut myöskään painettuina karttalehtinä, ei tätäkään aluetta voitu digitoida manuaalisesti.

3 m numeerinen syvyyskäyrä puuttui seuraavilta alueilta: Kalajoki–Pyhäjoki, Kälviä–Lohtaja, Uusikaarlepyy–Raippaluoto.

3 m, 6 m ja 10 m käyrien lisäksi numeerinen aineisto sisälsi vaihtelevasti myös 5 m käyriä (kattavuus heikko) sekä 15, 20, 25 ja 40 m käyriä.

Aineisto mallinnettiin jatkuvaksi pinnaksi 100 m ruudulla, jolloin puuttuvat syvyyskäyräviivat saatiin täydennettyä ja veden syvyyttä voitiin tarkastella (lineaarisenä interpolaationa) 0–10 m:n syvyyksissä. Tarkasteluun otettiin pintamallin syvyysvyöhykkeet a) 0–3 m, b) 3–6 m, c) 6–10 m.

### 3.3 Jääolojen tuomat rajoitukset

Koska meripotentiaalia määritellään suurille, megawattikokoluokan laitoksille, eivät alle 40 cm paksut liikkuvat jäälautat muodosta suhteettoman suuria kuormia rakenteille. Mikäli on tarkoitus rakentaa 600 kW kokoluokan laitoksia, tulisi alkutalven liikkuvista jäälautoista syntyvää vallivyötä välttää noin 5 m syvyydelle asti.

Jääolot on otettu huomioon rajaamalla yli 40 cm paksun liikkuvan jään alueet pois alueelta. Tämä on tehty digitoimalla enintään 40 cm paksuisen liikkuvan

jään raja merentutkimuslaitoksen kartoista (Palosuo et al., 1982). Tämän on katsottu rajaavan pois ahtojäävallit.

### 3.4 Potentiaalisten alueiden määrittäminen

Liitteessä 1 on esitetty syvyyskartat, joista ilmenevät lisäksi keskituulennopeuden isolinjat 0,5 m/s välein sekä liikkuvien jäiden tuoma rajaava linja. Kunkin karttalehden dimensiot ovat noin 30 x 50 km ja mittakaava noin 1 : 200 000.

Paikkatieto-ohjelmalla ArcView määritettiin aineistosta ne vesialueet, joilla veden syvyys on 0–10 m ja keskituulennopeus 50 m korkeudella vähintään 6 m/s ja joilla liikkuvien jäiden maksimipaksuus on 40 cm. Alueiden pinta-alat on laskettu tuulennopeus- ja syvyysluokittain.

Lähes kaikilla tarkastelluilla merialueilla tuulen keskinopeus ylittää 6 m/s 50 m korkeudella. Alueet, joilla keskituulennopeus jää em. rajan alle, ovat lähinnä kapeita lahtia ja salmia, rikkonaisia sisäsaaristoalueita sekä ei-vallitseviin tuulensuuntiin avautuvien lahtien pohjukkoita. Alle 3 m syvyisistä vesialueista 72 % ylittää 6 m/s keskituulennopeusrajan, alle 6 m syvyisistä vesialueista 81 % ja alle 10 m syvyisistä vesialueista 93 %.

Alle 3 m syvyisiä vesialueita oli yhteensä 1 000 km<sup>2</sup>, alle 6 m syvyisiä vesialueita 2 130 km<sup>2</sup> ja alle 10 m syvyisiä vesialueita 3 840 km<sup>2</sup>. Eniten matalia vesialueita on Oulun ja Hailuodon ympäristössä ja vähiten Raahen ja Kalajoen välisellä rannikolla. Kokkolasta Vaasaan ulottuvalla rikkonaisella rannikolla matalia vesialueita on niin ikään suhteellisen vähän ja ne ovat usein epäyhtenäisiä ja syvyysuhteiltaan voimakkaasti vaihtelevia. Liikkuvien jäiden tuoma rajoitus vähentää pinta-aloja 480 km<sup>2</sup> (joista 15 km<sup>2</sup> alle 3 m syvyisiä ja 110 km<sup>2</sup> alle 6 m syvyisiä alueita).

## 3.5 Rakennus- ja tuotantopotentiaalit

### 3.5.1 Tuulivoimaloiden keskinäinen varjostusvaikutus

Sijoitettaessa tuulivoimalaitoksia ryhmiin osa laitoksista joutuu toisten laitosten varjoon riippuen tuulen suunnasta. Yleensä tuulivoimalaitokset sijoitetaan siten, että varjostusvaikutus vähentää tuotantoa enintään 5 %. Tämä saavutetaan sijoittamalla laitokset 3–5 kertaa roottorin halkaisijan päähän toisistaan. 1,5 MW voimalaitoksen halkaisija on noin 60 m, eli laitosten väliseksi etäisyydeksi tulee 180–300 m. Vallitsevan tuulensuunnan puolelta saattaa olla tarpeellista kasvattaa laitosten välimatkaa arvoon 5–9 kertaa roottorin halkaisija (300–540 m).

Varjostusvaikutuksen aiheuttamaa tuotannonmenetystä Perämerellä on arvioitu PARK-mallilla esimerkkitapauksena Kokkolan Hällskärin rannikko. Kun käytetään 300 m väliä laitoksille (noin 5 kertaa laitoksen halkaisija), saadaan tuotantohäviöksi noin 5 % keskimääräisestä vuosituotannosta. Tällöin 1 km<sup>2</sup> alueelle mahtuu 15 MW tuulivoimaa (1,5 MW laitoksia noin 300 m välein). Sijoitettaessa suuria määriä (yli 50 laitosta) varjostusvaikutuksen aiheuttama tuotantohäviö kasvaa 8 %:iin. Tässä tapauksessa on syytä kasvattaa laitosten välistä etäisyyttä vallitsevan tuulensuunnan puolelta (etelä-pohjoinen tai lounas-koillinen suunnassa) 500 m:iin, jolloin häviöt saadaan pysymään 5 % sisällä. Tällöin 1 km<sup>2</sup> alueelle mahtuu 9 MW tuulivoimaa. Koska tässä selvityksessä täytetään suuria alueita tuulivoimalaitoksilla, on käytetty arvoa 9 MW/km<sup>2</sup>. Mikäli kuitenkin on kyseessä pienempi tuulipuisto (alle 50 laitosta) tai vain rajallinen alue, on todennäköisesti kannattavaa sijoittaa laitokset tiheämmin.

### 3.5.2 Tuotantoarvio

Tyypillisen 1,5 MW tuulivoimalaitoksen (napakorkeus 60 m) huipunkäyttöaika keskituulennopeuden funktiona arvioitiin laskemalla WAsP-ohjelmalla laitoksen tuotanto 6, 6,5, 7, 7,5 ja 8 m/s keskituulennopeuskäyrillä Oulun–Oulunsalon–Hailuodon seudulla. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tyypillisen 1,5 MW tuulivoimalaitoksen tuotanto eri tuulisuusluokissa.

Tuulisuusluokka	Keskituulennopeus 50 m korkeudella	Keskim. huipunkäyttöaika	5 % varjostushäviö huomioituna
A	yli 7,5 m/s	3 000 h/a	2 850 h/a
B	7–7,5 m/s	2 670 h/a	2 537 h/a
C	6,5–7 m/s	2 330 h/a	2 214 h/a
D	6–6,5 m/s	2 000 h/a	1 900 h/a

### 3.5.3 Tekniset rakennus- ja tuotantopotentialit

Seuraavissa taulukoissa 4–6 on esitetty analyysikartoista lasketut Perämeren matalien vesialueiden pinta-alat sekä merituulivoiman rakennus- ja tuotantopotentialit eri syvyys- ja tuulennopeusvyöhykkeillä. Rakennuspotentialissa pinta-alat on täytetty tuulivoimalla 9 MW/km<sup>2</sup>. Tuotantopotentialit on laskettu taulukon 3 huipunkäyttöajoilla, jotka ottavat huomioon 5 % varjostusvaikutuksen ja 95 % teknisen käytettävyyden.

Taulukko 4. Perämeren matalien vesialueiden pinta-alat (km<sup>2</sup>) Perämerellä.

Alueiden pinta-alat	Veden syvyys m	0–3 m	3–6 m	0–6 m	6–10 m	0–10 m	3–10 m
	Syvyysluokka	1	2	1+2	3	1+2+3	2+3
Tuulennopeus m/s	Tuulisuusluokka	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>
<b>vähintään 6 m/s</b>	<b>A+B+C+D</b>	<b>980</b>	<b>1 030</b>	<b>2 010</b>	<b>1 330</b>	<b>3 340</b>	<b>2 360</b>
6–6,5 m/s	D	370	120	490	40	530	160
<b>vähintään 6,5 m/s</b>	<b>A+B+C</b>	<b>610</b>	<b>910</b>	<b>1 520</b>	<b>1 290</b>	<b>2 810</b>	<b>2 200</b>
6,5–7 m/s	C	360	290	650	280	930	570
<b>vähintään 7 m/s</b>	<b>A+B</b>	<b>250</b>	<b>620</b>	<b>870</b>	<b>1 010</b>	<b>1 880</b>	<b>1 630</b>
7–7,5 m/s	B	210	450	660	740	1 400	1 190
<b>vähintään 7,5 m/s</b>	<b>A</b>	<b>40</b>	<b>170</b>	<b>210</b>	<b>270</b>	<b>480</b>	<b>440</b>

Taulukko 5. Offshore-tuulivoiman teoreettiset rakennuspotentiaalit (MW) Perämerellä.

Rakennus- potentiaali	Veden syvyys m	0–3 m	3–6 m	0–6 m	6–10 m	0–10 m	3–10 m
	Syvyysluokka	1	2	1+2	3	1+2+3	2+3
Tuulennopeus m/s	Tuulisuusluokka	MW	MW	MW	MW	MW	MW
<b>vähintään 6 m/s</b>	<b>A+B+C+D</b>	<b>8 850</b>	<b>9 340</b>	<b>18 190</b>	<b>11 990</b>	<b>30 180</b>	<b>21 330</b>
6–6,5 m/s	D	3 330	1 060	4 390	360	4 750	1 420
<b>vähintään 6,5 m/s</b>	<b>A+B+C</b>	<b>5 520</b>	<b>8 280</b>	<b>13 800</b>	<b>11 630</b>	<b>25 430</b>	<b>19 910</b>
6,5–7 m/s	C	3 280	2 650	5 930	2 530	8 460	5 180
<b>vähintään 7 m/s</b>	<b>A+B</b>	<b>2 240</b>	<b>5 630</b>	<b>7 870</b>	<b>9 100</b>	<b>16 970</b>	<b>14 730</b>
7–7,5 m/s	B	1 920	4 090	6 010	6 660	12 670	10 750
<b>vähintään 7,5 m/s</b>	<b>A</b>	<b>320</b>	<b>1540</b>	<b>1 860</b>	<b>2 440</b>	<b>4 300</b>	<b>3 980</b>

Taulukko 6. Offshore-tuulivoiman teoreettiset tuotantopotentiaalit (TWh/a) Perämerellä.

Tuotanto potentiaali	Veden syvyys m	0–3 m	3–6 m	0–6 m	6–10 m	0–10 m	3–10 m
	Syvyysluokka	1	2	1+2	3	1+2+3	2+3
Tuulennopeus m/s	Tuulisuusluokka	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a
<b>vähintään 6 m/s</b>	<b>A+B+C+D</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>41</b>	<b>31</b>	<b>72</b>	<b>53</b>
6–6,5 m/s	D	6	2	8	1	9	3
<b>vähintään 6,5 m/s</b>	<b>A+B+C</b>	<b>13</b>	<b>20</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>63</b>	<b>50</b>
6,5–7 m/s	C	7	6	13	6	19	12
<b>vähintään 7 m/s</b>	<b>A+B</b>	<b>6</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>24</b>	<b>44</b>	<b>38</b>
7–7,5 m/s	B	5	10	15	17	32	27
<b>vähintään 7,5 m/s</b>	<b>A</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>11</b>

Perämeren matalilla vesialueilla olisi siis teoriassa mahdollista tuottaa tuulivoimaa yli 70 TWh/a eli koko Suomen tämänhetkistä sähköntarvetta vastaava määrä. Käytännössä luonnollisesti monet sekä tekniset että alueiden käyttöön liittyvät tekijät rajoittavat merituulivoiman tuotantoa huomattavasti. Mikäli oletetaan, että noin 5–10 % teoreettisesta potentiaalista olisi toteutuskelpoista, päästään varsin merkittävään sähköntuotantoon eli 5–10 %:iin Suomen tämänhetkisestä sähkönkulutuksesta.

Keskittuulennopeuden kasvaminen merkitsee myös etäisyyden kasvua mantereelle, jolloin muita kilpailevia alueiden käyttömuotoja ja -intressejä on yleensä merkittävästi vähemmän. Toisin sanoen on syytä olettaa, että tuulisuusluokissa A ja B toteutuskelpoisen potentiaalin osuus olisi suurempi kuin tuulisuusluokissa C ja D. Kauempana rannikosta luonnollisesti myös rakennuskustannukset kasvavat ja jääkuormien hallinta tulee vaikeammaksi, mutta kun toisaalta tuotantoluvutkin kasvavat ja suuri projektikoko pienentää rakennuskustannusten suhteellista osuutta kokonaiskustannuksista, saattaa merituulivoimaprojektien taloudellisuus yleisesti ottaen olla jopa parempi kaukana rannikosta kuin lähempänä mannerta.

Potentiaalisimpia alueita ovat luonnollisesti suhteellisen lähellä mannerta sijaitsevat laajat, yhtenäiset matalikot, joilla veden syvyys on alle 10 m ja keskittuulennopeus 7 m/s tai enemmän. Tällaisia alueita on Perämerellä lähes 2 000 km<sup>2</sup>, jotka täyttämällä saataisiin 17 000 MW eli noin 44 TWh/a tuulivoimatuotantoa. Jätettäessä alle 3 m matalikot pois olisi tuotantopotentiaali lähes 40 TWh/a.

### **3.6 Potentiaaliarvion virhelähteitä**

Käytetyn digitaalisen syvyysaineiston kattavuus ja luotettavuus on ollut tarkoitusta varten riittävä. Hailuodon pohjoispuoleisesta alueesta ei numeerista syvyysaineistoa ollut saatavana, mutta alueen laajat matalikot jäävät joka tapauksessa liikkuville jäille asetetun rajan ulkopuolelle. Kalajoella oli yksi pieni alue, josta numeerista syvyysaineistoa ei ollut saatavissa sen enempää digitaalisessa muodossa kuin painettuina karttalehtinäkin. Pintamalli ko. alueesta näyttää kuitenkin suhteellisen luotettavalta, koska ympäröivillä alueilla sekä rantaviiva että syvyyskäyrät ovat verraten "sileitä". Syvyysaineisto perustuu pääosin 1940- ja 1950-luvulla tehtyihin luotauksiin. Maan kohoamisesta johtuen on todellinen veden syvyys tällä hetkellä joillakin alueilla jopa 0,5 m pienempi. Rantaviiva-aineisto puolestaan on huomattavasti uudempaa (pääosin 1980-luvulta). Todellisuudessa alle 3, 6, tai 10 m syvyisiä vesialueita on siis jonkin verran enemmän kuin tässä selvityksessä on laskettu.

Pintamallin muodostaminen lineaarisena interpolaationa heikentää tulosten luotettavuutta lähinnä niillä alueilla, joilla numeerinen syvyysaineisto oli puutteellista (ks. edellinen kohta). Koska rantaviiva kuuluu MML:n aineistossa



eri karttaelementtiin kuin syvyysaineisto, oli rantaviiva siirrettävä Energia-Ekonon käsin digitoituista kartoista ja yhdistettävä syvyysaineistoon. Käsin digitoitu rantaviiva-aineisto oli paikoin epätarkempaa kuin MML:n data, mistä johtuen rantaviiva ja 3 m syvyyskäyrä menivät paikoitellen "ristiin" ja pintamalliin syntyi virheitä. Rikkonaisessa saaristossa, jossa veden syvyydet vaihtelevat voimakkaasti (Vaasan ja Kokkolan välinen alue), syntyi pintamalliin virheitä edellisen lisäksi myös syvyysaineiston heikosta kattavuudesta johtuen. Näiden virheiden vaikutus laskettuihin pinta-aloihin on kuitenkin suhteellisen pieni, koska 6 m/s keskituulennopeuskäyrä rajasi tehokkaasti pois lähes kaikki sellaiset maa-alueet, jotka pintamalli nyt tulkitse vesialueiksi.

Tuulisuuservioita voidaan pitää varsin luotettavina, eivätkä ne todennäköisesti ainakaan yliarvioi keskituulennopeuksia tarkastelluilla alueilla. WAsP-ohjelman luotettavuus paranee huomattavasti a) siirryttäessä rantaviivalta merelle päin ja b) noustaessa hieman korkeammalla maan tai meren pinnasta. Käytetyllä 50 m korkeudella ohjelman luotettavuuden arvioidaan olevan parhaimmillaan; maanpinnan rosoisuus ei enää heikennä luotettavuutta läheskään yhtä voimakkaasti kuin esim. 30 m korkeudella, mutta toisaalta pintatuulimittauksia voidaan vielä suhteellisen luotettavasti käyttää tuulen vertikaaliprofiilin estimointiin. Lähestyttäessä 100 m korkeutta alkavat toisaalta vaikuttaa Itämeren alueelle tyypilliset suihkuvirtaukset (low level jets) nostaa tuulen nopeuksia (Källstrand, 1996), toisaalta taas vertikaaliprofiilin estimointiin tulee WAsP-ohjelman laskentamenetelmästä johtuen virhettä päinvastaiseen suuntaan (Tammelin, 1991), ja kaiken kaikkiaan ohjelman antamien tulosten virhemarginaalit kasvavat. Tanskassa on huomattu, että WAsP-ohjelma aliarvioi kaukana rannikosta olevien merituulipuistojen tuotantoa jopa 30 % (Madsen, 1996). Suomen oloihin tätä ei voida soveltaa suoraan, koska Tanskassa meri ei jäädy talvella ja ilmassa termiset virtaukset ovat meren yläpuolella tästä johtuen hyvin erilaisia kuin Perämerellä. On kuitenkin mahdollista, että esitetty tuotantoarviot aliarvioivat jonkin verran tuotantoa.

Rakennus- ja tuotantopotentialit arvioitiin hyvin karkeasti. Arvio tarvittavasta pinta-alasta megawattia kohti (9 MW neliökilometrille) perustui oletukseen, että 1,5 MW laitoksia voidaan sijoittaa hilaan noin 300–500 m metrin välein (5–7 roottorin halkaisijaa). Arvioidut tuotantoluvut eri tuulisuusvyöhykkeille perustuvat WAsP-ohjelmaan ja ne on laskettu käyttäen tyypillisen 1,5 MW

laitoksen tehokäyrrää. Tämänäyttöisessä alustavassa potentiaalilaskelmassa ovat näin lasketut tuotantopotentiaalit riittävän hyvin suuntaa-antavia.

Yhteenvetona voidaan todeta, että rakennus- ja tuotantopotentiaaliarvojen suuruusluokka on varmasti oikea, ja koska erilaiset rajoittavat tekijät käytännössä tulevat karsimaan toteutuskelpoisia alueita voimakkaasti, ei tämän suurempaan arviointitarkkuuteen ole mielekäästä tässä vaiheessa pyrkiä.

## **3.7 Potentiaalia rajaavia tekijöitä**

### **3.7.1 Etäisyys sähköverkkoon**

Kasvava etäisyys mantereelle lisää merituulivoiman rakennuskustannuksia lähinnä lisääntyvän kaapelintarpeen muodossa. Paremmat tuuliolosuhteet vaikuttavat päinvastaiseen suuntaan, ja projektikoon kasvaessa kaapelin vetämisestä syntyvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista pienenee.

### **3.7.2 Kuljetus- ja pystytystekniset kysymykset**

Kuljetus- ja pystytystekniset tekijät saattavat karsia toteutuskelpoisia alueita erittäin voimakkaasti. Innovatiiviset tekniset ratkaisut voivat toisaalta mahdollistaa tuulivoiman rakentamisen sellaisille alueille, joille se tämän päivän tekniikalla olisi mahdotonta tai liian kallista.

### **3.7.3 Jääkuormat**

Liikkuvien jäiden aiheuttamat kuormat vaihtelevat voimakkaasti alueittain. Potentiaaliarviossa käytetty 40 cm raja on hyvin karkea, ja on muistettava, että paikkakohtainen jääolosuhdearvio täytyy aina tehdä merituulivoimaprojektin suunnitteluvaiheessa.

### **3.7.4 Visuaaliset vaikutukset**

Kun Tanskassa vuonna 1995 tehtiin vastaavaa mutta laajempaa ja nimenomaan viranomaisasioihin painottuvaa merituulivoiman aluekartoitusta, yhtenä tärkeänä kriteerinä pidettiin laitosten näkyvyyttä mantereelle. Alueet jaettiin 4

luokkaan sen mukaan, miten kaukana ne olivat mantereesta, ja ensisijaisesti suositeltiin sitä, että tuulipuistot rakennettaisiin vähintään 12,5 km etäisyydelle lähimmästä rantaviivasta. Seuraava vyöhyke 7,5–12,5 km oli jo "ongelmallinen", ja alle 7,5 km etäisyyksille ei tuulipuistojen rakentamista yleisesti ottaen suositeltu, joskin todettiin että tietyillä alueilla se voi tulla kyseeseen (Energistyrelsen, 1995).

Jos 7,5 km minimietäisyyden kriteeriä sovellettaisiin Suomessa, suuri osa potentiaalisista alueista karsiutuisi tuulivoimarakentamisen ulkopuolelle. On selvää, että mitä lähemmäs rantaviivaa merituulipuisto rakennetaan, sitä enemmän se vaikuttaa maisemaan ja sitä vaikeampaa projektille on tätä kautta saada viranomaisten ja yleisön hyväksyntää, varsinkin jos on kyse erittäin massiivisesta projektista. Yksiselitteistä "suojaetäisyyttä" ei kuitenkaan voida antaa, koska tuulipuiston visuaaliset vaikutukset ja tätä kautta sen rakentamisen hyväksyttävyyys riippuu monista tekijöistä, kuten ympäröivästä maisemasta, asutuksen tiheydestä ja tyypistä (loma-asutus vs. kaupunkiasutus), projektin koosta jne.

### **3.7.5 Kilpailevat alueidenkäyttöintressit**

Kilpailevia intressejä, jotka vaikuttavat alueiden toteutuskelpoisuuteen, ovat ainakin:

- luonnon- ja maisemansuojelu
- ranta-alueiden asutus
- kalastus ja kalankasvatus
- vesiliikenne
- suunnitellut siltayhteydet
- radio- ja teleliikenne
- kaapelit, viemärit
- maa-ainesten otto
- puolustusvoimien intressit
- laivahylät, puolustusvoimien ase- ja ammuspotukset yms.

Osa kilpailevista intresseistä sulkee merituulivoiman rakentamisen kokonaan pois, osa taas on luonteeltaan sellaisia, että alueiden yhteiskäyttö on mahdollista (Energistyrelsen, 1995, de Bruijne & 't Hooft, 1996). Paljolti on kyse myös tapauskohtaisesta harkinnasta (intressivertailu).

Merituulivoimassa on kyse uudesta merialueiden käyttömuodosta, jolle ei ole olemassa esim. valmiita kaavoitus- ja lupaprosesseja. Rakentamismahdollisuuksiin saattavat vaikuttaa myös eräät kansainväliset sopimukset. Erittäin potentiaalisilla tuulivoima-alueilla saattaisi tulla kyseeseen jopa aluevesirajojen siirto.

## 4. Jäävaikutukset

Tässä luvussa kuvataan ne tilanteet, joissa jää aiheuttaa kuormia rakenteille. Jääkuormat ja kuormituslaskennan teoria käydään läpi sekä staattisille että dynaamisille kuormille. Pääasiallinen kuorma syntyy jään murskautumisesta rakennetta vasten. Rakenteen kartiomuoto pienentää tätä kuormaa noin kolmannekseen ja vähentää myös dynaamista kuormitusta. Jääominaisuuksia ja jäävaikutuksia rakenteita vasten on kuvattu esimerkiksi viitteessä Cammaert & Muggeridge, 1988.

### 4.1 Jäävaikutusskenaariot

Päästäkseen liikkumaan kiinteän merirakenteen ohi jään täytyy murtua rakenteen kohdalla. Tämä aiheuttaa kuormia sekä rakenteeseen että sen perustuksiin. Lisäksi jään liikkuvuus johtaa yleensä ahojäämuodostelmien syntyyn. Erilaiset ahojäämuodostelmat, kuten esimerkiksi ahojäävallit, ovat yleensä paksuja verrattuna tasaiseen jäähän, ja ne sisältävät suuren jäämassan. Muun jääkentän mukana liikkuessaan tällaiset jäämuodostelmat voivat aiheuttaa huomattavan suuria lisäkuormia kiinteään rakenteeseen törmätessään. Seuraavassa kuvataan ne tilanteet, joissa jää aiheuttaa kuormia rakenteisiin.

#### 4.1.1 Liikkuvan jään nopeus ja voima

Suomen merialueilla vuorovesivirran puuttuessa tuuli on tärkein jäätä liikkeelle ajava voima. Veden pinnan kohoaminen myrskytuulen aiheuttaman tulva-aallon yhteydessä aikaansaa salmiin paikallisia virtauksia. Normaalilla jään pinnankarheudella 20 m/s tuuli aiheuttaa jäähän 1 Pa liikkeelle ajavan leikkausvoiman. Vaikka tämä on alhainen, kertyy neliökilometriltä jo 1 MN kokonaisvoima. Avomerialueelta löytyy helposti niin suuria yhtenäisiä jääkenttiä, että niistä kertyvä kokonaisvoima ylittää meren pohjaan tuetun rakenteen kantokyvyn, ellei jää murru sitä ennen rakennetta vasten.

Irrallisen jäälautan liikenopeus paikoillaan olevan veden pinnalla voi nousta jopa 3 %:iin sitä liikuttavan tuulen nopeudesta. Esimerkiksi 30 m/s myrsky voi liikuttaa jäätä noin 1 m/s. Käytännössä jääkentän reunoilla on vastusta rantoihin, pohjaan tai muuhun jääkenttään, jolloin havaitut nopeudet ovat tavallisesti alle

0,5 m/s. Jään liikenopeudella on merkitys jään murtotapaan. Alle noin 0,01 m/s nopeudella jää murtuu sitkeästi ja sitä suuremmilla nopeuksilla hauraasti.

#### **4.1.2 Rakenteeseen kiinnijäytyminen, adheesio**

Jään lähtiessä liikkeelle ja alkaessa murtua rakennetta vasten on ensin mahdollisen adheesion - kiinnijäytymisen - irrottava, ellei jää murru sitä ennen muilla mekanismeilla kauempaa rakenteen ulkopuolelta. Adheesiokuorma tulee kyseeseen sekä vaaka- että pystysuunnassa alkavalle jään liikkeelle. Jään adheesiolujuus rakenteeseen riippuu materiaalista ja pinnan sileydestä. Jos materiaalilla on alhainen kitka jäähän nähden, on myös sen adheesiolujuus yleensä alhainen.

Liikkeellelähtövaiheessa on jään nopeus pieni ja murtumistapa sitkeä. Jännitysjakautuma kosketuspinnalla ei ole tasainen. Adheesio irtoaa progressiivisesti alkaen eniten rasitetusta kohdasta ilman, että täysi adheesiolujuus vaikuttaisi koko kosketuspinnalla samanaikaisesti. Rakenteen kokonaiskuorman kannalta adheesiokuormat eivät tule kookkailla rakenteilla merkityksellisiksi.

#### **4.1.3 Hidas sitkeä jään murto**

Hitaasti liikkuessaan jää murtuu rakennetta vasten sitkeästi. Tilannetta voi verrata viskoosin nesteen kulkuun rakenteen ohi virumalla. Jää vaurioituu paikallisesti rakennetta vasten ja siihen syntyy säröjä, jotka eivät kuitenkaan kasva nopeasti ja etene kauas. Kosketus jään ja rakenteen kesken on jatkuvaa. Syntyvä kokonaisvoima riippuu kuormitusnopeuden rajoittamasta virumislujuudesta. Virumislujuus lisääntyy kuormitusnopeuden kasvaessa, kunnes saavutetaan raja, jossa jää alkaa murtua hauraasti ja keskimääräinen lujuus laskee.

#### **4.1.4 Nopea hauras jään murto**

Jään liikenopeuden kasvaessa ja venymän kasvunopeuden noustessa alkaa transitiovaihe jään murtumisen muuttuessa sitkeästä hauraaksi. Suurella kuormitusnopeudella säröt etenevät nopeasti pidemmälle aiheuttaen paikallisia eriaikaisia jääreunan murtumisia pitkin rakenteen kosketuspintaa. Kosketus ei enää ehdi muodostua yhtenäiseksi ja kokonaisvoima alkaa pienentyä. Suurin jääkuorma saavutetaan transitioalueella. Täysin hauraalla alueella kokonais-

jääkuorma on noin kolmanneksen tätä maksimia pienempi. Vaikka paikalliset jääpaineet hauraassa murtotavassa voivat olla noin 10 Mpa, putoaa tehollinen keskipaine koko kosketuspinnalla noin 2 MPa:n tasolle. Transitioalue on useimmiten mitoituksen kannalta kriittisin jääkuormaskenaario.

#### **4.1.5 Dynaamiset efektit**

Periaatteessa kaikki jäävoimavaikutukset ovat dynaamisia. Käytännössä hitaat jääliikkeet ovat pseudostaattisia rakenteen kannalta, jos jäävoiman muutosten jakso on paljon pidempi kuin rakenteen alhaisimpien ominaistajuuksien jakso. Siten hitaan jäävoiman kasvuvaihe on staattinen, mutta sen jälkeen mahdollisesti tapahtuva jään äkillinen murto on dynaaminen transientti.

Suurella jään liikenopeudella jään murto tapahtuu hauraasti ja jäävoimassa esiintyy sekä nopeita että hitaita satunnaisia vaihteluita. Nopeita vaihteluita rakenne ei pysty seuraamaan, koska massavoimat pyrkivät säilyttämään tasapainotilan. Hitaita vaihteluita rakenne seuraa pseudostaattisena. Satunnaisvaihteluissa voi olla kuitenkin komponentteja, jotka herättävät merkittävästi rakenteen ominaisjaksolukuja lyhytaikaisesti. Rakenne kokee satunnaisvasteen.

Useimmilla merirakenteilla esiintyy sopivalla jään liikenopeusalueella resonanssitilanne. Jään murtumisen tahdin synkronoituessa johonkin rakenteen alhaisimmista ominaistajuuksista kasvaa rakenteen dynaaminen vaste suureksi, sillä rakenteen sisäinen vaimennus on vähäistä. Esimerkiksi, jos resonoivan ominaismuodon vaimennus on 2,5 %, on dynaaminen vaste 20-kertaista staattiseen verrattuna. Näin jo pienikin resonoiva jäävoima aikaansaa haitallisen suuren dynaamisen vasteen. Muita dynaamisia efektejä ovat jäälautan reunan törmääminen tai railojen ja jäänpaksuuden muutosten aiheuttamat transientit.

Kaltevaseinämaisillä rakenteilla jään murto voi esiintyä myös toistuvasti, mutta taivutusmurrosta johtuvat jäävoimalaukeamiset ovat siksi harvassa, että tavanomaisilla pohjaan tuetuilla rakenteilla ei esiinny resonanssivaaraa. Kukin taivutusmurtotapahtuma on rakenteen kannalta yksittäinen transientti.

#### **4.1.6 Jään lämpölaajeneminen**

Jääkannen lämpölaajenemisen edellytyksenä on lämmön johtuminen jään sisälle. Lämpö siirtyy pintaan joko konvektiolla ilmasta tai säteilyllä auringosta.

Kummassakin tapauksessa päällä oleva lumi hidastaa olennaisesti lämmön johtumista jäähän. Lumi on hyvä lämmöneriste ja sen säteilyn absorptiokerroin on alhainen.

Lämmön johtumisella on kullekin materiaalille ominainen aikavakio. Jäällä lämmön johtuminen on siksi hidasta, että vuorokautinen lämmönvaihtelu ulottuu merkittävästi vain noin 0,5 m syvyyteen. Suurimmat lämpölaajenemiskuormat syntyvät yleensä lämpötilan vuorokausirytmien tai sitä lyhyempien transienttien seurauksena. Siten jääkuormien kannalta pahin lämpölaajenemistilanne on odotettavissa ohuella, noin 0,3 m paksulla lumettomalla jäällä. Paksummalla jäällä vain vähäistä lämpenemistä kokeva pohjakerros vastustaa ylempien kerrosten laajenemisyrittämiä.

Jään lämpölaajeneminen on siksi hidasta, että jään ajasta riippuva lujuuskäyttäytyminen on merkittävää. Lämpölaajenemisen laskenta edellyttää sekä ajasta riippuvan lämmönjohtumis- että kimmoprobleeman ratkaisua (Noponen & Määttä, 1993). Probleemat eivät ole toisiinsa kytkeytyneitä. Ensin ratkaistaan transientti lämpötilajakauma huomioiden alkutilan lämpötila ja vallitsevan ulkoilman lämpötilan muutoksista johtuva ajallinen vaihtelu. Tämän jälkeen voidaan laskea kullakin ajanhetkellä jään jännitys- ja muodonmuutostila huomioiden jään viruminen pitkäaikaisessa kuormituksessa, josta seuraa reunaehdoista riippuva liiketila. Jos rakenteen toisella puolella jään liike on estetty ja toisella puolella vapaa, esimerkiksi laivaväylän ansiosta, jää liikkuu enemmän, kuin jos se on kaikilta puoliltaan kiinni rannikossa. Olettaen Suomessa mitattu maksimaalinen lämpeneminen 15 °C kuuden tunnin aikana kertyy 30 cm paksuun jääkenttään viiden kilometrin matkalla vapaa laajenemisnopeus 0,20 mm/s. Tämä on siksi hidasta, että jään murto rakennetta vasten tapahtuu sitkeästi.

#### **4.1.7 Vedenpinnan korkeusvaihtelu**

Kun vedenpinnan korkeusvaihtelu on hidasta, kuten Suomessa, jään murto tapahtuu sitkeästi. Vaihtoehtoina ovat adheesiomurto jään ja rakenteen kosketuspinnoilta, jään leikkausmurto tai taivutusmurto. Mikä mekanismeista tapahtuu ensin riippuu jään paksuudesta ja siitä, kuinka hyvin se on jäänytynyt rakenteeseen kiinni, sekä pinnan sileydestä ja adheesiolujuudesta. Tuulivoimalan perustus on niin massiivinen, että vedenpinnan pystysuorien korkeusvaihteluiden aiheuttamat jääkuormat eivät tule yleensä mitoituksessa merkittäväksi.



#### 4.1.8 Jäätäminen

Alkutilvella ympäristöolosuhteet ovat otollisia jään kerääntymiselle rakenteisiin. Tuulivoimalan tapauksessa pahin haitta on roottorin lapojen jäätyminen, mikä aikaansaa hyötysuhteen putoamista, epätasapainoa ja rakenteiden dynaamisia kuormituksia. Tässä raportissa ei käsitellä lapojen jääntymisongelmaa.

Rakenteisiin kertyvän jään massa ei ole merkittävä. Sen sijaan jää muuttaa rakenteen muotoja ja lisää tuulikuormia. Myös rakenteeseen nousu tulee hankalaksi, mikäli kulkutiet jäätyvät.

### 4.2 Jääkuormat

Jääkuormat syntyvät joko jään paineesta rakennetta vasten ilman, että jää murtuu, tai jään murtamiseen tarvittavista voimista. Jääkuormilla on sekä vaaka-että pystykomponentteja riippuen jään liikesuunnasta ja rakenteen muodosta. Rakenteen kannalta ovat vielä olennaisia kokonaiskuorman jakauma ja vaihtelu. Paikallisesti jään paine voi olla huomattavasti korkeampi kuin mitä kokonaiskuorma keskimäärin edellyttää. Esimerkiksi, jos keskimääräinen jään murskautumispaine on 2 Mpa, voi rakennemitoituksen kannalta merkittävä paikallinen paine olla 10 MPa ja kuluttavaa vaikutusta aiheuttava pintapaine jopa 50 MPa. Ajallisesti suurimmat jääpaineet esiintyvät eri aikaan eri paikoissa kosketusalueella.

Rakenteen mitoituksessa aina huomioitava jäävoiman piirre on sen dynaamisuus. Poikkeuksena ovat vain jään lämpölaajenemisessa, vedenpinnan korkeusvaihteluissa tai jään liikkeellelähävaiheessa syntyvät voimat, jotka muuttuvat niin hitaasti, että ne ovat rakenteen kannalta staattisia.

Tuulivoimalaperustusten jäävoimamitoituksesta on suoranaisia julkaisuja rajoitetusti (Haapanen et al., 1997). Soveltuvien osin voidaan pohjautua avomerirakenteiden jääkuormien laskentamenetelmiin (Cammaert & Muggeridge, 1998 ja IAHR Ice Forces Working group Reports) tai majakoiden ja merimerkkien mitoitushjeisiin (Määttänen, 1984).

#### 4.2.1 Jään murskautuminen pystyrakennetta vasten

Jäävoima lasketaan puoliempiirisestä kaavasta tehollinen paine kertaa pinta-ala:

$$F_c = k_1 k_2 k_3 \sigma_c h d, \quad (1)$$

jossa  $k_1$  on muotokerroin, 1,0 tasomaiselle, 0,9 pyöreälle rakenteelle  
 $k_2$  on kontaktikerroin, 0,3–1,0  
 $k_3$  on sivusuhdetekijä,  $k_3 \geq 1,0$   
 $\sigma_c$  on jään puristuslujuus  
 $h$  on jään paksuus  
 $d$  on rakenteen leveys projisoituna jään liikesuuntaan.

Kertoimilla  $k_1$ – $k_3$  pyritään huomioimaan jäässä rakenteen edessä esiintyvän kolmidimensionalisen jännitystilän ja kuormitusnopeudesta johtuvan murtumistavan yhteisvaikutukset, jotta saataisiin tehollinen vakio kosketuspaine koko projektiopinta-alalle  $dh$ . Kerroin  $k_1$  ottaa huomioon rakenteen poikkileikkauksen muodon. Kontaktikerroin  $k_2$  huomioi puutteellisen kosketuksen jään ja rakenteen välissä. Kiinnijäätäneessä tapauksessa kontakti on täydellinen, kerroin  $k_2 = 1$ . Jään liikkeessä hitaasti jää murtuu sitkeästi ja kerroin on lähellä arvoa 1. Nopeuden kasvaessa jään murto muuttuu hauraaksi ja täydellistä kosketusta ei ehdi enää tapahtua edellisen murron jälkeiselle rosoiselle jään reunalle, jolloin kerroin  $k_2$  pienenee.

Sivusuhdetekijä huomioi muutoksen hyvin kapean rakenteen edessä keskimäärin vallitsevan tasomuodonmuutostilan muuttumiseen tasojännitystilaksi hyvin leveällä rakenteella. Se lasketaan empiirisesti johdetusta kaavasta

$$k_3 = \sqrt{1 + 5 \frac{h}{d}}. \quad (2)$$

Jännityksen  $\sigma_c$  arvona käytetään taulukon 2 (ks. kohta 2.7) mukaista transitioalueen puristuslujuutta, mikä on käytännössä vakiintunut Suomen merialueilla kapeiden merimerkkien jäävoimamitoitukseen. Hitaalla jään liikenoisuusalueella, esimerkiksi lämpölaajenemisen tai jään liikkeellelähdön aikana, jään puristuslujuus lasketaan kaavasta 3 (Michel, 1978 ja Määttänen, 1984)

$$\sigma = A \sqrt{\frac{0,005}{d}} \dot{\epsilon}^{0,33} \text{ MPa} , \quad (3)$$

jossa  $d$  on jään kidekoko (m) ja  $A$  on vakio, jonka arvoksi on mitattu laboratorionkokeissa 96, mutta joka käytännön täydessä mittakaavassa on noin 30. Venymänopeus  $\dot{\epsilon}$  määritellään muodollisesti kaavalla

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{4D} , \quad (4)$$

jossa  $V$  on jään liikenopeus ja  $D$  rakenteen halkaisija. Joissakin lähteissä on tehty  $4D$ :n sijasta jään paksuuden  $2h$  suhteen. Potenssilaki (3) on voimassa niin kauan, kunnes venymänopeus ylittää alueen 0,001–0,01 1/s. Tämän jälkeen jäänmurtuminen on täysin haurasta ja keskimääräinen lujuus selvästi alentunut. Mitoituksessa on sen takia kriittisin juuri transiatio alue, jossa jään nopeus on suurin ja jossa syntyvät suurimmat jäävoimat.

#### 4.2.2 Jään taivutusmurto kartioita vasten

Kartion jäävoimien ennustaminen perustuu malliin, jossa etenevän jään reunaan kartiota vasten kasvaa ensin radiaalihalkeamia, ennen kuin lopullinen rengashalkeama syntyy. Samalla kartiota vasten nouseva jään reuna nostaa myös päällä olevia aiemmin murrettuja lohkarkeitä ja työntää niitä sivuun kartion ohi. Jäävoima kasvaa vaiheittain ja saa suurimman arvonsa kehähälkeaman syntymishetkellä. Jään jännitys- ja muodonmuutostilat ovat monimutkaiset. Ne voidaan laskea elementtimenetelmällä, mutta käytännössä laskenta suoritetaan yksinkertaisemmalla plastisen kantokuorman menettelyllä. Tällöin oletetaan kinemaattisesti sallittu liiketila ja lasketaan sitä vastaavasta energiataseesta jäävoiman yläraja. Tunnetuin on Ralston'in esittämä menetelmä (Ralston, 1977), jossa jäävoiman vaaka- ja pystykomponentit lasketaan kaavoista

$$H = [A_1 \sigma_b h^2 + A_2 \rho_w g h D^2 + A_3 \rho_w g h (D^2 - D_T^2)] A_4 \quad (5)$$

$$V = B_1 H + B_2 \rho_w g h (D^2 - D_T^2) \quad (6)$$

joissa  $A_1$ – $A_4$  ovat kartiokulmasta ja kitkasta riippuvia kertoimia  
 $B_1$ – $B_2$  ovat kartiokulmasta ja kitkasta riippuvia kertoimia  
 $\sigma_b$  on jään taivutuslujuus, taulukko 2

$h$  on jään paksuus  
 $D$  on kartion halkaisija vesirajassa  
 $D_T$  on kartion kaulan halkaisija  
 $\rho_w$  on veden tiheys, 1 000 kg/m<sup>3</sup>  
 $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyyden kiihtyvyyden, 9,81 m/s<sup>2</sup>  
 $\alpha$  on kartiokulma vaakatasosta  
 $\mu$  on jään ja rakenteen välinen kitkakerroin.

Kertoimet A1–A4 ja B1–B2 voidaan määrittää käyrästä liitteestä 2.

Kartion jäävoimat riippuvat voimakkaasti kartiokulmasta, varsinkin jos myös kitkakerroin on suuri. Rajana on tapaus, jossa jään taivutusmurto ei pääse enää tapahtumaan kitkavoiman estäessä jään reunan ylöspäin nousemisen. Tällöin jää murtuu murskautumalla jännitysten ylittäessä jään puristuslujuuden ja aiheuttaa merkittävästi suurempia jäävoimia. Käytännössä kilpailevaksi mekanismiksi tulee tätä ennen jään reunan leikkausmurto, joka voi johtaa taivutusmurtoa pienempiin jäävoimiin erityisesti paksulla jäällä.

Täyden mittakaavan kokeisiin verrattaessa kaava 5 ennustaa yleensä 10–30 % liian suuria jäävoimia (Määttänen et al., 1996).

### 4.2.3 Lämpölaajenemiskuorma

Yksittäistä avomerirakennetta vasten syntyy lämpölaajenemiskuorma, kun jää kokee lämpötilan muutoksen ja laajenee. Jos toinen reuna on rantaa vasten estynyt liikkumasta, vaeltaa toinen reuna ulospäin ja jääkentän sisällä olevaan rakenteeseen kohdistuu vaakasuora jäävoima.

Lämpölaajenemisnopeuden laskeminen on työlästä (Nojonen & Määttänen, 1993). Ensin on laskettava lämpötilan muutoksesta johtuva muuttuva lämpötilajakauma jäässä. Sitä vastaava lämpövenymätila aiheuttaa sekä elastista että viskoelastis-plastista venymää ja epälineaarisen jännitys jakauman jään paksuuden läpi. Jännitys jakaumista voidaan laskea sekä lämpömomentit että normaalivoimat. Normaalivoimista osa häviää reunaehtojen perusteella, ja tämä huomioiden voidaan laskea lopullinen lämpölaajenemisnopeus. Laskelmien suoritus edellyttää elementtimenetelmän käyttöä. Kun jään liikenoisuus on saatu selville, lasketaan jään lujuus kaavasta 3 ja jäävoima kaavasta 1.

Käytännön tarpeisiin on laskettu elementtimenetelmää käyttäen maksimilämpölaajenemisnopeuden antava likikaava

$$V = \frac{44L}{h}, \quad (7)$$

jossa  $h$  on jään paksuus (m) ja  $L$  rakenteen etäisyys rannasta (km), jolloin nopeus  $V$  on yksiköissä mm/tunti. Mallin oletuksena on ollut lumeton jää ja optimaalinen suurin Suomessa havainnoitu ulkoilman lämpötilan muutosnopeus. Jääkentän reunaehtona on vapaa liike ulospäin sivuttaisliikkeen ollessa estetty, jolloin Poisson-effekti vielä lisää liikenopeutta. Tilanne vastaa hyvin pitkää suoraa rannikkokaistaa, jossa avomerellä on railo tai laivaväylä. Suurimmat lämpölaajenemisnopeudet saadaan noin 0,30 m paksulla jäällä.

Esimerkiksi jos rakenne on 5 km rannikosta, on jään teoreettinen maksiminopeus vain 0,20 mm/s. Lämpölaajenemisesta johtuva jään liikenopeus on niin hidasta, että jään lujuus on laskettava kaavalla 3. Esimerkin mukaisessa ääritapauksessa 4 m leveälle rakenteelle jään lujuus on vain 0,7 MPa eli selvästi pienempi kuin muutoin käytettävä 2,5 MPa.

Tässä yhteydessä ei tarkastella säiliön sisällä jäätyvän veden aiheuttamia kuormia.

#### 4.2.4 Adheesiokuormat

Rakenteeseen kiinnijäätyneen jääkentän lähtiessä liikkeelle vaakasuunnassa kuormitusnopeus on alhainen ja jään irtoaminen rakenteesta tapahtuu progressiivisesti. Jäävoima voidaan laskea kaavalla 1 olettaen kontaktikerroin  $k_2 = 1,0$  ja laskien jään lujuus kaavasta 1. Koska kuormitusnopeus on hyvin alhainen, on vaakasuora jäävoima paljon pienempi kuin transitionopeutta vastaavan jään lujuuden mukainen jäävoima.

Kartiomaiselle rakenteelle on esitetty kiinnijäätymistilanteen vaakasuoran irtoamisvoiman yhtälö (Cammaert et al., 1986)

$$F_a = C_a C_s D h I \tau_a / \sin(\alpha), \quad (8)$$

jossa  $C_a$  on 1, kontaktikerroin  
 $C_s$  on 0,8, jännitys jakaumakerroin  
 $D$  on kartion halkaisija vesirajassa  
 $h$  on jään paksuus  
 $I$  on kartiokulmasta riippuva kerroin  
 $\tau_a$  on adheesiolujuus, taulukko 2  
 $\alpha$  on kartiokulma vaakatasosta

Kaavaa 8 ei ole esitetty täysin pystysuoralle rakenteelle, mutta esimerkiksi  $80^\circ$  kartiokulmalla kerroin  $I = 3,15$  puolikehälle. Vertaamalla kaavojen 7 ja 1 antamia voimia voidaan todeta, että adheesiovoima on tyypillisesti alle puolet jään murskautumisvoimasta. Jos adheesiovoima on progressiivinen irtoaminen huomioidaan, pienenee adheesiovoima entisestään.

Vedenpinnan korkeusvaihtelun seurauksena kiinnijäänyt jääkenttä aiheuttaa rakenteeseen pystykuormia. Jää irtoaa joko adheesiosta leikkautumalla tai murtuu taipumalla. Määrävä on pienemmän tuloksen antava.

Pystysuora adheesiovoima lasketaan kaavasta

$$V = \tau_a \pi d h, \quad (9)$$

ja taivutusmurtokuorma tanskalaisten kehittämästä puoliempiirisestä kaavasta (Määttänen, 1984)

$$V = 0.8 \sigma_b h^{1.75} d^{.25}. \quad (10)$$

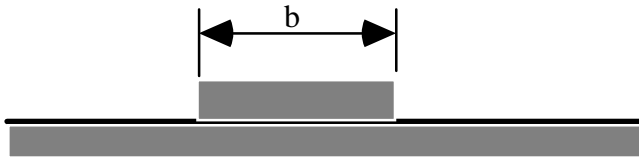
Yleensä pystysuorat adheesiovoimat ovat merkityksettömiä rakenteilla, jotka on mitoitettu kestäväksi vaakasuoria jäävoimia.

#### 4.2.5 Jään lommahtaminen

Jään lommahdus on rakenteen jäävoimia rajoittava tekijä. Rakenteeseen kohdistuva jäävoima voi olla siten pienempi, kuin mikä aiheutuisi jään murtuessa rakennetta vasten, mikäli jääkenttä lommahtaa aiemmin. Lommahdusmitoitusta voi käyttää myös määrittämään, kuinka paljon jään liikettä vastustavia esteitä on asennettava, jotta jääkenttä lommahtaa aina, ennen kuin se aiheuttaa liian suuria jääkuormia rakenteille. Lommahdus on

todennäköisintä ohuella jäällä ja/tai alhaisella jään liikenopeudella. Ohutkaan jää ei lommahda, jos jään liikenopeus on niin suuri, että lommahduksen yhteydessä syntyvä hydrodynaaminen tuenta tulee merkittäväksi. Toisaalta paksu jää voi lommahtaa viskoplastisesti pitkäaikaisen kuorman vaikutuksesta.

Tuulivoimalan perustukset ovat siksi kapeita, että lommahdusanalyysissä on käytettävä kimmoisalla alustalla olevan laatan teoriaa. Tulokset riippuvat reunaehdoista eli jään kiinnittymisestä rakenteeseen. Elastisen lommahduskuorman arvoja on esitetty referensseissä (Nevel, 1979 ja Sodhi & Nevel, 1980).



Kuva 6. Reunakuorma jääkentässä.

Kuvan 6 mukaisessa tapauksessa, jossa jään reunan pystysuoraa liikettä ei ole estetty, voidaan lommahduskuorma  $P$  laskea kaavasta

$$P = \left( \frac{b}{L} + \frac{3.32}{1 + \frac{b}{4L}} \right) \rho_w g L^3, \quad (11)$$

jossa  $\rho_w g$  on veden ominaispaino ja jään karakteristinen pituus  $L$  on määritelty:

$$L = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)\rho_w g}}. \quad (12)$$

Kuormitusalueen leveyden  $b$  pienetessä lähestytään pistekuorman ratkaisua ja, jos  $b$  tulee hyvin suureksi, degeneroituu ratkaisu kimmoisalla alustalla olevan palkin ratkaisuksi. Jos jään reunan pystysuora liike estyy esimerkiksi kiinnijäätymisen seurauksena, kasvavat lommahdusvoimat noin kaksinkertaisiksi kaavan 11 mukaisista.

Alhaisella kuormitusnopeudella elastinen ratkaisu ei päde jään visko-elastis-plastisten muodonmuutosten korostuessa. Leveälle rakenteelle tai useiden

rakenteiden reunastaan kiinnittämälle jääkentälle voidaan arvioida viskoplastisen lommahtamisen tarvitsema jännitys

$$p = 23V^{0.336} \text{ (MPa)}, \quad (13)$$

jossa  $V$  = jään nopeus (m/s).

Esimerkiksi jos jää liikkuu 1 m/vrk, tarvitaan 0,50 MPa puristus jääkentässä plastisen lommahduksen aikaansaamiseksi.

### 4.3 Dynaamiset kuormat

Dynaamisen jääkuorman laskentaan voidaan käyttää vastaavan kuormitustilanteen staattista jääkuormaa, kaavat 1–6, silloin kun käytetään oletettua jäävoimafunktiota, ks. kohta 4.3.4. Jos sahanteräaallon taajuus suurella jään liikenopeudella nousee yli 2 Hz:n, ei jäävoima ehdi täysin laueta ennen uuden jakson alkamista, jolloin dynaamisen voiman vaihtelu jää pienemmäksi kuin staattinen jäävoima. Silloin voi mitoituksessa käyttää yli 2 Hz taajuuksilla pienempää arvoa kuin kiintojäävoima dynaamisena kuormana. Riittävää täyden mittakaavan mittausdataa ei kuitenkaan ole olemassa pienennyskertoimen varmistamiseksi. Parempi on käyttää itseherätteistä jäävoimamallia ilman oletuksia jäävoimafunktion suuruudesta ja muodosta (Kärnä, 1992 ja Määttänen, 1987).

#### 4.3.1 Värähtelyjä aiheuttavat kuormat

Tuulivoimalan värähtelyjä syntyy kaikilla sijoituspaikoilla tuulen puuskista ja lapaherätteistä sekä tornin von Karmán pyörrerataherätteestä. Koska ne ovat hyvin tunnettuja ja tutkittuja tuulivoimalan tavanomaisia kuormituksia, niitä ei käsitellä tässä yhteydessä. Sama koskee mahdollisesta jään kertymisestä lapoihin johtuvaa sekä massa- että aerodynaamista epätasapainoa. Sen sijaan avomeriperustuksen tapauksessa aalto- ja jäävoimat antavat uudentyyppisiä lisäherätteitä.



Tornin ja perustuksen mitoitustavoitteena on saada rakenteellinen ominaisjaksoluku  $f_0$  selvästi poikkeamaan pyörimisnopeuden mukaisista lapataajuuksista.

$$\frac{RPM \cdot n}{60}, \quad (14)$$

jossa RPM on roottorin pyörimisnopeus kierrosta/minuutti ja n lapojen lukumäärä. Esimerkiksi kolmilapaiselle roottorille on käytettävä n:n arvoina sekä 1:tä että 3:a. Yleensä ollaan silloin noin 1 Hz taajuusalueella. Yhden sekunnin aallon merkittävä korkeus on alle 0,5 m ja aaltokuormat merkityksettömän pieniä resonanssitilanteessa. Sen sijaan 1 Hz taajuusalueella esiintyy herkästi jään aiheuttamia värähtelyjä.

Jääkuormitukset ovat aina dynaamisia. Kuitenkin, jos jäävoiman taajuussisältö on merkittävästi alhaisempi kuin alhaisimman ominaisuuden taajuus, on rakenteen käyttäytyminen näennäisesti staattista, rakenteen siirtymätila vastaa aina senhetkisen jäävoiman staattista siirtymätilaa. Jos taas jäävoiman taajuussisältö on paljon korkeammalla kuin rakenteen vasteen kannalta merkittävimpien korkeimpien ominaismuotojen taajuudet, ei rakenne ehdi seurata enää jäävoiman vaihteluita. Siirtymätila on silloin keskimääräistä voimaa vastaava. Kun jäävoiman taajuussisältö on samalla alueella kuin rakenteen alhaisimmat ominaisuudet, syntyy merkittävää dynaamista vastetta.

Avomerirakenteilla on havaittu kolme olennaisesti erilaista dynaamista jääkuormitustilannetta. Jään liikkeessa hitaasti tuulen ajamana jäävoima kasvaa pseudostaattisesti, mutta jään murtuessa yhtäkkiä aiheutuu dynaaminen jäävoiman laukeaminen. Kun murtuneen jään reuna kohtaa uudestaan rakenteen, alkaa uusi kuormitusjakso, joka aiheuttaa rakenteessa taas transienttivasteen eli värähtelyjä, jotka vaimenevat pois ennen seuraavia, melko säännöllisin väliajoin toistuvia jäävoimalaukeamisia. Sekä jäävoiman että vasteen aikahistoriat ovat sahanteräaallon muotoisia. Jäävoiman laukeamistaajuus riippuu rakenteen joustavuudesta sekä jään lujuudesta ja liikenopeudesta. Laukeamistaajuus on vielä niin paljon pienempi kuin rakenteen alhaisin ominaistaajuus, että dynaamista vahvistusta ei synny. Samantyyppinen yksittäinen transienttitilanne on jääreunan törmäys rakenneta vasten.

Jään liikenopeuden kasvaessa lähestyy jäävoimien laukeamistahti kohti jotakin rakenteen alhaisimmista ominaisjaksoluvuista. Jos tätä vastaava ominaismuoto on herkkä jään aiheuttamalle herätevoimalle, voi syntyä resonanssitilanne, jossa rakenteen ominaistaajuus hallitsee jään murtumistaajuutta. Seurauksena on resonanssitilanne ja pahat dynaamiset rasitukset. Käytännössä voi rakenteen alhainen ominaistaajuus hallita jään murtumistaajuutta varsin laajalla nopeusalueella. Resonanssivärähtelyt syntyvät herkimmin hoikkiin pohjaan tuettuihin rakenteisiin, jossa jää murtuu murskautumalla pystysuoraa pintaa vasten. Resonanssitilanteita on havaittu kuitenkin myös jäykillä ja massiivisilla leveillä rakenteilla. Kartioilla ei ole todettu resonanssivärähtelyjä.

Jään nopeuden vielä kasvaessa tai rakenteen ollessa hyvin jäykkä rakenne ei ehdi enää mukaan jään murtumistaajuuteen. Jään murtuminen on täysin haurasta, ja jäävoimassa esiintyy satunnaisvaihteluita sekä ajallisesti että paikallisesti. Tällöin rakenne kokee satunnaisherätteen ja siitä johtuvan satunnaisvasteen, vaikka suurimpia värähtelyamplitudeja esiintyykin ominaisjaksolukujen taajuuksilla. Satunnaisesti vaihtelevat dynaamiset kuormitukset eivät ole yhtä vaarallisia kuin resonoivat kuormat.

#### 4.3.2 Iskukuormat

Iskumainen jääkuorma syntyy liikkuvan jään reunan osuessa rakenteeseen. Jäävoima kasvaa äkkiä arvosta 0 kaavan 1 mukaiseen arvoon. Rakenteen dynaaminen vaste lasketaan tälle transienttiherätteelle integroimalla dynaamiset tasapainoyhtälöt. Tavallisesti elementtimenetelmää hyväksi käyttäen voidaan esittää tasapainoyhtälöt diskretisoidussa muodossa

$$[k]\{u\} + [d]\{\dot{u}\} + [m]\{\ddot{u}\} = \{F(t)\}, \quad (15)$$

jossa  $[k]$ ,  $[d]$  ja  $[m]$  ovat jäykkyys-, vaimennus- ja massamatriisit ja  $\{u\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  ja  $\{\ddot{u}\}$  ovat siirtymä-, nopeus ja kiihtyvyyksvektorit. Rakennetta kuvaavissa matriiseissa on huomiotava sekä perustuksen jäykkyys ja vaimennus että veden lisätty massa.

Kuormitusvektori  $\{F(t)\}$  on nyt tunnettu askelfunktio. Askelfunktion muotoinen herätevoima sisältää energiaa koko taajuusalueella ja herättää kaikkia

ominaismuotoja. Siten dynaamiset siirtymät ja rakenteen rasitukset voivat olla suurempia kuin vastaavan staattisen kuorman aiheuttamat.

### 4.3.3 Jääkuorman satunnaisvaihtelu

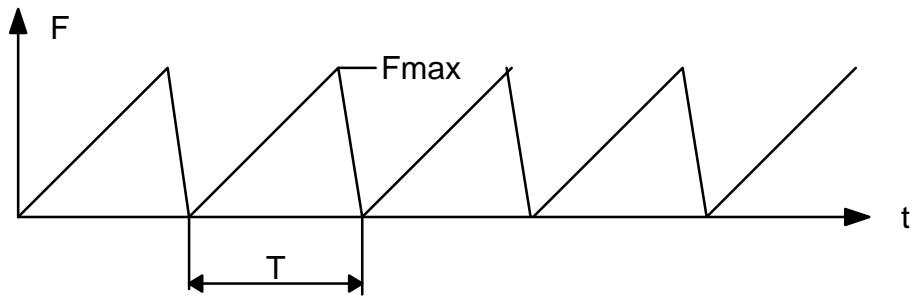
Jään lujuusominaisuuksien ja paksuuden vaihteluista sekä jään suurella kuormitusnopeudella tapahtuvasta nopeasta murtumisesta johtuvat satunnaiset voimavaihtelut voidaan kuvata satunnaisvoimafunktiolla ja rakenteen vaste ratkaista yhtälöä (15) käyttäen. Käytännössä tehokkaampi menettely on määrittää ensin kuorman tehospektri ja sitten ratkaista taajuustasossa rakenteen dynaamisen vasteen spektri, so. energiasisältö tai sitä vastaavat amplitudit kullakin taajuudella.

Nyt suunnitellulla tuulivoimaloiden asennusalueella merkittävän paksuisen jään liike on siksi vähäistä, että satunnaisvasteen laskeminen ei ole tarkoituksenmukaista.

### 4.3.4 Oletettu jäävoimafunktio

Hitaalla jään liikenopeudella esiintyvän sahanteräaallon muotoisen jäävoiman, kuva 7, aiheuttama dynaaminen vaste voidaan ratkaista myös integroimalla yhtälöt (15). Jos jään liike on hidasta, riittää yhden jäävoimalaukeamisen vaikutuksen analysointi. Jos laukeamisesta syntynyt transientti ei ole ehtinyt vaimentua ennen seuraavaa laukeamista, on integroitava niin monta jaksoa, että seurannaisvaikutukset ovat päässeet täysin kehittymään.

Mitoituksen kannalta konservatiivinen oletettu jäävoimafunktio saadaan olettamalla sahanteräaallon jaksonpituudeksi  $T$  rakenteen ominaismuodon jakson pituus  $T_0$  ja voiman maksimisuuruudeksi  $F_{\max}$  yhtälön (1) mukainen jäävoima. Analyysi on toistettava kaikille tärkeimmille alhaisille ominaismuodoille, käytännössä aina 10 Hz taajuuteen asti.



*Kuva 7. Sahanteräaallon muotoinen jäävoimafunktio.*

Sovellutuksena lasketaan 1 MN jäävoiman vaste oletetulle 1,5 MW tuulivoimalalle 6,0 m syvässä vedessä. Torni on 67 m korkea, halkaisija huipulla 2,3 m ja vesirajassa 4,0 m. Seinämäpaksuus kasvaa huipun 10 mm:stä vesirajan 30 mm:iin. Vesirajan alapuolella peruspaalun halkaisija on 4 m ja seinämä 40 mm. Tornin massa on 100 t ja roottorin sekä konehuoneen massa 78 t. Roottorin lapojen joustoa ei ole mallinnettu, jonka takia lasketut ominaistajuudet ovat todellista suurempia.

Perustamistavan vaikutusta vertaillaan käyttämällä sekä kasuuniperustusta että junttapaalua. Vesisyvyys on 6,0 m ja juntaussyvyys 16 m. Maaperän tuentajäykkyytenä junttapaalulle on käytetty Kemi-2-majakan vastaavasta 4 m paalun maaperämallista saatua. Kasuuni on 24 m halkaisijaltaan ja sen alustajäykkyytenä on käytetty Suomen leijonan majakan kasuunille käytettyä tuentajäykkyyttä.

Jääkuorma, 1 MN, on laitettu kuvan 7 mukaisesti resonanssiin vuoron perään alhaisimmille rakenteen ominaismuodoille. Jos herätetaajuus on yli 2 Hz, jäävoiman vaihteluamplitudina käytetään vain 0,5 MN:a. Taulukkoon 7 on kerätty tärkeimpiä tuloksia dynaamisen vasteen analyysistä ja osa tuloksista on esitetty graafisesti liitteessä 3. Myös staattinen taipuma on laskettu maksimi tuulikuormalle ja samanaikaisesti vaikuttavalle 2 MN jäävoimalle. Taipuma on vain 20 % pienempi kasuuniperustuksella.

Tulokset osoittavat, että perustuksella ei ole suurta merkitystä ensimmäiseen ominaismuodon taajuuteen. Sen sijaan dynaaminen vaste ja korkeammat muodot poikkeavat toisistaan selvästi. Kasuuniperustus ei ole lainkaan herkkä jään aiheuttamille värähtelyille ja se voitaisiin toteuttaa ilman kartio-osaa vesirajassa. Junttapaalulla on odotettavissa jään aiheuttamia värähtelyjä ominaismuodoilla

2, 3 ja 4, joten kartion asentaminen on suositeltavaa. Resonanssivasteen kehittyessä kiihtyvyytensä roottorin kohdalla jää 12 jäävoimapulseeraamisen jälkeen noin 0,11 g tasolle. Teräsrakenteisten merimerkkien kokemusten pohjalta näin laskennallisesti ennustetut dynaamiset vasteet ovat selvästi suurempia, kuin mitä luonnossa on havaittu. Myös jos analyysi tehdään itseherätteen dynaamisen jäävoimamallin pohjalta, saadaan alhaisempi dynaaminen vaste.

*Taulukko 7. Dynaaminen vertailu.*

	Kasuuni	Junttapaalu
1. ominaistajuus	0,41 Hz	0,38 Hz
2. ominaistajuus	0,90 Hz	2,50 Hz
3. ominaistajuus	3,06 Hz	6,4 Hz
4. ominaistajuus	8,34 Hz	11,3 Hz
Max. siirtymä p.p.	37 mm	324 mm
Max kiihtyvyytensä	16 gal	111 gal
Staattinen taipuma	0,78 m	0,96 m

Kasvatettaessa vesisyvyyttä ei junttapaalun dynaamisessa käyttäytymisessä tapahdu niin merkittävää muutosta kuin kasuuniperustuksessa. Suuri osa perustuksen joustosta tapahtuu syvällä pohjamaassa. Jäävoiman momentille alttiin teräspaalun pituuden kasvaessa kasuunin päällä herkkyys jään aiheuttamille värähtelyille lisääntyy ja kiihtyvyytensä kasvaa.

Sovellutuslaskelma on suuntaa antava eikä sen käyttämä maaperä perustu mihinkään todelliseen kohdealueen maaperämalliin. Pehmeämmällä alustalla ominaisjaksoluvut laskevat ja herkkyys jään aiheuttamille värähtelyille lisääntyy. Tuloksia voi skaalata suoraan esiintyvien jäävoimien suhteella nyt käytettyyn. Jään reunan iskun aiheuttamaa kiihtyvyytensä voi arvioida samansuuruiseksi kuin ensimmäisen jäävoimalaukeamisen aiheuttamaa. Kartiolla dynaaminen vaste on lähinnä yksittäisten jäävoimalaukeamisten aiheuttamaa. Esimerkiksi junttapaalulla 1 MN laukeaminen aikaansaa noin 0,046 g kiihtyvyyden.

### 4.3.5 Itseherätteinen dynaaminen jääkuorma

Todellisuudessa jään murtokuorma riippuu kuormitusnopeudesta, johon puolestaan vaikuttaa rakenteen liiketilasta johtuva osuus. Jäävoimafunktiota ei tunneta etukäteen. Dynaamiset tasapainoyhtälöt tulevat silloin muotoon

$$[k]\{u\} + [d]\{\dot{u}\} + [m]\{\ddot{u}\} = \{F(\{u\}, \{\dot{u}\})\} . \quad (16)$$

Kuormitusvektorissa riippuvuus siirtymätilasta ottaa huomioon jään tunkeutumisen rakenteeseen ja mahdollisen raon eli jään reunan irtoamisen kosketuksesta rakenteeseen. Riippuvuus nopeudesta vaikuttaa jään murtumislujuuteen. Saaduissa tasapainoyhtälöissä aika ei esiinny lainkaan vapaana parametrina. Värähtelyjen syntymisen ehtona on se, että tasapainoyhtälöt johtavat dynaamisesti epästabiliin tilanteeseen, jolloin itseherätteisiä värähtelyjä syntyy. Tällöin värähtelyjen amplitudit kasvavat nopeasti kunnes saavuttavat vakio-olotilan eli raja-amplitudit. Yhtälöiden (16) käyttö edellyttää jään lujuuden kuormitusnopeusriippuvuuden tuntemista. Ratkaisualgoritmeja on esitetty lähteissä (Määttä, 1987 ja Kärnä, 1992). Itseherätteisten värähtelyjen mallia on käytetty Suomessa teräsrakenteisten merimerkkien, majakoiden ja reunamerkkien suunnittelussa.

## 5. Aaltokuormat

Tässä luvussa käsitellään aaltokuormia Perämerelle sijoitettavan tuulivoimalaitoksen mitoituksen kannalta.

### 5.1 Aaltojen synty ja vaikutukset

Aaltoliikkeessä vesipartikkelit liikkuvat ympyrän tai ellipsin muotoista rataa vesisyvyydestä riippuen. Ilmiö näkyy pinta-aaltolina eli Rayleigh-aaltolina, joilla on tietty aallonpituus  $L$ , korkeus  $H$ , etenemisnopeus  $V$  ja jakson pituus  $T$ . Nämä ovat yhteydessä toisiinsa seuraavien likikaavojen mukaisesti:

$$L = VT \quad (17)$$

$$L = \frac{2}{3} V^2 \quad (18)$$

$$T = \frac{2}{3} V \quad (19)$$

Tarkemmat aaltoparametrien laskentakaavat on esitetty Rakenteiden kuormitusohjeissa (RIL, 1997).

Aallot syntyvät joko tuulen tai virtausten aiheuttamina. Perämeren rannikolla tuuli on ainoa merkittävä tekijä. Aallon korkeus riippuu tuulen voimakkuudesta, kestoajasta ja vapaasta matkasta, jossa aalto voi kasvaa. Merkittävä aallonkorkeus  $H_s$  tarkoittaa keskiarvoa kolmannesosasta korkeimpia aaltoja. Aallonkorkeus puolestaan on aallon harjan ja pohjan korkeusero. Täysin kehittyneen merkittävän syvän veden aallonkorkeus (m) voidaan arvioida kaavalla

$$H_s = \frac{\sqrt{WS}}{30} \quad (20)$$

jossa  $W$  on tuulen nopeus (km/h) ja  $S$  aallon kasvumatka (km). Esimerkiksi Perämeren yli 100 km matkan puhaltanut 20 m/s = 72 km/h tuuli aikaansaa noin 3-metrinen merkittävän aallonkorkeuden. Tämän kehittyminen edellyttää vähintään 6 tuntia kestävästä tuulta. Syntyneen aallon jakson aika on noin 7 sekuntia, aallon pituus noin 70 m ja nopeus 10 m/s. Aallon jakson aika on

kriittinen, mikäli se osuu lähelle tuulivoimalan ominaisjaksoja, jolloin resonanssivaara esiintyy.

Syvän veden aallon lähestyessä rantaa pohjakitka hidastaa vesipartikkelien liikettä ja aallon etenemisnopeutta. Osa aallosta heijastuu takaisinpäin aiheuttaen aallon korkeuden kasvamisen ja aaltomuodon jyrkkenemisen. Aallon pituus lyhenee, mutta jakson pituus säilyy. Muutos alkaa, kun veden syvyys tulee pienemmäksi kuin puolet aallon pituudesta.

Perustettaessa tuulivoimaloita matalaan veteen rannikon läheisyydessä ollaan aina tekemisissä matalan veden aaltojen kanssa huolimatta myrskyn nostattamasta keskivedenpinnasta. Pohjan muoto aiheuttaa kaikkialla aaltoliikkeen taittumista ja johtaa interferenssiin eri suunnista taittuneiden aaltojen kanssa esimerkiksi saaren tai matalikon edustalla. Seurauksena voi olla huomattavasti suurempi aallon korkeus ja energia kuin alkuperäisellä syvästä vedestä saapuneella aallolla. On myös huomattava, että rannikkoa voi lähestyä maininkeja eri suunnasta aikaisemmin vallinneen tuulen jäänteinä tai mainingit voivat taittua esimerkiksi niemen taakse, jossa ne aiheuttavat interferenssin vallitsevien tuuliaaltojen kanssa.

Pohjaan tuetun sylinterimäisen rakenteen kohdatessaan aalto joko menee muotonsa säilyttäneenä läpi, jos rakenteen halkaisija on selvästi pienempi kuin aallon puolipituus, tai heijastuu osaksi takaisin rakennehalkaisijan kasvaessa. Jos rakenteen halkaisija on tuntuvasti suurempi kuin aallon pituus, koko aalto heijastuu takaisin aiheuttaen voimakkaita interferenssi-ilmiöitä. Tuulivoimaloiden perustukset ovat siksi pieniä, että suurten merkittäviä aaltovoimia aiheuttavien aaltojen diffraktiota ei esiinny. Suuria aaltoja ei voi myöskään esiintyä nyt suunnitellulla vesisyvyysalueella. Sen sijaan osa pienemmistä aalloista heijastuu taaksepäin korottaen rakennetta vastaan nousevan aallon korkeutta.

Aaltojen aiheuttama vesipartikkelien liike aiheuttaa eroosiota, joka vielä korostuu rakenteen vieressä virtausnopeuden kiihtyessä. Myrskyn nostattama tulva-aalto aiheuttaa myös nettovirtausta, mikä superponoituu aaltojen aiheuttamaan vesihiukkasten nopeuteen. Eroosion ennustaminen joko laskennallisesti tai mallikokeilla on epävarmaa. Tuulivoimaloiden perustuksissa on käytettävä kokemusperäisiä muissa vastaavissa merirakenteissa käytettyjä hyväksi todettuja eroosiosuojausmenetelmiä (kohta 7.4).



Tuulivoimalan pystytyksessä aaltojen vaikutus on otettava huomioon myös pystytyksen kestoajan, käytetyn kaluston ja uittovakavuuden kannalta. Paikallisten aaltotilastojen perusteella voidaan arvioida, mihin vuodenaikaan asennukset ovat mahdollisia ja kuinka pitkiä asennuskelpoisia sääikkunoita esiintyy.

## 5.2 Aaltokuormien laskentamenetelmä

Yleensä aaltokuormat vaativat numeerisia ratkaisumenetelmiä. Käyttökelpoisia ns. keittokirjakaavoja on vähän ja vain hyvin yksinkertaisille rakenteille. Rakenteen aaltovoimien laskemisessa on kaksi perustapausta, kokonaisvoima ja paikallinen paine. Kokonaisvastusvoima lasketaan Morisonin kaavasta (21), joka huomioi sekä veden kitkan että hitausvoimat. Seuraavassa tarkastelussa sitä on käytetty merituulivoimalan aaltokuormien suuruusluokka-arviointiin. Paikallinen veden paine on dynaaminen paine, joka voidaan laskea, kun aallon harjan vesipartikkelien nopeus tunnetaan. Nopeuteen vaikuttaa edellä laskettu aallon etenemisnopeus ja siihen superponoituvat taittumis- ja heijastusilmiöistä johtuvat lisätekiöt. Tarkka laskeminen on vaikeata. Käytännössä on ilmoitettu jopa 300 kPa:n paikallisia paineita. Paine voi interferenssilmiöiden takia kohdistua huomattavasti korkeammalle, kuin mitä nimellinen merkittävä aallon korkeus edellyttää.

Morisonin kaava antaa aaltokuorman hoikalle, pystysuoralle sylinterille kahden voimakomponentin, hitausvoiman ja vastusvoiman, summana (Herbich, 1991, s. 9):

$$f(t) = f_I(t) + f_D(t) = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u}(t) + \frac{1}{2} C_D \rho D |u(t)| u(t), \quad (21)$$

missä  $f$  on kokonaisaaltokuorma sylinterin pituusyksikköä kohti,  $f_I$  on aaltokuorman hitausvoimakomponentti sylinterin pituusyksikköä kohti,  $f_D$  on aaltokuorman vastusvoimakomponentti sylinterin pituusyksikköä kohti,  $C_M$  ja  $C_D$  ovat kokemukseräiset vastus- ja hitausvoimakertoimet,  $\rho$  on veden tiheys,  $D$  on sylinterin halkaisija ja  $u$  on vesipartikkelin nopeus. Aaltokuorma on ajan  $t$  funktio, ja piste merkitsee ajan suhteen otettua ensimmäistä derivaattaa. Huomattavilla yksinkertaistuksilla voidaan johtaa seuraavat lausekkeet hitausvoima- ja vastusvoimakomponenttien maksimiarvoille (Herbich, 1991, s. 12):

$$f_{I_{\max}} = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u}_m \quad (22)$$

ja

$$f_{D_{\max}} = \frac{1}{2} C_D \rho D u_m^2, \quad (23)$$

joissa  $f_{I_{\max}}$  on hitausvoimakomponentin maksimi-arvo sylinterin pituusyksikköä kohti,  $f_{D_{\max}}$  on vastusvoimakomponentin maksimi-arvo sylinterin pituusyksikköä kohti,  $u_m$  on vesipartikkelin maksiminopeus ja piste ilmaisee ajan suhteen otettua ensimmäistä derivaattaa. Linearisesta aaltoteoriasta voidaan johtaa vesipartikkelin nopeuden ja kiihtyvyyden keskinäinen riippuvuus (Herbich, 1991, s. 13)

$$\dot{u}_m = \omega u_m, \quad (24)$$

missä  $\omega$  on aallokon taajuus määriteltynä lausekkeen (25) mukaisesti

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (25)$$

ja  $T$  on aallon periodi. Edelleen voidaan yksinkertaistaa, että (Herbich, 1991, s. 14)

$$u_m = \frac{gHT}{2L}, \quad (26)$$

missä  $H$  on aallonkorkeus ja  $L$  on aallonpituus.  $L$  voidaan määrittää syvän veden tapauksessa, mikä tosin rannikolle rakennettavan tuulivoimalan tapauksessa on kyseenalainen oletus, (Herbich, 1991, s. 14)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}. \quad (27)$$

Yhtälöiden (21) - (27) avulla voidaan siis kirjoittaa

$$f_{I_{\max}} = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\pi g H}{L} \quad (28)$$

ja

$$f_{D\max} = \frac{1}{2} C_D \rho D \left( \frac{gHT}{2L} \right)^2 . \quad (29)$$

$C_M$ :lle ja  $C_D$ :lle löydetään käyrästöistä kokemusperäiset arvot ns. Keulegan-Carpenter- eli KC-parametrin funktiona, esim. Herbich (1991, s. 13). KC-parametri määritellään (Herbich, 1991, s. 2):

$$KC = \frac{u_m T}{D} . \quad (30)$$

Yhtälöiden (28) ja (29) avulla saadaan aaltokuorman voimakomponenttien maksimiarvot sylinterin pituusyksikköä kohti. Säännöllisessä aaltoliikkeessä vesipartikkelien maksiminopeus ja maksimikihtyvyys eivät kuitenkaan esiinny samanaikaisesti, jolloin myöskään aaltokuorman vastus- ja hitausvoimakomponenttien maksimiarvot eivät esiinny samanaikaisesti. Siksi kokonaisaaltokuorma on

$$f_{\text{aaltok}} = \xi f_{\text{Imax}} + \eta f_{\text{Dmax}} , \quad (31)$$

missä  $\xi$  ja  $\eta$  ovat kertoimia, jotka ottavat huomioon vesipartikkelin nopeuden ja kiihtyvyyden vaihe-eron aaltoliikkeessä. Säännölliselle aaltoliikkeelle on tässä tarkastelussa oletettu sinimuoto, jonka avulla ja ottaen lisäksi huomioon, että vastusvoimakomponentti on verrannollinen nopeuden neliöön, on laskettu  $\xi$ :n ja  $\eta$ :n arvot rakenteen aaltokuormatarkastelua varten. Konservatiivisempi aaltokuormaennuste saadaan, jos  $\xi$ :lle ja  $\eta$ :lle käytetään samanaikaisesti arvoa 1. Erityisesti epäsäännöllisen aallokon kyseessä ollessa saattaa tällaisen konservatiivisemmankin ennusteen käyttö olla perusteltua.

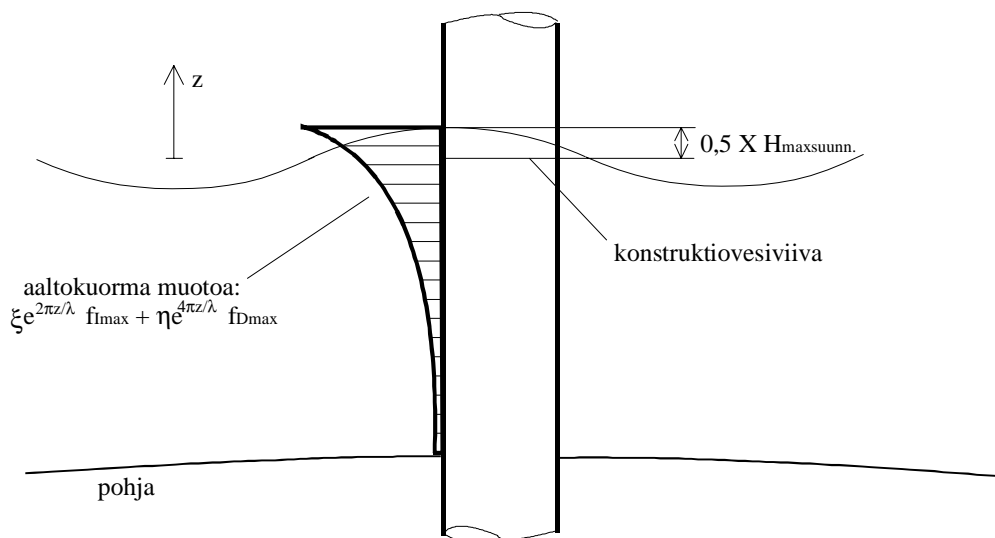
Laskelmissa maksimivoimien vaikutuskorkeudeksi voidaan ottaa rakenteen vesiviivan korkeus, johon lisätään puolet maksimiaallonkorkeudesta. Sylinterin kokonaiskuorma saadaan integroimalla pituusyksikköä kohden lasketut kuormat maksimivoiman vaikutuskorkeudelta pohjaan. Integrointia varten voimakomponenttien voidaan olettaa pienenevän alaspäin siirryttäessä seuraavasti (Faltinsen, 1990, s. 224):

$$f_{Iz} = e^{2\pi z/\lambda} f_{\text{Imax}} \quad (32)$$

ja

$$f_{Dz} = e^{4\pi z/\lambda} f_{Dmax} , \quad (33)$$

joissa  $z$  on syvyyskoordinaatti. Kuva 8 selventää aaltovoiman jakautumaa rakenteen syvyys suunnassa.



Kuva 8. Pystysuoran sylinterimäisen rakenteen aaltokuorman periaatekuva.

### 5.3 Aaltokuormien suuruusluokka Perämerellä

Perämerellä on mitattu aaltoja Suomen vesialueella vain yhden kerran. Merentutkimuslaitos on suorittanut mittaukset vuosina 1980 ja -81 Ulkokallan läheisyydessä paikassa, jonka koordinaatit ovat  $64^{\circ}19,1' \text{ N}$  ja  $23^{\circ}21,5' \text{ E}$ . Veden syvyys mittausta paikalla on 42 m. Mittausten tuloksena saatiin suurin merkitsevä aallonkorkeus  $H_s = 3,1 \text{ m}$ . Suurin yksittäinen aalto, joka mitattiin, oli 5,6 m. Käyttäen näitä mittaustuloksia lähtötietoina Merentutkimuslaitos on laskenut aaltoarviot merituulivoimaloiden suunnitelluille perustamispaikoille (Pettersson, 1997). Laskelmissa, joissa veden mataloituminen, saarten varjostaminen ja

rannikon aiheuttama vaimentuminen on otettu huomioon, on saatu kerran 30 vuodessa esiintyviksi suurimmiksi merkitseviksi aallonkorkeuksiksi eri alueilla seuraavat:

- Munakari–Hällskärsudden,  $H_s = 1,7$  m, suurin aallokko pohjoistuulella
- Ohtakari,  $H_s = 3,5$  m
- Tauvo,  $H_s = 3,3$  m
- Hailuoto–Siikajoki,  $H_s = 1,4$  m, itätuuli voi kasvattaa yhtäsuuren aallokon kuin länsituulikin
- Kellon Kraaseli,  $H_s = 0,9$  m.

Merkitsevä aallonkorkeus, joka antaa arvion todennäköisimmin kohdattavalle aallonkorkeudelle, määritellään korkeimman kolmanneksen aaltojen korkeuksien keskiarvona. Rakenteiden suunnittelussa ollaan yleensä kuitenkin konservatiivisempia, ja siksi suunnittelua varten määritellään merkitsevää aallonkorkeutta suurempi suunnittelu-aallonkorkeuden maksimi (*design extreme value*). Suurin suunnittelu-aallonkorkeus on sellaisen aallon korkeus, joka ylitetään yhden prosentin todennäköisyydellä, kun tietyn merkitsevän aallonkorkeuden alueella kohdataan  $N$  aaltoa. Suurin suunnittelu-aallonkorkeus,  $H_{\max\text{suunn.}}$ , määritellään lausekkeen (34) mukaisesti (Newman, 1982, s. 318–319).

$$H_{\max\text{suunn.}} = \sqrt{\frac{1}{2} \log\left(\frac{N}{0,01}\right)} H_s . \quad (34)$$

Lauseke (34) ei ole kovin herkkä kohdattujen aaltojen lukumäärälle. Esim.  $N:n$  arvolla  $10^6$  suurin suunnittelu-aallonkorkeus saadaan kertomalla merkitsevä aallonkorkeus kahdella. Tätä kerrointa on tässä tarkastelussa käytetty merituulivoimaloiden suunnitelluilla perustamisalueilla. Kuten edellä on jo mainittu, tässä tarkastellut merituulivoimalat rakennettaisiin suhteellisen matalaan veteen, jossa osa syvän veden aaltoliikkeen perusteella tehdyistä oletuksista on kyseenalaisia. Siksi edellä saatu kerroin kaksi saattaa joissain tapauksissa olla liian suuri. Sitä käyttämällä saadaan aaltokuormalle kuitenkin laskennallinen, joskin konservatiivinen, arvio.

Aallokon periodista Perämereltä ei ole saatavissa mittausdataa, mutta Selkämereltä on olemassa mittaustuloksia vuosilta 1974–1975 (Karppinen, 1989, kuva A4-2). Näiden mittaustulosten ja arvioitujen merkitsevien aallonkorkeuksien avulla on merituulivoimaloiden suunnitelluilla perustamisalueilla arvioitu aallokon merkitsevät periodit, jotka on esitetty taulukoissa 8 ja 9.

Vedensyvyysinä on laskelmissa käytetty 10 m:ä Tauvon ja Ohtakarin alueilla sekä 5 m:ä Munakari–Hällskärsuddenin, Hailuodon–Siikajoen ja Kellon Kraaselin alueilla.

Rakenteena tarkastellaan pystysuoraa sylinteriä, jolle Morisonin menetelmä soveltuu. Sylinterin halkaisijana käytetään 3,0 m:ä ja 10,5 m:ä. Pienempi halkaisija vastaa tuulivoimalan tornin alaosan halkaisijaa. Suurempi halkaisija on vesiviivalle asennettavan jäänmurtamiskartion maksimihalkaisija. Voimalan vedenalainen perustus jätetään laskelmissa huomioimatta.

Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty aaltokuorma-arvioiden tulokset.

*Taulukko 8. Aaltokuorma-arviot halkaisijaltaan 3,0 m:n pystysuoralle sylinterimäiselle rakenteelle merituulivoimaloiden suunnitelluilla perustamispaikoilla.*

	Munakari– Hällskärsudden	Ohtakari	Tauvo	Hailuoto– Siikajoki	Kellon Kraaseli
Merkitsevä aallonkorkeus [m]	1,7	3,5	3,3	1,4	0,9
Suurin suunnittelu- aallonkorkeus [m]	3,4	7,0	6,6	2,8	1,8
Aallokon periodi [s]	3,3	6,4	6,0	2,8	2,0
Veden syvyys [m]	5	10	10	5	5
Aaltokuorma [MN]	0,22	0,33	0,33	0,19	0,20

*Taulukko 9. Aaltokuorma-arviot halkaisijaltaan 10,5 m:n pystysuoralle sylinterimäiselle rakenteelle merituulivoimaloiden suunnitelluilla perustamispaikoilla.*

	Munakari- Hällskärsudden	Ohtakari	Tauvo	Hailuoto– Siikajoki	Kellon Kraaseli
Merkitsevä aallonkorkeus [m]	1,7	3,5	3,3	1,4	0,9
Suurin suunnittelu- aallonkorkeus [m]	3,4	7,0	6,6	2,8	1,8
Aallokon periodi [s]	3,3	6,4	6,0	2,8	2,0
Veden syvyys [m]	5	10	10	5	5
Aaltokuorma [MN]	2,71	4,51	4,44	2,32	2,39

## 5.4 Yhteenveto aaltokuormista

Lasketut aaltokuormat ovat jääkuormiin verrattuna niin suuria, että on kiinnitettävä huomiota myös niihin nyt tutkittavien merituulivoimaloiden suunnittelussa. Tuulivoimalan tarkemman suunnittelun yhteydessä suositellaan aaltokuormien tarkempaa määrittelyä jollakin soveliaalla numeerisella menetelmällä, koska

- tässä lasketut aaltokuormat ovat vain suuruusluokka-arvioita. Käytetty menetelmä soveltuu sylintereille ja on silloinkin suuri yksinkertaistus. Menetelmä ei kykene huomioimaan tuulivoimalan tornin alaosaan asennettavaa jäätä murtavaa kartiota eikä voimalan vedenalaista perustusta.

- aallon murtuessa ja lyödessä voimalan torniin, voi syntyä vesi-iskuja joita ei kyetä ennustamaan Morisonin menetelmällä.

- aaltokuormat ovat luonteeltaan vaihtuvia. Niiden yhteydessä olisi rakenteelle suoritettava myös väsymislujuustarkastelu. Samoin olisi varmistettava, ettei aaltokuormien taajuus ole sellainen, joka saattaisi resonoida tuulikuormien kanssa.

## 6. Jäänhallintatekniikat

Jäiden hallintatekniikoiden tavoitteena on estää jäävaikutukset hyötyrakenteissa pysäyttämällä jään liike ennen rakennetta. Käytössä on kaksi peruseriaatetta: jääkentän ankkuroivat kiinteät esteet ja jääkasautumisen hallinta.

Käytännössä lisäkustannuksia aiheuttavat esteiden rakentamiset voidaan välttää Suomen rannikolla valitsemalla sijoituspaikat siten, että niiden ympärillä on luonnollisia esteitä. Luonnostaan pohjassa olevat kivet, karikot, saaret ja ranta ankkuroivat paksun jääkannen paikoilleen. Ainoastaan ohut jää lähtee liikkeelle myrskyn nostattaman veden pinnan edistäessä ankkuroinnin irtoamista. Ohuen jään aiheuttamat jääkuormat rakennetta vasten ovat kuitenkin pieniä.

### 6.1 Kiinteät esteet

Rannikon ollessa avoin ilman saaria ja karikoita voidaan tehdä keinotekoisia karikoita ruoppaamalla sekä käyttäen suuria kivilohkareita, erikseen valmistettuja betonikappaleita tai junttapaaluja, jotka sitovat jääkanta paikoilleen suojeltavien rakenteiden ulkopuolella. Kukin ankkurikohde vastaanottaa voiman, joka voidaan arvioida jäävoimakaavasta 1. Ankkurointikykyä rajoittavana tekijänä on useasti irrallisen kappaleen liukumisvastus pohjassa.

Mitoitus perustuu siihen, että ankkurointivoima ylittää jäätä ajavan voiman tai liikkuva jääkenttä lommahtaa, kaava 11. Esimerkiksi, jos halutaan saada 300 m leveän ankkuroinnin edessä 40 cm paksu jääkenttä lommahtamaan, tarvitaan 177 MN ankkurointivoima. Tuulen jäätä ajava voima on tätä tuntuvasti pienempi. Kun jääkenttä kerää tuulen kitkavoiman  $20 \text{ km}^2$  alueelta 30 m/s myrskyssä, on ajava voima noin 45 MN. Näin esimerkiksi 300 m suojaus edellyttää vähintään 11 kappaletta 4 MN kapasiteetin omaavia paaluja tai 4 kappaletta ruopattuja jyrkkäreunaisia 15 m halkaisijaisia keinosaaria. Keinosaarilla on aaltojen aiheuttama eroosio-ongelma.

Suuruusluokka-arvio osoittaa, että jään ankkurointi tulee kalliiksi, jos luonnolliset ankkurit puuttuvat.



## 6.2 Jääkasauman hallinta

Jääkasauman hallinta on periaatteessa tehokkaampi menetelmä kuin kiinteät esteet. Siinä aiheutetaan jään murtuminen halutussa kohdassa, jolloin murtuneet jäälohkareet muodostavat kasauman ja ankkuroivat taakseen jäävän jääkentän. Ankkurointimassana käytetään itse asiassa jäätä, joka halutaan pysäyttää. Luonnossa tällaista kasautumista tapahtuu matalikoilla, jossa karikot eivät ulotu välttämättä edes veden pinnan yläpuolelle.

Keinotekoinen jääkasan muodostaja saadaan ruoppaamalla suojeltavan rakenteen edustalle karikko esimerkiksi noin 30 m rakenteen eteen. Rannikon läheisyydessä, jossa jään liike on pääasiassa yhdestä suunnasta, ruoppausvallin ei tarvitse olla pitkä. Vallin muodon tulee edistää jään taivutusmurtoa mutta estää jään yhtenäinen liukuminen vallin yli. Tämä aikaansaadaan kynnyksellä vallin luiskassa. Ruopatun vallin ongelmana on eroosio. Tarvittavan eroosiosuojauksen tekeminen tulee kalliiksi.

Käytännössä kokeilematon, mutta ilmeisesti toimiva ja edullisempi vaihtoehto on tehdä joko suurista kivenlohkareista, teräksestä tai betonista noin viiden metrin välein yksittäisiä kapeita kiilamaisia esteitä, jotka aikaansaavat jään taivutusmurron ja jääkasan muodostuksen. Kiilamainen muoto mahdollistaa kevyet esteet, sillä jään paino auttaa niitä ankkuroitumaan pohjaan. Kapeus taas vähentää eroosio-ongelmaa.

## 7. Offshore-perustustekniikat

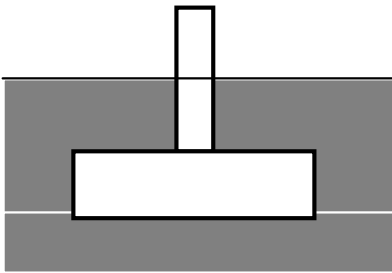
Jäätyvillä merialueilla olevat rakenteet ovat alttiina ankarille ympäristön rasituksille, kuten korroosiolle, eroosiolle sekä jää- ja aaltokuormille. Perusrakenteiden muotoilulla voidaan pienentää jääkuormia merkittävästi. Mitoituksen tulee ottaa huomioon sekä paikalliset korkeat jääpaineet että laajalta alalta kertyvät kokonaisjääkuormat sekä staattisina että dynaamisina.

Tässä luvussa käydään läpi Perämeren olosuhteissa käytettävät merirakenteiden perustustekniikat, Euroopassa toteutettujen merituulivoimalaitosten perustustekniikat sekä suunnitelmat Perämerelle soveltuvaksi tuulivoimaperustukseksi.

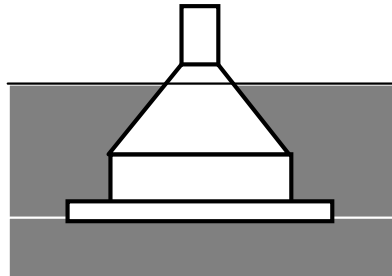
### 7.1 Merirakenteet jäissä

Perinteinen vesirakenteen perustus on kasuuni, joka sekä pitää massavoimillaan siitä nousevan ylärakenteen pystyssä että estää liukumisen vaakasuunnassa, kuva 9a. Jatkokehitelmä kasuunista on ns. helmoilla varustettu kasuuni, missä helmet tunkeutuvat pohjaan ja lisäävät liukumisvastusta, kuva 9i. Toinen tapa on juntata paaluja kasuunin läpi lisäämään liukumisvastusta, kuva 9j. Paaluilla voi parantaa samalla perustuksen kaatavan momentin kantokykyä. Kasuuni on luonteeltaan massiivinen jäykkä rakenne. Sen mitat riippuvat vallitsevista kuormista ja pohjan kantavuudesta. Kasuuniperustus valmistetaan kuivatelakalla, uitetaan paikoilleen, upotetaan ja painotetaan. Lopuksi tehdään eroosiosuojaus. Kasuuniperustus voidaan toteuttaa suhteellisen matalaan veteen. Uttovakavuus mahdollistaa myös ylärakenteiden asentamisen telakalla.

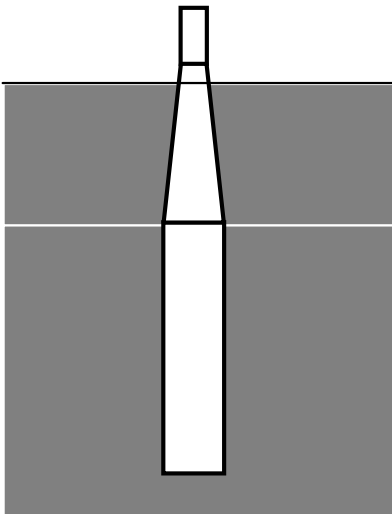
Toinen perinteinen perustamistapa on pohjaan juntattu, kuva 9c, tai kalliokaivoon ankkuroitu paalu, kuva 9e. Kaivo voidaan korvata myös ankkuripulteilla kallioon, kuva 9f. Halkaisija ja perustamissyvyys riippuvat kuormituksista sekä pohjan tiheydestä, kitkasta ja koheesiosta. Paalu on kasuunia kevyempi ja joustavampi ja siten herkempi dynaamisille kuormille. Peruspaalu valmistetaan konepajassa. Se voidaan myös uittaa paikoilleen, nostaa pystyyn, juntata meren pohjaan tai kiinnittää betonilla kallioon kevyellä nosturikalustolla. Yläosan rakenteet asennetaan perustamisen jälkeen. Paaluperustuksilla eroosio ei ole yleensä osoittautunut haitalliseksi.



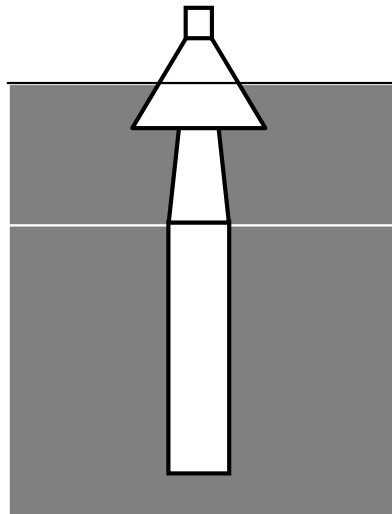
a) Kasuuni



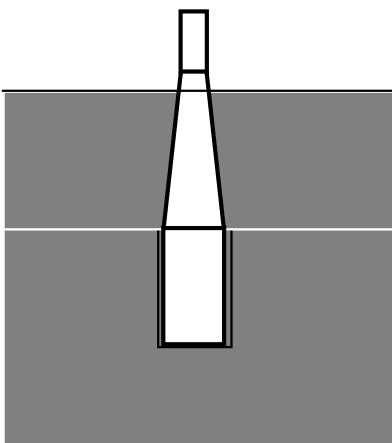
b) Kartiokasuuni



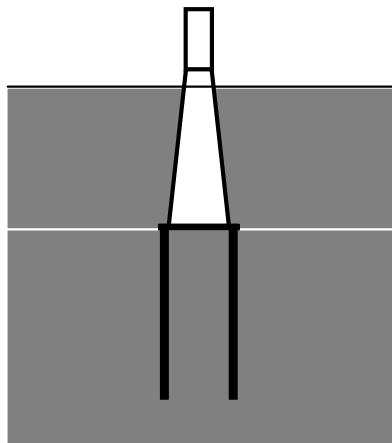
c) Juntapaalu



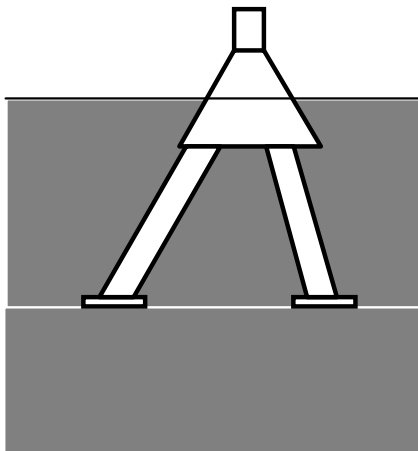
d) Juntapaalu + kartio



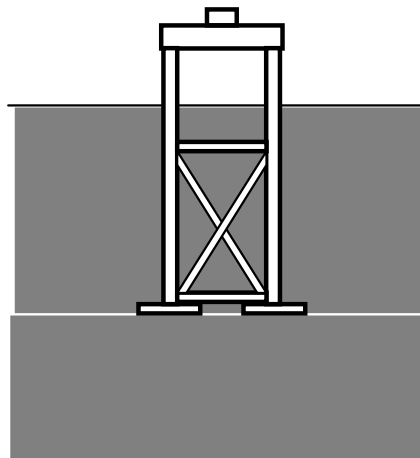
e) Kalliokaivo



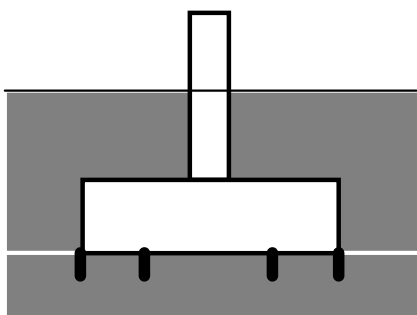
f) Kallioankkurointi



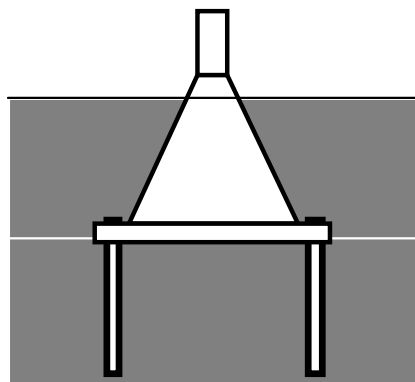
g) Kolmijalka + kartio



h) Ristikko



i) Kasuuni + helmat



j) Kartiokasuuni + paalut

*Kuva 9. Erilaisia perustusvaihtoehtoja.*

Rakenteellisesti tehokkaita joskin monimutkaisempia toteuttaa ovat kolmijalka- ja ristikkoperustukset, kuvat 9g ja h. Ne voidaan ankkuroida pohjakallioon, tai voidaan käyttää läpimeneviä junttapaaluja, mikä on yleistä öljynporaustasanteiden perustuksissa (jacket platform). Kolmijalka saadaan suhteellisen jäykäksi, joten se soveltuu myös jääolosuhteisiin. Ristikko- tai jacket-perustuksilla esiintyy jään kasautumista rakenteen jalkojen väliin ja dynaamiset kuormat voivat olla haitallisia. Kootun kolmijalka- tai ristikkorakenteen asennus edellyttää raskasta kalustoa. Jacket-tyyppisen rakenteen kokoaminen onnistuu kevyellä kalustolla ja edellyttää paalujen junttausta tai

ankkurointia sekä jacket-osan kiinnitystä betoni-injektoinnilla. Ylärakenteet asennetaan perustamisen jälkeen.

Perustuksen muoto vesirajassa ratkaisee, millä tavoin jää murtuu. Pystyrakennetta vasten tapahtuu murskautuminen ja kaltevaa rakennetta vasten taivutusmurto tai leikkautuminen. Kapealla pystyrakenteella voidaan pienentää jäävoimia ja vähentää jään kasautumista, mutta lisääntynyt joustavuus edistää jään aiheuttamien värähtelyjen syntyä. Kalteva tai kartiomainen muoto johtaa jään murtumiseen huomattavasti alhaisemmilla kuormilla kuin murskautuminen pystyrakennetta vasten huolimatta kaltevan rakenteen suuremmasta leveydestä. Myös dynaamiset jääkuormavaikutukset ovat kaltevilla rakenteilla selvästi pystyrakenteita vähäisemmät.

Kartiomainen muoto voidaan toteuttaa kasuunilla, kuva 9b, kartiokauluksella paaluperustuksessa, kuva 9d, tai kapealla lisäpaalutetulla kartiokasuunilla, kuva 9j. Sekä staattisten että dynaamisten jäävoimien suhteen kartio on edullisin muoto vesirajassa, mutta asennuksen aikana vakavuus on huono kartiokasuunin uitto- ja upotusvaiheessa. Kartiokaulus on joko asennettava erikseen peruspaalun asennuksen jälkeen tai yhdessä yläosan kanssa. Täytettäessä kartio betonilla saadaan samalla kiinnitys peruspaaluun ja hyvä paikallisten jääpaineiden kesto.

Kulkutiet rakenteeseen on helpompi toteuttaa pystysuorilla rakennemuodoilla vesirajassa kuin kaltevilla. Aluksen on huomattavasti vaikeampi kiinnittyä kaltevaan rakenteeseen aallokon aiheuttaessa alukseen pystyliikkeitä. Talvella jään kasautuminen kaltevan rakenteen edustalle voi olla ongelma kulkuteiden kannalta.

## **7.2 Tuulivoimaloiden perustukset merellä**

Tähän asti pystytetyissä merituulivoimalaitoksissa on käytetty kolmea perustustyyppiä:

- 1) maanvarainen massiiviperustus, jota oma ja laatan päälle lisätty painomassa pitävät pystyssä (Gravity foundation)

- 2) junttapaalu, joka upotetaan syvälle pohjaan ja pysyy pystyssä maanpaineen ansiosta (Mono Pile)
- 3) kolmijalka, jonka jalat ovat kiinni pohjassa ja tukevat jalkojen yläosaan kiinnitettyä tornia (Tripod).

Kolmijalkaperustus, jota on käytetty ensimmäisessä Ruotsissa toteutetussa hankkeessa, on useissa selvityksissä todettu kustannustehokkaaksi ratkaisuksi vasta syvissä vesissä (yli 15 m), joten sitä ei ole tässä tarkemmin tarkasteltu (Juhl et al., 1997).

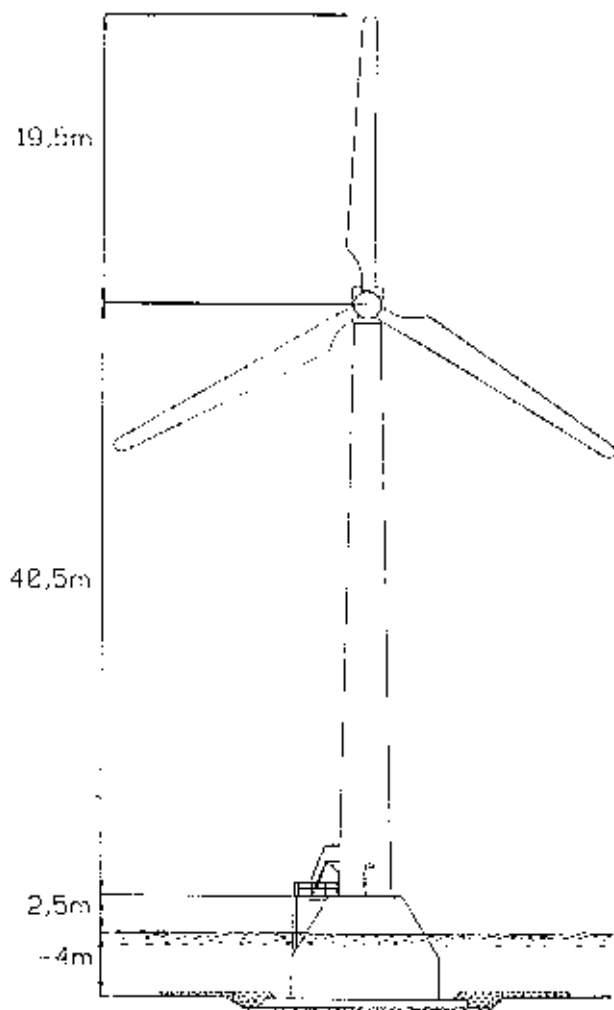
### **7.2.1 Kasuuni / Tunø Knob, Tanska**

Tunø Knobin tuulipuisto pystytettiin vuonna 1995, ja se koostuu kymmenestä 500 kW laitoksesta noin 6 km Jyllannin rannikolta (noin 3 km Tunø saaresta). Veden syvyys on 3,1–4,7 m (kuva 10).

Laitosten perustuksena ovat teräsbetonikasuunit, jotka on mitoitettu aaltokuormien, virtauksen ja tuulikuormien sekä jääkuormien ja tuulivoimalaitoksen aiheuttamien kuormien mukaan. Yksi perustus painaa noin 1 000 tonnia (sis. noin 500 tonnia täyttöhiekkaa). Perustuksen sylinterinmuotoisen alaosan korkeus vaihtelee veden syvyyden mukaan: perustuksen yläosa on 2,5 m merenpinnan yläpuolella. Perustuksiin kuuluu teräksinen tasanne (platform) ja neljä puista suojapaalua (fender piles). Perustuksiin kohdistuvien jäävoimien vähentämiseksi tasanteet ja suojapaalut on mitoitettu murtumaan tietyllä jään paineella (Madsen, 1996).

Perustukset rakennettiin Århusin satamassa tammikuusta kesäkuuhun 1995. Heinäkuussa ne kuljetettiin sijoituspaikalle nosturiproomulla. Ne asennettiin meren pohjaan viedyn kivimurskan päälle ja täytettiin hiekalla. Lopuksi perustusten ympärille asennettiin eroosiosuojaus kivistä.

Tuulivoimalaitokset pystytettiin elokuun alussa 1995 nosturiproomulta. Kymmenen tuulivoimalan pystytykseen kului ainoastaan viisi päivää. Merikaapelien asennus ja voimalaitosten kokoonpanon viimeistely saatiin valmiiksi syyskuussa 1995.

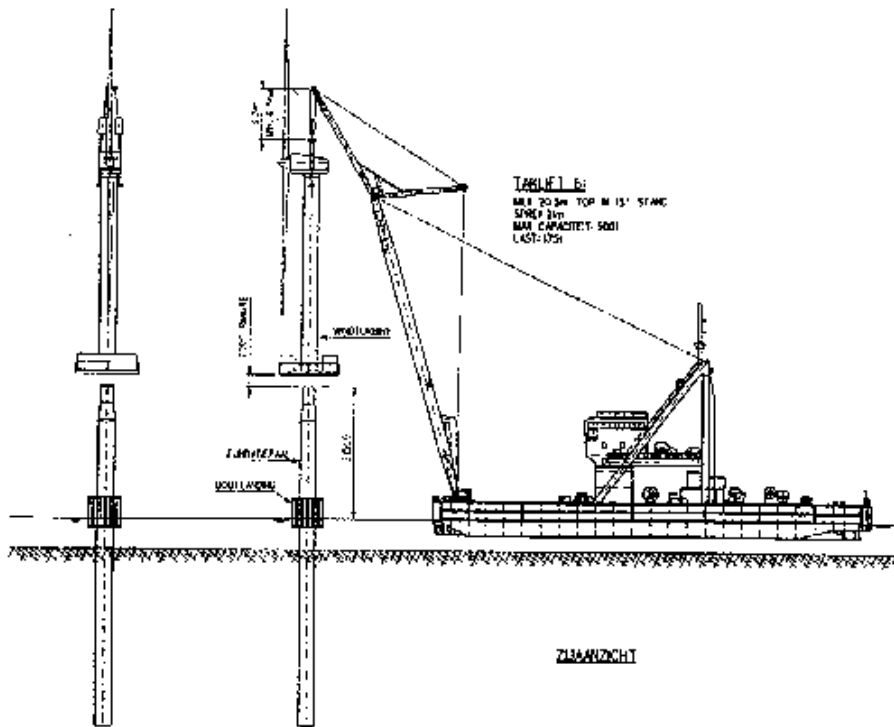


*Kuva 10. Tunø Knobin merituulivoimala.*

Suurten merituulipuistojen pystyttäminen on suunniteltava niin, että merellä tapahtuvan työn osuus sujuu mahdollisimman aikaa säästävasti, muuten esimerkiksi 100 MW tuulivoimaa ei saa asennettua yhden kesän aikana kauemmaksi mantereesta. Tanskan esiselvityksessä betonikasuuni todettiin liian raskaaksi, ja teräskasuuneja pystytään sijoittamaan useampi samaan proomuun, jolloin pystytystyössä säästyy aikaa.

## 7.2.2 Junttapaalu

Tuulivoimalaitos voidaan pystyttää myös 3–4 m halkaisijaltaan olevaan teräspaaluun. Paalu junttataan 15–30 m syvälle meren pohjaan riippuen veden syvyydestä ja maaperästä.



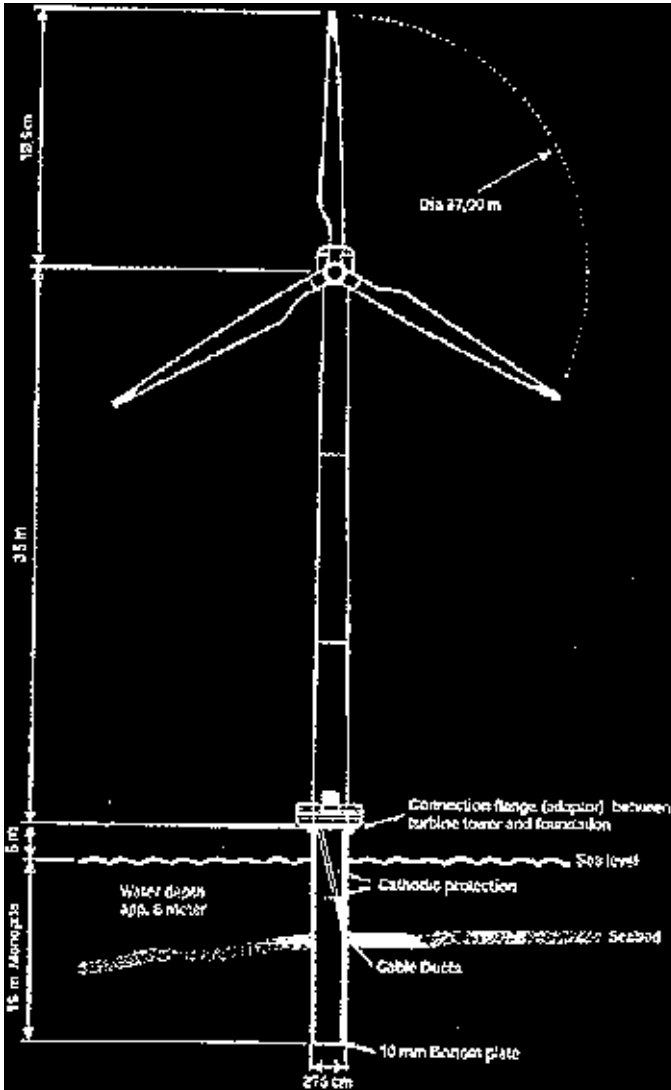
Kuva 11. Tuulivoimalan pystyttäminen junttapaaluperustukseen (NOVEM, 1997).

Junttapaalu on valmistus- ja pystytysteknisesti helpompi ratkaisu kuin kasuuni, koska se käyttää suoraan perinteistä tekniikkaa eikä ole yhtä herkkä huuhtoutumiseroosiolle. Erosiosuojaus pienillä kivillä saattaa olla kuitenkin paikallaan. Ongelmana junttapaalussa on voimalaitoksen ja perustuksen suunnittelu ja mitoitus erityisesti dynaamisten värähtelyiden osalta: jokaista tuulipuiston voimalaa kohti on tehtävä laskelmat, jotka perustuvat meren pohjan maaperätutkimuksiin. Hollannissa suunnitellaan 100 x 1 MW merituulipuiston



toteuttamista junttapaaluperustuksilla (kuva 11, NOVEM, 1997). Junttapaalun soveltuvuus Perämerelle on tarkasteltava erikseen tapauskohtaisesti.

Ruotsin Bockstigenissa syksyllä 1997 toteutetun tuulivoimapuiston perustuksina ovat paalut, joita ei ole juntattu meren pohjaan vaan ne on asennettu kallioon porattuihin syviin aukkoihin (kuva 12).



Kuva 12. Merituulivoimalaitos Bockstigenin tuulipuistossa.

Tuulipuisto koostuu viidestä 500 kW laitoksesta, jotka on sijoitettu noin 4 km Gotlannin rannikosta etelään paikkaan, jossa veden syvyys on noin 6 m. Paaluja varten porattiin 8–10 m syvät reiät meren pohjaan, joka on kovaa kalliota. Tämän jälkeen 2,25 m halkaisijaltaan olevat paalut asennettiin paikalleen ja valettiin sementillä kiinni. Koska maaperä meren pohjassa on kovaa kalliota, paalujen sivuttaisliikkeiden on arvioitu olevan olemattomat.

Tuulivoimalat tuotiin paikalle proomulla ja asennettiin paalujen päälle käyttäen samaa nosturialusta, jolla paalut asennettiin. Käytetty alus muistuttaa öljynporauslauttaa siinä, että se tukeutuessaan meren pohjaan on korkealla meren pinnasta. Projektissa huomattiin, että käytetty alus rajoittaa käytettyä pystytysaikaa, koska esimerkiksi aluksen siirrossa vaaditaan täysin tyyni meri. Myös tuulivoimalaitosten osien kuljetus paikan päälle osoittautui suunniteltua monimutkaisemmaksi.

### **7.3 Perämerelle suunniteltu perustus**

Tuulivoimalan eliniäksi lasketaan 20 vuotta, avomerellä jopa 25 vuotta, jonka jälkeen se joko voidaan purkaa tai siihen vaihdetaan uusi koneisto ja toiminta alkaa uudestaan. Perustukset mitoitetaan kestäämään 50 vuotta, joten korroosion ja rapautumisen kesto ovat tärkeitä perustuksia suunniteltaessa.

Tuulivoimalaitosten perustuksissa käytetään nykyään pääsääntöisesti teräsbetonilaattaa, joka on kohtuullisen yksinkertainen valmistaa ja voidaan rakentaa paikan päällä lähes kaikilla sijoituspaikoilla. Tuulivoimalan teräsbetonilaatan kokoon vaikuttavat tornin korkeus, maaperän geotekninen kantavuus, huokosveden esiintyminen, perustuksen syvyys maan pinnasta ja pohjaveden pinnan korkeus. Esimerkiksi maalle perustettavan 600 kW:n tuulivoimalan teräsbetonilaatan mitat ovat noin 10 x 10 m<sup>2</sup> ja paksuus yli metrin. Vastaava 1,5 MW voimalan laatan sivu on noin 14–17 m ja paksuus reilusti yli metrin.

Perustuksien tärkeimpinä mitoituskriteereinä ovat liikkuvan jään paksuus sekä tornin tyven muoto ja halkaisija. Tuulivoimien osuus kuormituksesta kasvaa suhteessa korkeuteen ja roottorin halkaisijaan, joten megawattiluokan voimalan peruskuormitus on merkittävästi suurempi kuin puolen megawatin. Koska jääkuormat kasvavat suhteessa jään kohtaamaan pinta-alaan eli tornin

halkaisijaan, vähenee jääkuormien merkitys kokonaiskuormituksessa voimalan koon kasvaessa. Meren syvyys vaikuttaa perustusten pystytystekniikkaan. Koska eri tilanteet vaativat erilaisia ratkaisuja, tarkastellaan tässä useita eri vaihtoehtoja.

### **7.3.1 Perustuksien materiaalivalinta**

Perustuksien materiaaliksi valittiin sama ratkaisu kuin maalle pystytettäessä eli teräsbetoni. Tällöin valmistajan toimittama asennuskaulus voidaan kiinnittää samalla tavoin kuin perinteiseen perustuslaattaan. Teräsbetonin korroosionkestävyys on hyvä edellyttäen, että käytetään riittävää suojaetäisyyttä ja betonissa ei esiinny halkeamia. Seuraavissa esimerkeissä on käytetty 60 mm suojaetäisyyttä, joka merkitsee samalla sitä, että rakenteiden minimipaksuus on helposti noin 400 mm. Teräsbetonin paino on ongelma niin kauan, kun perustuksia siirrellään ja rakennetaan. Mikäli perustukset on mahdollista uittaa perille tuulipuistoon, kuljetusongelma vähenee.

Perustusten materiaalivalinta riippuu myös projektin koosta sekä kuljetus- ja pystytystekniikasta. Teräasperustus on betoniperustusta kevyempi kuljetettava, joten teräksinen perustus saattaa olla kustannustehokkaampi, ellei uittoa voida käyttää. Tuulipuistoa rakennettaessa kannattaa tutkia myös teräasperustuksen kustannuskilpailukyky verrattuna betoniin. Teräs soveltuu meriasennuksiin käytettäväksi samoilla periaatteilla, kuin tässä raportissa esiteltävät teräsbetonirakenteet. Käyttämällä riittävää korroosiovaraa sekä hyvää maalauskäsittelyä saadaan elinikä vastaamaan betoniperustusta.

### **7.3.2 Perustustyyppin valinta**

Valittavat perustustyyppit ovat 1) maanvarainen massiiviperustus, 2) junttapaalu, 3) kolmijalka ja 4) kallioperustus, jota käytettäessä perustuslaatta ankkuroidaan kiinni kallioon porattavilla ankkuriteräksillä.

Perämeren alueella kalliota tavataan harvemmin, joten kallioperustusta ei tässä raportissa käsitellä. Kallioperustus on taloudellisesti edullinen ja sitä tulee harkita esimerkiksi luodoille rakennettaessa ja kalliopohjaisilla alueilla. Tällöin voimalan ja tornin kuljetus ja pystytys tapahtuvat esimerkiksi nosturiproomun avulla.

Tässä projektissa suunniteltavaksi perustukseksi valittiin massiiviperustus, jonka rakentaminen ei ole samalla tavalla olosuhteista kiinni kuin kahden jälkimmäisen vaihtoehdon. Mikäli veden syvyys ylittää kymmenen metriä, kannattaa tutkia myös kolmijalan kilpailukyky, jonka tiedetään paranevan syvissä vesissä. Pohjatutkimusten jälkeen voidaan tarkastella myös kallioperustuksen tai junnupaalun soveltuvuutta tuulivoimalan perustukseksi.

Kaikissa perustuksissa on tehtävä tyyppisertifiointi yhdessä tuulivoimalan kanssa. Junnupaalun tapauksessa mitoitus yhdessä tuulivoimalan valmistajan kanssa on erityisen tärkeää, koska tornin ja paalun yhdistelmän ominaistajuus on mitoittettava halutulle kohdalle roottorin pyörimisnopeuden taajuutta tai taajuusaluetta.

Maaperän geotekninen kantavuus vaikuttaa perustuksiin lähinnä pohjalaatan halkaisijan kautta. Mitä kantavampi maa on, sitä pienempi voi olla pohjalaatta. Koska voimalan pystyssä pysyminen on riippuvainen pohjalaatan kyvystä vastustaa poikittaisia voimia ja kaatavaa momenttia, se vaatii sitä enemmän painoa neliölle, mitä pienemmäksi sen voi tehdä.

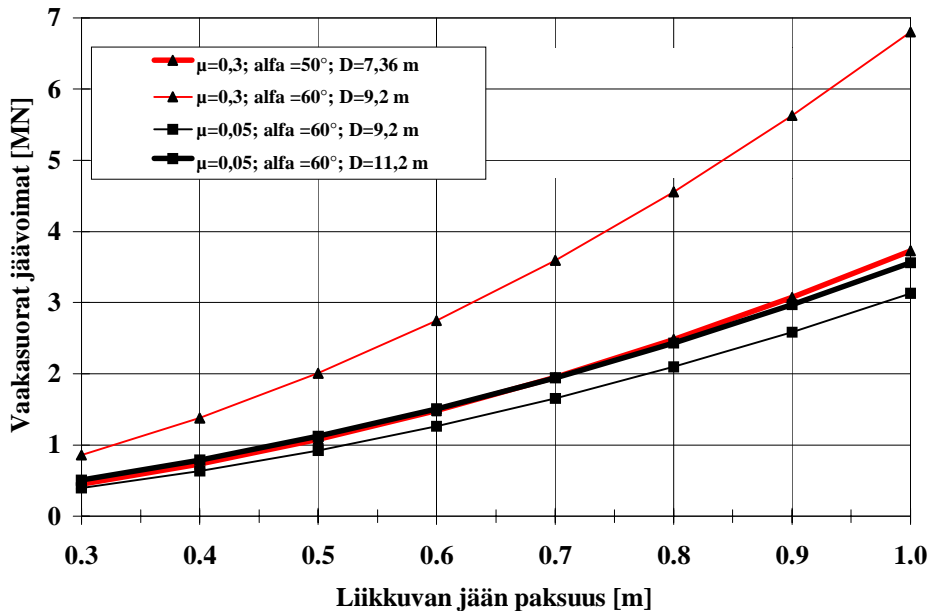
### **7.3.3 Voimalan kiinnitys perustuksiin**

Tuulivoimalan torni kiinnittyy asennuspulteilla perustuksen keskilieriön teräslaippaan. Pulteissa on oltava säätövaraa siten, että torni saadaan tarkasti pystysuoraan. Säätövaran ansiosta torni voidaan oikaista myöhemminkin, mikäli se kallistuu aikojen myötä merenpohjan epätasaisen painumisen vuoksi.

Tuulivoimala pysyy pystyssä sekä oman painonsa avulla että pohjalaatalla lepäävän massan painosta. Tornin kuormitus välittyy perustuslaatalle keskilieriötä tukevien säteittäisten tukipalkkien avulla. Tuulen ja jään painaessa voimalaa pohjalaatta tukeutuu puristuksella pohjahiekkaa vastaan paineella, joka vastaa enimmillään maan kantavuutta. Vastakkaisella puolella laatta pyrkii nousemaan, mutta sen päälle kasatun massan paino estää sitä nousemasta ylös. Perustus pyrkii myös siirtymään sivulle, ellei kitka riitä pitämään sitä paikallaan.

### 7.3.4 Jääkartio

Kaikkiin perustustyyppeihin, jotka joutuvat suoraan tekemiseen jään kanssa, on suunniteltu rakennettavaksi jääkartio, jonka avulla jäävoima pienenee merkittävästi. Veden korkeuden vaihtelut on otettava huomioon mitoitusta suunniteltaessa. Perämerellä jääkartion tulee ulottua noin 0,5 m ylimmän vedenpinnan yläpuolelle ja alapinnan jään alapuolelle.



Kuva 13. Tuulivoimalan perustuksiin vaikuttava jäävoima eri jääkartioilla liikkuvan jään paksuuden funktiona.

Jääkartio taivuttaa ja murtaa jäätä sitä paremmin mitä loivempi jään ja kartion välinen kulma on. Jään ja kartion välinen kitka lisää tehollista kartiokulmaa, joten pienentämällä kitkaa voidaan rakentaa jyrkempi kartio ja päin vastoin. Sopiva kartiokulma betonille olisi noin  $45\text{--}60^\circ$  ja teräkselle  $55\text{--}60^\circ$ . Kuvassa 13 on esimerkki megawattiluokan voimalan perustuksiin vaikuttavasta vaakasuorasta jäävoimasta liikkuvan jään paksuuden ollessa 30–100 cm. Kuvassa D on kartion halkaisija vedenpinnan tasossa: suuremmat arvot betonille ja teräkselle ovat tapauksessa, jossa kartiota on suurennettu niin, että sen yläpuolelle tulee lepotaso. Pienemmät arvot vastaavat tilannetta, jossa kartion halkaisijan yläpäässä tornin halkaisija on 4 m. Kitkakerroin  $\mu = 0,05$  vastaa maalattua teräspintaa ja  $\mu = 0,3$  vastaa betonipintaa. Kuvan 13 ohuet käyrät (alfa =  $60^\circ$ ) näyttävät jäävoimien kasvun, kun kartion teräskuori kuluu pois. Kun

liikkuvat jäät ovat alle 40 cm paksuisia, pysyvät jääkuormat muissa tapauksissa alle 1 MN tasolla.

Kartio voi tukeutua perustuksen keskilieriöön ja sen voi tehdä joko teräksestä tai betonista. Ohut teräsvaippa, jonka sisäpuoli valetaan täyteen, on yksinkertainen ja edullinen ratkaisu. Teräsvaippa pienentää kitkaa ja toimii valumuottina.

Tässä työssä suunnitelluissa perustuksissa jääkartio lepää tukilamellien päällä, jossa se siirtää voimat suoraan perustuselementteihin. Kartion voi tarvittaessa uusia irrallisina elementteinä. Kartion ulkopinta on teräspeltiä, joka alentaa merkittävästi jääkuormia. Seinämän kaltevuus on mitoitettu siten, että vaikka teräskuori kuluisi pois, jäävoimat eivät kasvaisi suuremmiksi kuin mitä rakenne kestää. Teräskuori suojaa myös betonia jään eroosiovaikutukselta, joten sen uusiminen kannattaa.

Koska rannasta päin ei tule jääkasautumia, jääkartioksi riittää toispuoleinen kartio, 180 astetta, ja rantaan päin se voi olla patovallin muotoinen.

### **7.3.5 Perustuksen pohjan valmistelu**

Perustussyvyys kannattaa valita siten, että perustukset ovat joko kokonaan veden pinnan ylä- tai alapuolella. Tämä vähentää toistuvan jäätymisen ja sulamisen aiheuttamaa eroosiota ja pidentää merkittävästi perustusten elinikää.

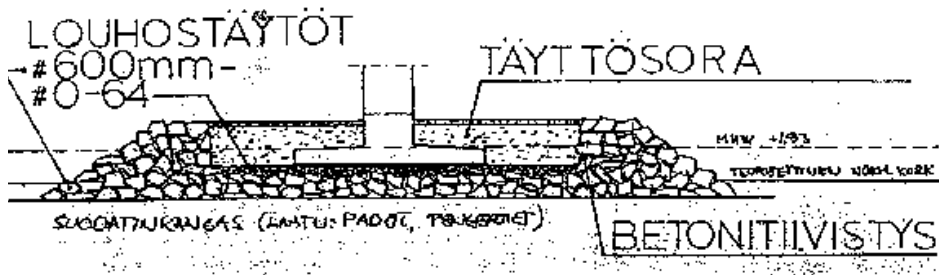
Pohjamaan geoteknisenä kantavuutena on malliperustuksissa käytetty vähintään 180 kPa puristuslujuutta. Perustuksen alle on suoritettava aina pohjan tasaus ja tiivistys. Tasaushiekan alle on asennettava suodatinkangas, mikäli perustuksen alla on routivaa maata. Aaltojen ja virtausten vaikutuksesta pohjan tasaamiseksi käytetty hiekka saattaa huuhtoutua vähitellen pois ja jättää pohjan alle tyhjän tilan, ellei perustusta varten ole kaivettu riittävän syvää monttua. Monttu tukee perustusta sivusuunnassa ja estää sivuttaisliukuman. Vaihtoehtona on erilaisten liukuesteiden, kuten helmojen tai paalujen, rakentaminen perustuksen ympärille lukitsemaan sivuttaisliikettä, ellei kitka yksin riitä. Pohjan tasauksen yhteydessä on varmistuttava myös siitä, ettei perustuksen alle jää esimerkiksi suuria lohkareita, jotka saattavat aikojen kuluessa kohota ja aiheuttaa pohjalaattaa

pistekuormaa. Jos tällainen vaara on ilmeinen, tämä tulee huomioida pohjalaattaa ja sen alle tulevaa tasoituserrosta mitoitettaessa.

### 7.3.6 Matalikolle perustaminen

Matalikolle, alle kahden metrin syvyyteen on vaikea saada proomulla kuljetettavaa tai uitettavaa perustusta perille, sillä uppouma on uitettaessa yleensä vähintään kaksi metriä. Perustuksen kuljetuksessa ja pystytyksessä on silloin mahdollista käyttää ruopattua väylää, pengertietä ja jäätietä. Matalaan veteen voi perustuksen rakentaa joko tekosaarelle tai uppoperustuksena.

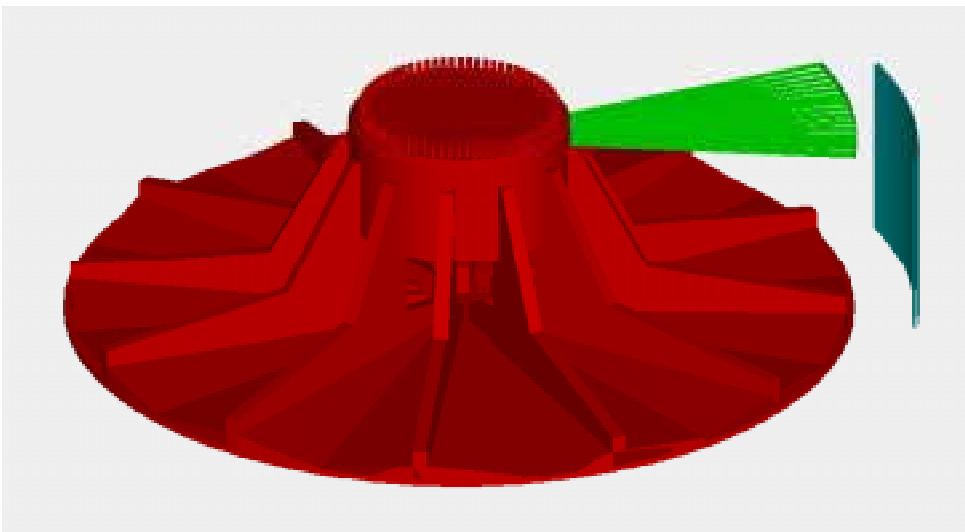
Koska perustuksen halkaisija on 15–25 metriä voimalan koosta riippuen, väylän ruoppaaminen saattaa tulla kohtuuttoman kalliiksi. Toinen vaihtoehto on rakentaa väliaikainen pengertie tuulivoimapuistoon. Perustusten elementit sekä koneistot kuljetetaan tietä pitkin rakennuspaikalle, ja maanvarainen perustus rakennetaan perinteistä tekniikkaa käyttäen. Perämerellä on myös eräissä tilanteissa mahdollista rakentaa talven aikana pohjaan asti jäädytettävä jäätie, jota pitkin tarvittavat kuljetukset voidaan tehdä. Talviaikainen rakentaminen on melko riskialtista etenkin merellä. Riskin pienentämiseksi on suunniteltu 600 kW:n voimalalle elementtirakenteinen perustus, joka kootaan nopeasti asennuspaikalla pulttiliitoksien avulla. Perustuselementit on suunniteltu siten, että keskiosaa lukuun ottamatta ne voidaan kuljettaa normaaleina rekkakuormina maanteitse ja ovat siirrettävissä autonostureilla.



Kuva 14. Tekosaariperustus matalikolle.

Kuvassa 14 on esitetty tekosaaren periaate ja tavanomaisen perustuksen vaatimat suojalouheet ja painomassat. Massat on peitetty tiiviillä pintakerroksella, betonilla tai asfaltilla, jotteivät vedet pääse huuhtelemaan painokerrosta pois. Tekosaareen vaikuttavat jäävoimat pyrkivät vähitellen siirtämään ja muotoilemaan sen reunarakenteita. Aaltojen vaikutuksesta hienot maa-ainekset huuhtoutuvat vähitellen pois ja jäljelle jää vain karkea kiviaines. Kuvassa 15 on 600 kW voimalan elementtiperustus, jonka kokoaminen paikan päällä on mahdollista. Käytettäessä perustuksen ympärillä seinämää ja kantta saadaan painomassa pysymään pohjalaatan päällä myös veden ja jään huuhtoessa perustuksia. Huuhtoutumista ja massojen siirtymistä voidaan vähentää myös käyttämällä teräsverkkokoreja louheen ympärillä.

Jääkenttien liikkua tuulen vaikutuksesta saaren rantaan saattaa nousta jäävalleja, jotka voivat ylettyä tuulivoimalan torniin asti, ellei saari ole tarpeeksi suuri. Jäälohkareiden törmäykset torniin aiheuttavat painumia, ellei sitä ole vahvistettu riittävästi alaosaan.



*Kuva 15. 600 kW voimalan elementtiperustus. Perustuksen ympärille tulevasta seinämästä ja kannesta näkyy vain yksi elementti.*

Saaren korkeus on valittava siten, että voimalan perustus on kaiken aikaa vedenpinnan yläpuolella.



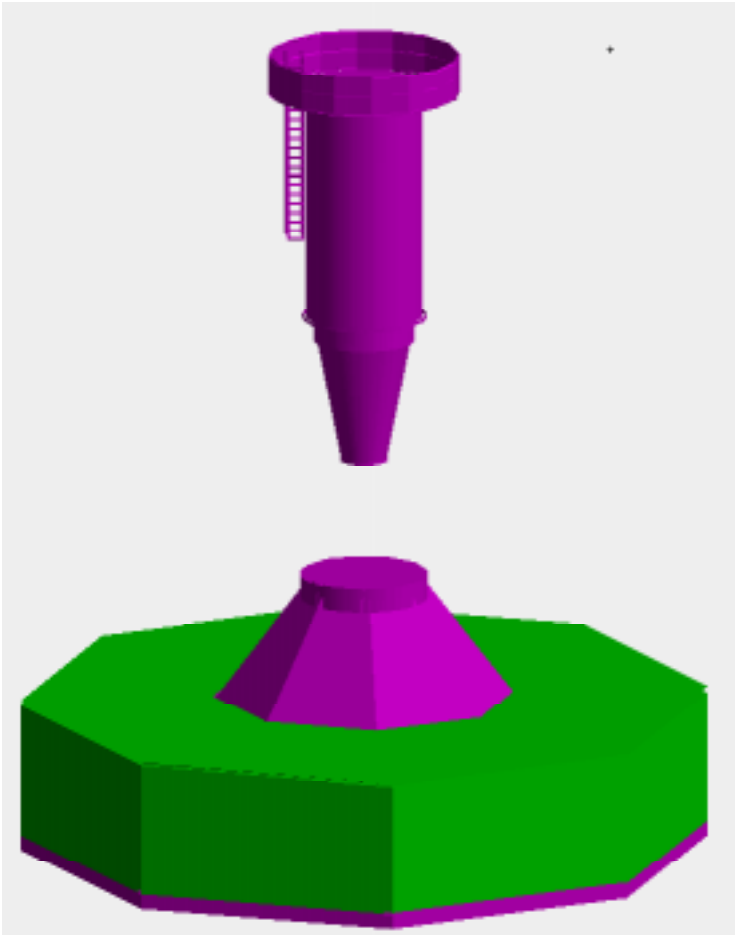
Perustukset voidaan rakentaa myös vedenpinnan alapuolelle (uppoperustus). Tällöin on sijoituspaikalle kaivettava ensin monttu, jonka tehtävänä on pitää pohja kuivana rakentamisen aikana. Talviaikana montun reunat voidaan jäädyttää samalla, kun tehdään jäätie rakennuspaikalle. Kesäaikana voidaan tämän asemesta rakentaa väliaikainen pengertie. Perustustyöt voidaan sen jälkeen tehdä normaaliin tapaan käyttäen perustusratkaisuna tavanomaista massiivilaattaa, mikäli työ muuten voidaan ja halutaan suorittaa rakennuspaikalla. Kuvan 15 elementtiperustus soveltuu hyvin veden alla käytettäväksi ja vähentää vaikeissa olosuhteissa tehtävää työtä. Perustussyvyyden tulisi olla riittävä, jottei perustus jäisi puoliksi pintaan, vaan olisi kaiken aikaa jäänpinnan alapuolella lukuun ottamatta jääkartiota, jonka tehtävänä on särkeä liikkuva jää. Tarvittavien massojen kasaaminen perustuslaatan päälle edellyttää myös riittävää syvyyttä, koska massojen tulisi olla kokonaan jään alapuolella. Massojen pysyminen laatan päällä voidaan varmistaa käyttämällä seinämää perustuksien ulkokehällä. Kehää käytettäessä painomassaksi kelpaavat esimerkiksi rakennuspaikalta pumpattu pohjasora ja kivet, jolloin täyttökustannukset ovat hyvin vähäiset verrattuina maalta tuotuun louheeseen. Vedenpinnan alapuolelle rakennettava perustus vaatii huomattavasti enemmän painomateriaalia, koska veden noste keventää sitä. Tarvittaessa voidaan käyttää masuunikuonaa, jonka tiheys on suuri. Vedenpinnan alapuolella altaan vähittäinen täytyminen rakentamisen aikana haittaa perustustöitä.

### **7.3.7 Perustus 3–5 metrin syvyyteen**

Merirakentamisen kannalta 3–5 m syvyys on hyvä, koska perustusten uitto ja huoltoaluksien sekä proomujen liikkuminen on mahdollista alueella. Ruoppaaminen rajoittuu varsinaisen perustuksen kaivamiseen ja tasoittamiseen ja kaikki tarvittavat massat saadaan helposti uitettua proomuilla tai tuotettua imuruoppaajalla paikan päällä. Perustuskaivannon tulisi olla vähintään metrin syvyinen. Perustukset täytetään uiton jälkeen painomassoilla, jotka pitävät voimalan pystyssä. Alle 5 m syvyydellä jäävoimat eivät aiheuta merkittävää kaatomomenttia suhteessa tuulivoimiin.

Kuvassa 16 on 600 kW voimalan elementtiperustus, johon on lisätty jäävahvistettu tornin alaosa ja jonka hoitotaso on nostettu jäiden ulottumattomiin. Kuvan mukaisen rakenteen kuljetus ja pystytys voidaan tehdä proomulla, jossa on riittävän suuri asennusnosturi. Elementit koekasataan ensin

tehtaalla, jotta osien yhteensopivuus on taattu, ja lopullisesti satamassa, josta se kuljetetaan proomulla tuulivoimalan sijoituspaikalle. Kuljetus vaatii varsin massiivisen kaluston, koska tyhjään perustus painaa helposti 300–500 tonnia.



*Kuva 16. Elementtiperustus ja tuulivoimalaitoksen tornin alaosa.*

Kuljetusta helpottaa huomattavasti, mikäli valmis perustus voidaan kelluttaa ja uittaa asennuspaikalle perustuksen ympärille rakennettavan uittoseinän avulla. Uittoseinän korkeus voidaan valita niin suureksi, että se ulottuu veden pinnan yläpuolelle, vaikka perustus on jo pohjassa. Tällöin upotus tapahtuu hallitusti. Uiton jälkeinen perustuksen upotus pohjaan voidaan suorittaa yksinkertaisesti täyttämällä perustusallas vähitellen täyttömassoilla ja/tai vedellä ja antamalla perustuksen vajota vähitellen pohjaan. Täytön aikana on perustuksia pidettävä oikealla paikalla ankkuriköysin tai vastaavalla tavalla tukemalla sekä valvottava

pystyasentoa. Uputuksen jälkeen uittoseinä voidaan joko jättää paikalleen, irrottaa ja käyttää uudelleen tai kaataa paikalleen lisäpainoksi. Kun perustukset ovat paikallaan ja täytettynä painomassoilla, pystytetään torni ja asennetaan koneisto sekä roottori.

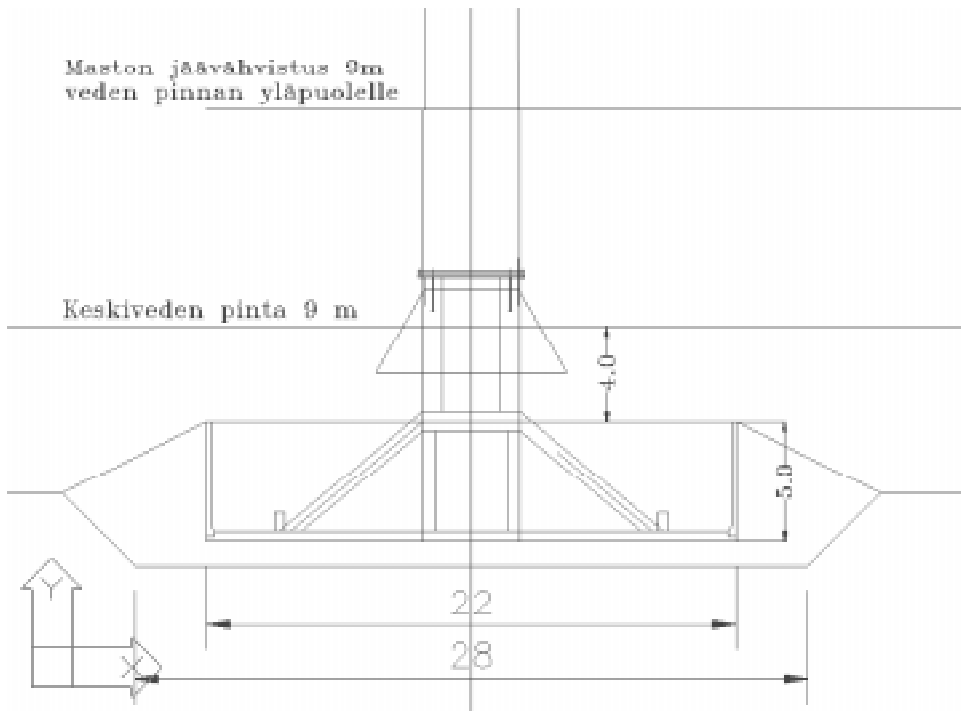
Perustus voidaan valmistaa myös rannassa vedenpinnan alapuolelle rakennetussa kuivatelakassa tai laskuluisella, josta se valmiina lasketaan veteen kuten laivat. Jos perustus tehdään riittävän suurikokoiseksi ja kevyeksi, se saadaan pysymään pinnalla.

Pohja kaivetaan 4 m syvyyteen keskivedenpinnan alapuolelle ja täytetään tasaushiekalla. Painomassojen paikallaan pysymiseksi käytetään ulkokehää, jonka reunojen tasalle painomassa ulottuu. Koska reuna on vaadittavalla massan korkeudella, voidaan massana käyttää paikalta nostettua pohjasoraa ja hiekkaa.

### **7.3.8 Perustus 5–10 metrin syvyyteen**

Mitä syvemmälle voimala viedään, sitä suuremman kaatomomentin jäävoima aiheuttaa perustukseen. 600 kW:n kokoluokassa 5–6 metriä lienee suurin syvyys, jonne voimalan sijoittamista kannattaa harkita. 1,5 MW:n luokassa voidaan mennä aina kymmeneen metriin asti. Tätä syvemmälle mentäessä massiiviperustuksen taloudellinen kilpailukyky on syytä tarkistaa tapauskohtaisesti muiden vaihtoehtojen kanssa.

Kuvassa 17 on 9 metrin syvyyteen suunniteltu 1,5 MW:n tuulivoimalaitoksen perustus, joka on suunniteltu uittoon varten. Mikäli uittoseinämän tulisi ulottua veden pinnan yläpuolelle upotuksen aikana, siitä tulisi hyvin korkea. Vaihtoehtona on käyttää erillistä uittorengasta, joka kasvattaa perustuksen halkaisijaa uiton aikana, vähentää uintisyvyyttä ja pienentää kaatumisriskiä. Uittorengaaseen voidaan rakentaa vaijerivinssit, joiden varassa perustukset lasketaan hallitusti pohjaan ja vältetään arvaamaton vapaa upotus. Vakavuutta voi lisätä myös ympärille kiinnitettävillä proomuilla.



Kuva 17. 1,5 MW voimalaitokselle 9 m syvyyteen suunniteltu perustus.

## 7.4 Eroosiosuojaus

Perustuksissa on käytettävä eroosiosuojausta, jotta voimalaitosta tukeva massa ei huuhtoudu aallokon mukana pois. Myös merikaapeli on syytä suojata.

Aaltojen aiheuttama vesipartikkelien liike aiheuttaa eroosiota, joka vielä korostuu rakenteen vieressä virtausnopeuden kiihtyessä. Myrskyn nostattama tulva-aalto aiheuttaa myös nettovirtausta, mikä superponoituu aaltojen aiheuttamaan vesihiukkasten nopeuteen. Eroosion ennustaminen joko laskennallisesti tai mallikokeilla on epävarmaa. Tuulivoimalaitosten perustuksissa on käytettävä kokemusperäisiä muissa vastaavissa merirakenteissa käytettyjä hyväksi todettuja eroosiosuojausmenetelmiä. Periaatteena on sitoa hieno maa-aines päälle asetetuilla asteittain karkenevilla kivillä. Suurimmat kivet ovat päällimmäisinä ja niin isoja, että suurimmatkaan myrskyt eivät saa niitä liikkeelle, ks. Rakenteiden kuormitusohjeet (RIL, 1997). Alla olevat

pienemmät kivet pysäyttävät veden huuhtoutumisen syvemmällä ja siten hienon aineksen eroosion.

Avomerimajakoissa on käytetty eroosiosuojauksena kiveystä, joka ulottuu noin kasuunin halkaisijan neljänneksen verran ulommaksi. Esimerkiksi 24 m halkaisijaisella kasuunilla eroosiosuojaus on ulottunut 6 m kasuunista ulos. Päällä olevien kivien tarvittava koko on ollut 4 m merkitsevässä aallokossa noin 1 m<sup>3</sup>.

Rakenteiden kuormitusohjeet (RIL, 1997) esittävät kivien vähimmäispainon W [MN] määrittämiseksi yhtälöä (joka ei kuitenkaan huomioi vesisyvyyttä).

$$W = \frac{\gamma_s H^3 \tan \alpha}{k(\gamma_s - 10)^3} \quad (35)$$

jossa  $\gamma_s$  on suojausmateriaalin ominaispaino [kN/m<sup>3</sup>]  
H on mitoitusaalton korkeus [m]  
 $\alpha$  on suojaluiskan kaltevuus vaakatasosta[°]  
k on suojausmateriaalin geometriasta riippuva kerroin

Kerroin k on annettu taulukossa (RIL, 1997). Esimerkkinä se on murtuville aalloille luonnonkivillä 2,4–3,2 ja louheella 4. Kerroin k on pienempi ei murtuville aalloille.

## **8. Voimalalle asetettavat vaatimukset meriolosuhteissa**

Merelle rakennettavissa laitoksissa on kiinnitettävä erityistä huomiota luotettavuuteen, huollettavuuteen ja käyntivarmuuteen, koska laitoksien luokse pääsy on usein aikaa vievää ja joissakin sääolosuhteissa mahdotonta. Merelle ei kannata rakentaa prototyyppejä, vaan rakennettavilta voimalaitostyypeiltä vaaditaan useamman vuoden käyttökokemukset.

Standardilaitoksiin tehdään yleensä joitakin rakennemuutoksia: mm. korroosiosuojaus, muuntamon sijoitus korkealle torniin sekä nosturi tai hissi huoltotarvikkeita ja komponentteja varten, jolloin suuremmatkin korjaustyöt voi tehdä ilman nosturiproomua. Käyntiovi sijaitsee yleensä korkeammalla kuin standardilaitoksilla, ja lisäksi oven eteen rakennetaan huoltotaso (access platform). Merituulivoimalaitoksissa voidaan yleensä käyttää suurempaa roottorin pyörimisnopeutta, koska käyntiäni ei ole haitta, kun laitokset ovat kaukana asutuksesta.

Meriolosuhteita varten on syytä selvittää, mitä toimintoja voidaan valvoa ja ohjata esimerkiksi sähköyhtiön valvomosta. Mahdollisimman moni huoltokohde sekä -toimenpide kannattaa liittää kauko-ohjattavaksi, koska voimalalla käynti on aina kallista säistä riippumatta.

Merellä voimalan huolto on aina vaikeampaa kuin maalla. Luoksepääsy eri säissä on osoittautunut vaikeaksi, joten siihen on kiinnitettävä erityistä huomiota yhdessä voimalan valmistajan kanssa. Kesällä aallokko vaikeuttaa veneen ankkurointia tornin tyveen ja talvella tarvitaan jään kestävä laituri, johon huoltoveneen saa tukevasti kiinnitetyksi. Jos käyntiovi on liikkuvien jäiden aikana syvällä jäävällin sisällä, ei huoltomies pääse sisään.

### **8.1 Jääolosuhteiden aiheuttamat vaatimukset voimalalle**

Perämerelle pystytettävien voimalaitosten tapauksessa täytyy tarkastella myös liikkuvilta jäiltä suojautumista, joka vaatii jääkartion rakentamisen, voimalaitoksen tornin vahvistamisen ja käyntioiven sijoittamisen suojaan

jäävalleilta. Jääkartion rakentamista on selvitetty erikseen perustusten yhteydessä edellisessä luvussa. Käyntiovi on sijoitettava riittävän korkealle ja rannan puolelle, koska rannasta päin ei tule ahojääkasaa, joka tukkisi oven. Oven eteen tarvitaan tasanne. Jääkartioksi riittää toispuoleinen kartio, 180 astetta, joka voi rantaan päin olla patovallin muotoinen.

Liikkuva jääkenttä saattaa murtuessaan perustusta vasten muodostaa sijaintipaikasta ja jääolosuhteista riippuen 3–10 metrin korkuisia valleja tornin ympärille. Vaikka tällainen valli ei aiheutakaan perustuksille merkittävää kuormitusta, yksittäisten lohcareiden törmääminen tornia vasten saattaa aiheuttaa pienille alueille kovia, pintaa vastaa kohtisuoria iskuja, joiden voimasta tornin vaippa saattaa lommoutua, ellei se ole riittävästi vahvistettu. Jäävahvistuksena tulee kysymykseen tornin alaosan normaalia hieman suurempi levynpaksuus sekä mahdolliset jäykisteet ja kaarivahvikkeet.

## 9. Pystytystekniikat

Perustuksien ja tuulivoimalan kuljettaminen paikan päälle on ongelma, johon ei ole helppo löytää halpaa ratkaisua. Siirrettävät ja nostettavat massat ovat suuria. Perustus painaa satoja tonneja betonivalmiina ja tuhansia tonneja massoilla täytettynä. Voimalan paino on koosta riippuen 80–200 tonnia. Tornin korkeus on 50–80 metriä.

Mikäli tuulivoimalalle suunniteltu sijoituspaikka on matalikolla, vain 1–2 m syvyisessä vedessä, raskaan nostokaluston kuljettaminen paikalle vaatii joko väylän ruoppaamista proomulle tai pengertien rakentamista maakuljetuskalustolle. Perämerellä saattaa joissakin sijoituspaikoissa tulla kyseeseen myös jäältä pystyttäminen. Yli kolmen metrin syvyisiin vesiin voidaan kuljettaa ja pystyttää voimalaitos nosturiproomulla tai valmistaa uitettava perustus, johon on ennen uittoa asennettu torni, koneisto ja roottori. Perustusten osalta pystytystä on tarkasteltu edellisessä luvussa ja tuulivoimalaitoksen osalta tässä luvussa.

Tuulivoimalaitosten pystytysvaiheessa aaltojen vaikutus on otettava huomioon asennuksen kestoajan, käytetyn kaluston ja uittovakavuuden kannalta. Paikallisten aaltotilastojen perusteella voidaan arvioida, mihin vuodenaikaan asennukset ovat mahdollisia ja kuinka pitkiä asennuskelpoisia sääikkunoita esiintyy.

### 9.1 Pystytys merellä

Tähän mennessä rakennetut merituulivoimalaitokset on pystytetty merellä joko offshore-kaluston (uivan nosturin) tai proomulle nostetun nosturin avulla. Megawattiluokan laitoksen pystytys vaatii noin 55 t nostokapasiteettia, lähes 80 m kourun korkeutta reilun 10 m nostoetäisyydellä perustuksen reunasta. Suomesta löytyy muutama näin suuri nosturi, jotka on mahdollista siirtää proomun päälle pystytyksen ajaksi. Tällainen järjestely vaatii myös ankkurointisysteemin ja on huomattavan arka tuulelle ja aallokelle, joten se sopii lähinnä matalaan, suojaisaan sijoituspaikkaan. Valmis uiva nosturi on tässä mielessä varmempi ratkaisu, mutta huomattavasti kalliimpi. On mahdollista, että merelle pystytettävän laitoksen tornin korkeudeksi kannattaa valita esimerkiksi 60 eikä 70 m, mikäli suurempaan nostokorkeuteen yltävän nosturin kustannukset nousevat kohtuuttoman suuriksi.



Suuren (noin 100 MW) merituulipuiston pystytyksessä on huomioitava pystytykseen kuluva aika: pystytys pyritään yleensä tekemään kesän aikana (alle 150 päivässä), joten yhden perustuksen ja voimalan pystyttämiseen ei saa kulua monta päivää.

Rakennettaessa maalla 600 kW laitoksia on mahdollista pystyttää kaksi päivässä, mutta megawattilaitoksen pystytykseen valmiille perustuksille menee parhaassakin tapauksessa päivä. Mikäli on käytössä tarpeeksi järeä nosturi, voidaan pystytystä nopeuttaa siten, että tuulivoimala nostetaan vain muutamassa osassa (esimerkiksi torni yhtenä osana, konehuone yhtenä osana ja roottori yhtenä osana).

Tuulivoimalaa ei voida pystyttää kovalla tuulella: yleensä tuulen nopeuden on oltava alle 8 m/s. Merellä sääolosuhteet ovat erityisen tärkeitä, käytetty kalusto saattaa asettaa vielä tiukemmat vaatimukset tuulen ja aaltojen suhteen. Parhaat pystytyssääät ovat luonnollisesti kesällä.

## 9.2 Uitto

Mikäli tuulivoimalan torni ja koneisto rottoreineen voidaan nostaa paikalleen perustusten päälle jo satamassa, on laitoksen pystytys helpompaa ja edullisempaa kuin merellä. Tällöin kuitenkin koko voimalaitos täytyy uittaa paikalleen merelle.

Tuulivoimalan koon kasvaessa myös paino kasvaa ja perustusten pohjan pinta-alan tarve kasvaa uittovakavuuden vaatimuksesta, vaikka varsinaiset toimintakuormat eivät kasvaisikaan. Perustusta ympäröivä painoarkku on alle megawatin laitoksilla tyhjänä riittävän kantava pitääkseen voimalan pinnalla. Vakavuutta on syytä kuitenkin lisätä joko ympärille kiinnitettävillä proomuilla tai erillisellä uittorenkaalla, jolloin uintisyvyyttä saadaan pienennettyä. Megawattiluokan laitoksille voidaan käyttää uiton aikana perustuksien ympärille rakennettua uittorengasta, joka pitää voimalaa pystyssä sekä osittain kannattaa sitä uiton aikana.

Uitettaessa kokonaisuus suojataan aalloilta kaltevalla kannella, joka kattaa uittorengaan. Kannen tehoa parannetaan vielä kaksilla kaideseinämillä, joista

ulompi laskee veden virtaamaan vapaasti pois kannelta mutta ei päästä sitä kannelle muuten kuin kaiteen yli loiskuvalta osalta. Sisempi kaideseinä on tiivis eikä päästä vettä perustuksen päälle. Voimalan perustuksen ulkokehä ulottuu uitettaessa selvästi vedenpinnan tason yläpuolelle, joten vaikei uittokehän ja seinämän välinen tiivistys toimisi, veden pääsy perustuksiin on estetty.

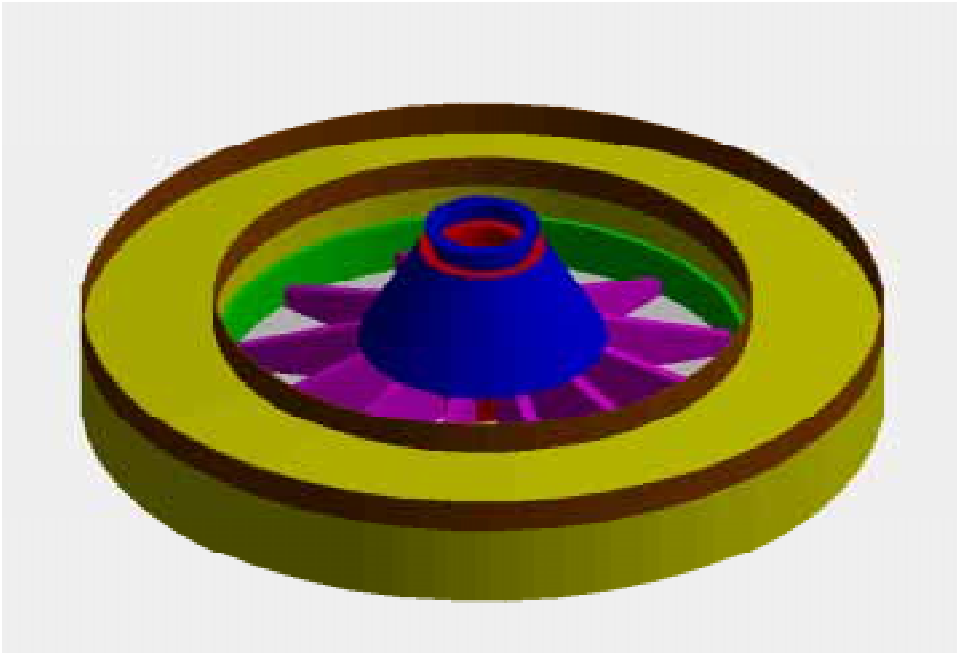
Uittorengas voidaan rakentaa avattavaksi ja uudelleen käytettäväksi. Tämä ratkaisu on taloudellinen etenkin tuulipuistoja rakennettaessa, sillä varsinainen pohjaan jäävä perustus voidaan mitoittaa juuri sen kokoiseksi, kuin rakennuspaikan maapohjan kantavuus edellyttää.

Uiton ja asennuksen kannalta pohjan syvyydellä ei ole suurta merkitystä. Mutta perillä perustusten upottaminen hallitusti pohjaan on sitä suurempi ongelma, mitä syvemmälle mennään. Lisäksi uittoajan pidentyessä säärisä kasvaa.

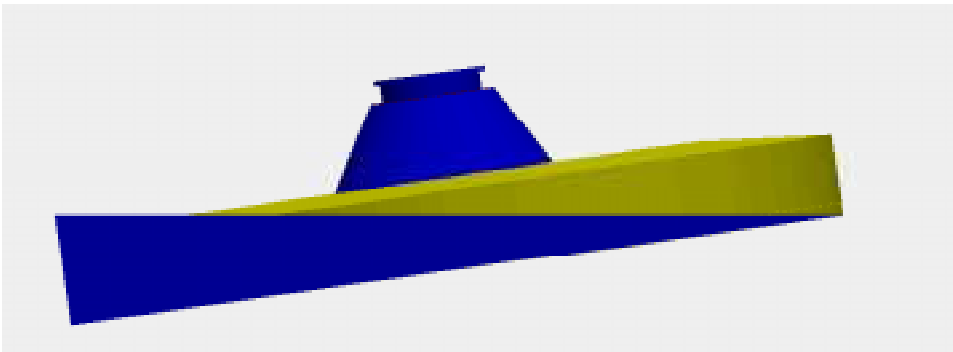
Kuvassa 18 on uiva perustus. Uittorengas näkyy kuvassa ulommaisena, jääkartio keskellä ja painoseinä lamellien ja uittorengaan välissä. Voimalan tornin kiinnityskaulus näkyy jääkartion yläpuolella keskilieriön päällä. Kun lamellien välit täytetään painomassoilla, voimalan asennus on valmis.

Kuvassa 19 on tarkasteltu perustuksen mitoitusta uiton kallistusvakauden kannalta ja esitetty perustus pahimmassa sallitussa asennossa, jossa vesiraja ulottuu juuri ja juuri kannen sisäreunalle suojakaiteeseen saakka. Kuvassa ei ole kaidetta, joka estäisi vielä tässäkin asennossa alle yhden metrin korkuisia aaltoja lyömästä perustustilaan. Tälläkin kallistuksella rakennetta oikaiseva momentti on riittävä (kohta 9.2.1, taulukko 10), joten kaatumisvaaraa ei ole ja kaideseinät estävät aaltojen ylilyöntiä.

Uiton päätteeksi lasketaan perustus varovasti pohjaan lisäämällä siihen painoa esimerkiksi imuruoppaajalla tai päästämällä siihen hallitusti vettä painoksi. Veden loiskuminen on estynyt tukilamellien vuoksi, joten veden käyttö ei heikennä uiton stabiliteettia uitettaessa. Kun perustus on tukevasti pohjassa, avataan uittorengas ja uitetaan se takaisin.



*Kuva 18. 1,65 MW voimalan elementtiperustus uittovalmiina. Kuvassa näkyy uittorengas ulommaisena, painoseinä lamellien ja uittorenaan välissä ja jääkartio.*



*Kuva 19. 1,65 MW voimalaitoksen perustuksen kellumisasento kallistuneena. Kaiteita, jotka estävät veden pääsyn kannelle ei ole piirretty kuvaan.*

## 9.2.1 Uiton vakavuustarkastelu

Tuulivoimalan uiton vakavuus hinauksen aikana on laskettu neljälle tapaukselle. Kolme näistä on 600 kW voimalalle ja neljäs on 1,65 MW voimalalle. Laskelmien tarkoituksena oli selvittää eri vaihtoehtojen kellumisasento ja vakavuus hinaustilanteessa ottaen huomioon todennäköisiä vaaratilanteita. Dynaamista tarkastelua, jossa otettaisiin huomioon aallokon aiheuttama keinuminen, ei ole tehty. Keinumisen estämiseksi on mahdollista käyttää erilaisia vaimennustekniikoita (esim. siivekkeet), joiden vaikutus ja kustannukset on suunnitelluissa otettava huomioon. Aallokko on kriittinen voimalan vakavuudelle hinattaessa, jonka takia asianmukaiset tutkimukset tulee suorittaa ennen voimalan rakentamista.

### **600 kW voimala, versio 1a.**

Pienemmän voimalan perusversion uittoalusta, jonka varassa voimala kelluu, on muodoltaan säännöllinen kuusikulmio, jossa yhdensuuntaisten sivujen väli on 16 m ja korkeus 5,5 m. Roottorin napa on 51,2 m korkeudella alustan pohjasta, ja sen halkaisija on 42 m. Voimalan kokonaismassa on 512,81 t, ja sen painopiste sijaitsee 5,64 m korkeudella alustan pohjasta.

### **600 kW voimala, versio 1b.**

Voimala on muuten identtinen version 1a kanssa, paitsi että uittoalustan pohjalle on laitettu 1,5 m hiekkakerros painolastiksi. Tämän takia sen massa uitto-tilanteessa nousee 960,67 tonniin ja sen painopiste laskee 3,53 m:iin alustan pohjasta.

### **600 kW voimala, versio 1c.**

Tämä versio poikkeaa versioista 1a ja 1b sikäli, että navan korkeus on 64 m. Voimalan kokonaismassa on 528,48 t, ja sen painopiste sijaitsee 7,44 m korkeudella alustan pohjasta.

## 1.65 MW voimala, versio 2.

Isomman voimalan alustan ympärillä on uittorengas, joka irrotetaan sen jälkeen kuin voimala on asetettu paikalleen. Uittorengaan ulkohalkaisija on 25,2 m ja sen korkeus 3 m (kuva 18). Roottorin napa sijaitsee 70 m merenpinnasta, ja sen halkaisija on 66 m. Kokonaismassa on 1040 tonnia ja painopiste sijaitsee 9,67 m korkeudella alustan pohjasta.

Laskelmat on tehty NAPA-ohjelmistolla, joka on Suomessa kehitetty (Napa Oy (Ltd), Helsinki) ja mm. laivojen vakavuuslaskelmiin yleisesti käytetty ohjelma. Laskentaa varten on mallinnettu ainoastaan nosteen synnyttämiseen osallistuvat osat eli alustat ja 1,65 MW voimalan tapauksessa ns. uittorengas. Kohdat, joiden yli vettä pääsee valumaan alustan sisään, on määritelty pisteiksi, joiden korkeus vesipinnasta lasketaan.

Voimalan turvallisuus on voimakkaasti riippuvainen siitä, ettei sen kallistus ylitä kulmaa, jolla vettä pääsee reunojen yli alustan sisälle, eli ns. vuotokulmaa. Näin ollen vuotokulman tulee olla mahdollisimman suuri, kuten myös ns. varalaidan, jolla tarkoitetaan reunan korkeus veden pinnasta.

Lisäksi voimalan oikaisevan momentin tulee olla niin suuri, että se rajoittaa kallistuskulmaa riittävällä marginaalilla vuotokulmaan nähden, kun voimalaan kohdistuu suurin todennäköinen kallistava momentti. Tyypillinen tällainen momentti on tasaisen tuulen aiheuttama momentti. Oikaiseva momentti on ns. oikaisevan momenttivarren ja uppouman tulo eli

$$M = \Delta \cdot g \cdot GZ, \quad (36)$$

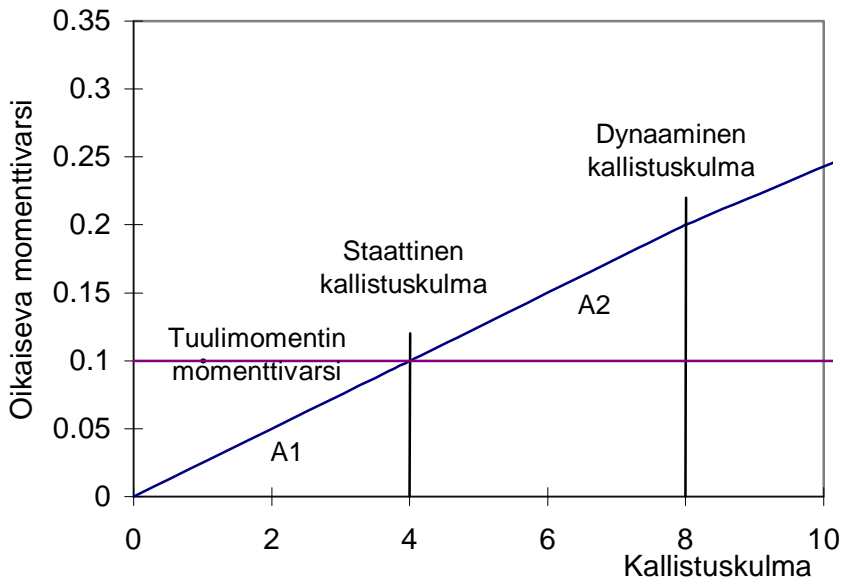
jossa  $M$  on oikaiseva momentti (kNm),  $\Delta$  on uppouman massa (tonnia) ja  $GZ$  on oikaiseva momenttivarren (m).

Koska tuuli saattaa olla puuskittaista, tulee tarkastelussa lisäksi ottaa huomioon ns. dynaaminen kallistuskulma. Tällöin huomioidaan se rotaatioliikkeen energiamäärä, jonka voimala absorboi tuulenpuuskan vaikutuksen aikana ja jonka oikaiseva momentti kumoaa. Dynaaminen kallistuskulma, joka näissä tapauksissa on karkeasti kaksinkertainen staattiseen kallistuskulmaan verrattuna ja jonka voimala hetkellisesti saavuttaa, voidaan määrittää kuvan 19 periaatteen

mukaisesti pinta-alan A1 ollessa yhtä suuri kuin A2. Oikaisevan momenttivarren kuvaajan alla oleva pinta-ala on ns. dynaaminen vakavuusvarsi  $e_\phi$ . Dynaaminen vakavuustyö on riippuvainen uppoumasta ja dynaamisesta vakavuusvarresta seuraavan kaavan mukaisesti:

$$W = \Delta \cdot g \cdot e_\phi, \quad (37)$$

jossa  $W$  on dynaaminen vakavuustyö kulmaan  $\phi$  saakka (esimerkiksi vuotokulmaan, kNm),  $e_\phi$  on dynaaminen vakavuusvarsi (mrad) ja  $\Delta$  on uppouman massa (tonnia).



Kuva 20. Dynaaminen kallistuskulma.

Eri versioiden vakavuutta on esimerkkinä verrattu tuulen aiheuttamaan momenttiin 12 m/s tuulella. Tuulen momentti on laskettu olettaen, että tuulen nopeus on vakio koko voimalan korkeudelta ja että tuulivoimalan vastuskerroin on 1,0.

Lasketut syväydet, varalaidat, kallistuskulmat, vuotokulmat ja dynaaminen vakavuustyö vuotokulmaan saakka on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Yhteenveto uiton kallistusvakavuuden tuloksista.

Ver- sio	Sy- väys  [m]	Varalaita			Kallistuma		Vuo- to- kul- ma [aste]	Dyn. vaka- vuustyö vuoto- kulmaan [kNm]
		0 m/s  [m]	12 m/s tasainen tuuli  [m]	12 m/s tuulen puuska  [m]	Staat.kal- listuma 12 m/s tasainen [aste]	Dyn. kal- listuma 12 m/s puuska [aste]		
1a	2,29	3,21	2,87	2,53	2,1	4,2	19,3	996,1
1b	4,29	1,21	1,01	0,81	1,2	2,5	7,5	226,2
1c	2,36	3,14	2,01	0,93	6,9	13,5	18,8	445,9
2	2,47	0,53 / 1,53	0,46 / 1,46	0,24 / 1,24	0,54	1,3	3,4 / 8,3	132,6 / 244,9

Tuloksista ilmenee, että 600 kW voimalan perusversio 1a on paras vakavuusominaisuuksiltaan. Painolastin lisääminen (versio 1b) pienentää sekä staattista että dynaamista kallistuskulmaa mutta vähentää samalla varalaitaa, vuotokulmaa sekä dynaamista vakavuustyötä vuotokulmaan saakka.

Version 1c korkeampi napakorkeus ja näin ollen myös korkeampi painopiste näkyy selvästi tuloksissa suurempina kallistuskulmina ja versioon 1a verrattuna pienempänä dynaamisena vakavuustyönä.

Suuremmalle voimalalle (versio 2) on esitetty varalaidoille, vuotokulmalle sekä dynaamiselle vakavuustyölle kaksi arvoa. Ensimmäiset arvot on laskettu huomioimatta uittorenkaan sisäreunaa pitkin kaavailtua metrin korkeata seinämää. Tällöin vesi syöksyy alustaan voimalan kallistuessa ensimmäiseksi uittorenkaan sisäreunan yli. Toiset arvot on laskettu ottaen huomioon em. seinämä, jolloin vuotokohta siirtyy metrin verran ylemmäksi nostaen sekä varalaitaa, vuotokulmaa että dynaamista vakavuustyötä eli energiaa, jota tarvitaan kallistamaan voimalan vuotokulmaan asti.

Suuremman voimalan vakavuusominaisuudet poikkeavat erimuotoisen alustansa ja uittorenkaan sekä tietysti suuremman massan ja korkeamman painopisteen takia pienemmistä voimalaversioista.

Tuulimomentin aiheuttamat staattiset ja dynaamiset kallistuskulmat ovat selvästi pienemmät kuin 600 kW voimalan eri versioilla. Toisaalta varalaita etenkin tuulenpuuskassa on varsin matala ilman em. korotusreunaa. Sama koskee dynaamista vakavuustyötä vuotokulmaan saakka. Korotusreunalla edellä mainitut arvot paranevat ratkaisevasti. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että korotusreuna on tiivis ja rakenteeltaan riittävän vahva kestäämään siihen kohdistuvat kuormitukset.

Staattiset ja dynaamiset vakavuusvarret kallistuskulman funktiona on esitetty 600 kW perusversiolle 1a sekä 1,65 MW voimalalle taulukoissa 11 ja 12. Näiden avulla voidaan määrittää kallistuskulma ja dynaaminen vakavuustyö muille kuin taulukossa 10 esitetyle kallistusmomentille.



*Taulukko 11. Staattinen ja dynaaminen vakavuusvarsi 600 kW voimalalle (versio 1a).*

Kallistuskulma $\phi$ [°]	Staattinen vakavuusvarsi GZ [m]	Dynaaminen vakavuusvarsi $e_\phi$ [mrad]
0	0	0
2	0,11	0,002
4	0,23	0,008
6	0,35	0,018
8	0,47	0,032
10	0,59	0,051
12	0,72	0,073
14	0,85	0,101
16	0,99	0,133
18	1,11	0,170
20	1,21	0,210

*Taulukko 12. Staattinen ja dynaaminen vakavuusvarsi 1,65 MW voimalalle.*

Kallistuskulma $\phi$ [°]	Staattinen vakavuusvarsi GZ [m]	Dynaaminen vakavuusvarsi $e_\phi$ [mrad]
0	0	0
2	0,32	0,006
4	0,46	0,020
6	0,46	0,037
8	0,36	0,051
10	0,20	0,061

## 10. Merituulivoiman kustannukset

Merellä tuuli on selvästi tasaisempaa kuin mantereella, ja on todennäköistä, että tuulivoimalaitoksilla on merellä pitempi elinikä kuin maalla. Merituulivoimalaitoksen eliniäksi voidaan todennäköisesti olettaa 20 vuoden sijaan 25 vuotta. Lisäksi perustukset voidaan suunnitella 50 vuoden käyttöiälle, jolloin on mahdollisuus hyödyntää samoja perustuksia kahdelle tuulivoimalaitokselle. Tässä raportissa tuotantokustannukset on kuitenkin laskettu käyttäen kaikille osille 20 vuoden takaisinmaksuaikaa ja 5 % sisäistä korkovaatimusta.

Kustannuksille on käytetty valuuttakursseja 1 DKK = 0,8 FIM, 1 SEK = 0,7 FIM, 1 NLG = 2,7 FIM. Kustannukset on laskettu ilman arvonlisäveroa.

### 10.1 Perustusten kustannusvertailu

Taulukossa 13 vertaillaan perustuskustannuksia laskettuna 1,5 MW tehoa kohti. Näistä Tunø Knobin ja Siikajoen kustannukset ovat toteutuneita kustannuksia, mutta pienemmälle laitoskoolle (siis taulukossa esitetyt kustannukset 2–3 perustusta kohti), ja Rødsandin ja Kokkolan arvioituja, mutta yhtä perustusta kohti. Hankkeet on esitetty tarkemmin kohdassa 10.2.

*Taulukko 13. Perustusten rakennus- ja pystytyskustannukset 1,5 MW kohti.*

kmk per 1,5 MW	Tunø Knob Tanska	Rødsand Tanska	Kokkola (kasuuni)	Kokkola (junttapaalu)	Siikajoki (Maalle)
perustus	4 320	1 710	1 000	1 200	1 080
pystytys	sis.	sis.	450	200	sis.
jääkartio	-	-	200	200	-
access platform	sis.	200	200	200	-
Yhteensä	4 320	1 910	1 850	1 800	1 080

Tunø Knob 10 x 500 kW laitosta (1995), Rødsand arvio 96 x 1,5 MW laitosta, Kokkola arvio 10 x 1,5 MW laitosta, Siikajoki 2 x 600 kW laitosta maalle (sis. tienrakennuksen 500 m, 1997).

Maalle rakennettaessa yllä oleviin vertailulukuihin tulee lisätä mahdolliset maanrakennustyöt, esimerkiksi tienrakennus, johon Siikajoen hankkeessa kului yli 10 % taulukossa esitetyistä perustamisen kokonaiskustannuksista.

Kokkolalle lasketut arviot ovat hyvin karkeita. Junttapaalu on 4 m halkaisijaltaan ja 23 m pituinen ja juntaussyvyys 16 m maan sisään. Tuulivoimalan kiinnitys junttapaaluun vaatii jonkinlaisen välikappaleen, jonka kustannukset on arvioitu hyvin karkeasti (100 kmk). Juntaustyössä on huomioitu säävara, halvimmillaan ilman sään aiheuttamia seisokkeja kustannukset olisivat 150 kmk laitosta kohti.

Taulukossa vertailut tapaukset ovat erikokoisille voimalaitoksille ja hankkeille: suurilla voimalaitoksilla ja hankkeilla perustuskustannukset lähestyvät maalle rakennetun perustuksen kustannuksia. On myös huomattava, että perustuskustannuksissa on suuria vaihteluita hankkeesta toiseen.

## 10.2 Tuulivoimahankkeen kustannusarvio

Merituulivoimahankkeen kustannukset on esitetty kahdelle jo toteutetulle projektille sekä Tanskan, Hollannin ja Suomen suunnitelluille hankkeille taulukossa 14. Tunø Knobissa on 10 x 500 kW laitosta (vuodelta 1995), Bockstigenissa 5 x 500 kW laitosta (vuodelta 1997), Rødsandiin suunnitellaan 96 x 1,5 MW laitosta, Ijmuideniin 100 x 1 MW laitosta ja Kokkolaan laskelmat on tehty 10 x 1,5 MW laitokselle. Taulukossa on esitetty myös maalle rakennetun tuulivoimahankkeen kustannukset (Siikajoki 2 x 600 kW vuodelta 1997). Vertailun vuoksi kustannukset ja tuotanto on esitetty taulukossa kaikille hankkeille 1,5 MW kohti.

Tuotantokustannukset p/kWh on laskettu kaavasta

$$h = \frac{Inv \cdot (a + o)}{E}, \quad (38)$$

jossa h on tuotantokustannus [mk/kWh], Inv on Investointikustannukset [kmk], a on annuiteetti (= 8 %, 20 vuoden takaisinmaksuaika ja 5 % korko), o on

käyttökustannukset (3 % vuotuisesta investoinnista merelle ja 2 % maalle) ja E on vuosituotanto [MWh/a].

*Taulukko 14. Tuulivoimahankkeen kustannusvertailu.*

kmk per 1,5 MW	Tunø Knob	Bockstigen Ruotsi	Ijmuiden Hollanti	Rødsand Tanska	Kokkola	Siikajoki (maalle)
perustus	4 320	4 200	5 548	1 912	1 800	1 080
tuulivoimala	7 728	9 600	7 452	11 888	9 600	7 197
verkkoonliitääntä	4 560	840	3 807	sis	1 100	474
muut kulut	864	sis	202	sis	500	145
Yhteensä	17 472	14 700	17 009	13 800	13 000	8 896
Tuotanto MWh/a	4 500	4 800	4 500	4 995	4 200	3 375
Kustannukset p/kWh	43	34	42	30	34	26

(sis = sisältyy kohtaan tuulivoimala) Tunø Knob 10 x 500 kW laitosta (1995), Rødsand arvio 96 x 1,5 MW laitosta, Ijmuiden arvio 100 x 1 MW laitosta, Kokkola arvio 10 x 1,5 MW laitosta, Siikajoki 2 x 600 kW laitosta maalle (1997).

Huomaa: Tuulivoimala-kohtaan sisältyvät laitoksen kuljetus ja pystytys sekä kaukokäyttö. Verkkoonliitääntä-kohtaan sisältyy merikaapeli. Perustus-kohtaan sisältyvät perustuksen suunnittelu ja asennustyöt. Mikäli Tunø Knobin kohdalla jätetään pois demonstraatioluonteiset kustannukset, ovat tuotantokustannukset noin 38 p/kWh.

Tunø Knob ja Bockstigen on esitelty tarkemmin kohdassa 7.2. Rødsand on yksi kohdassa 1.2.2 esitellyn Tanskan laajemman offshore-rakentamisen kohde (Gedser karttakuvassa 1). Se sijaitsee sisäsaaristossa, jossa on jonkin verran jääkuormia (Juhl et al., 1997). Ijmuiden on toinen Hollannin esiselvityksessä käsitelty 100 MW meritulipuistorakentamisen kohde (NOVEM, 1997). Perustuskustannukset ovat huomattavasti suuremmat kuin muissa hankkeissa, mihin vaikuttaa suurempi vesisyvyys ja se, että käytetty junttapaalu korvaa osan tuulivoimalan tornista eli yletty 20 m merenpinnan yläpuolelle.

Kokkolaan on tämän tutkimuksen puitteissa tehty arvio matalikolle Trulleivin kalasatamasta luoteeseen (Santapankki). Verrattuna Tanskan ja Hollannin suunniteltuihin hankkeisiin puiston koko on huomattavasti pienempi. Olosuhteet ovat jäiden kannalta vaativammat, mutta aaltokuormien osalta puolestaan vähemmän vaativat. Veden syvyys on 3 m (Tanska 5 m, Hollanti 17 m) ja etäisyys rannikkoon ainoastaan 3 km (Tanska 7–10 km, Hollanti 8–16 km). Tuulivoimalaitosten vuosituotanto ei myöskään ole yhtä suuri kuin kauempana merellä sijaitsevien kohteiden. Tuuliolosuhteiltaan paikka on Perämeren keskitasoa (keskituulennopeus > 7 m/s).

Kokkolan esimerkkitapauksessa verkkoonliittämiskustannukset on arvioitu Kokkolan energialaitoksella: 110 kV/20 kV asema tuulipuistoon (kustannukset noin 6 000 kmk), 110 kV merikaapelia 3 km (1 000 kmk/km) ja 20 kV merikaapelia puiston sisällä siten, että 4–6 laitosta on samassa johtolähdössä 400 m välein. Tuulivoimalan lisävarustuksiin ja tornin alaosan vahvistukseen on budjetoitu 200 kmk/laitos. Arviossa on varauduttu projektin hallintokustannusten lisäksi arvaamattomiin lisäkustannuksiin, joiden suuruus on noin 5 % tuulivoimalaitoksen hinnasta. Mikäli hanke toteutetaan, on syytä varautua lisäksi demonstraatiohankkeen vaatimiin lisäselvityksiin (esim. seurantamittaukset, ympäristövaikutusten selvittäminen). Tuulipuiston pystytys- ja perustuskustannukset perustuvat hyvin karkeisiin arvioihin. Pystytyskustannuksissa on tarkasteltu sekä pystytystä proomulta että uittoa. Erisuuruisten voimalaitosten (1,5–1,65 MW) perustus- ja pystytysvaihtoehtojen tuotantokustannusarviot olivat 32–35 p/kWh. Uitto osoittautui näiden ensimmäisten, karkeiden arvioiden perustella hyvinkin kilpailukykyiseksi ratkaisuksi voimaloiden pystytyksessä.

Taulukosta 14 huomataan selvästi, että merelle rakennetun tuulivoiman tuotantokustannukset ovat suuremmat kuin maalle rakennettaessa. Myös eri hankkeiden kustannusarvioissa on suuri vaihteluväli. Perämerellä on mahdollista joissakin sijoituspaikoissa käyttää hyväksi pystyttämistä jään päältä, minkä on arvioitu alentavan pystytyskustannuksia huomattavasti (Energia-Ekono, 1998).

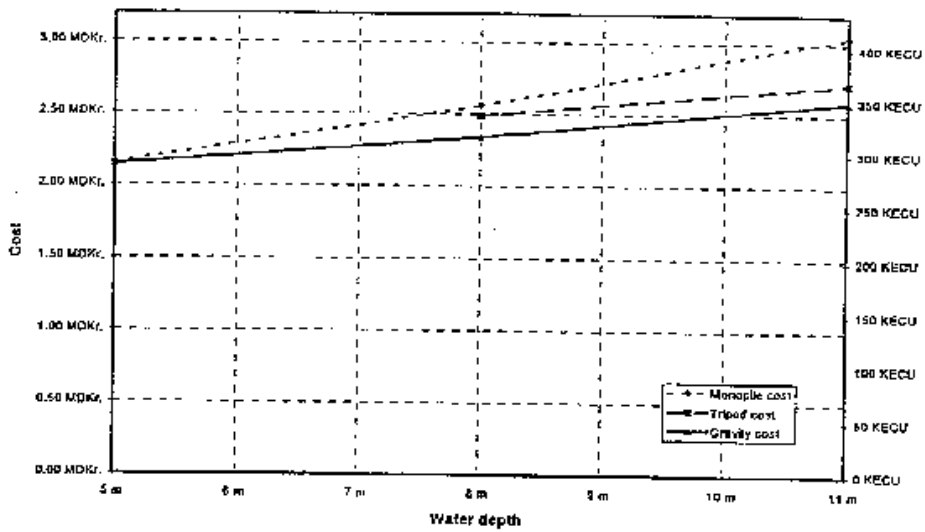
### 10.3 Projektikoon ja vesisyvyyden vaikutus kustannuksiin

Merelle rakennettaessa perustamisen ja sähköverkkoon liittämisen kustannukset ovat suuret. Perustuskustannuksia voidaan vähentää rakentamalla suuria laitoksia: 1,5 MW voimalaitoksen perustus on huomattavasti edullisempi kuin kolmen 0,5 MW laitoksen perustukset. On arvioitu, että Tunø Knobin tapauksessa 1,5 MW yksikkökoon ja uusimman perustustekniikan käyttäminen alentaa kustannukset 38 p:stä/kWh 25 p:iin/kWh. On mahdollista, että tuulivoimalaitoskokoja vielä kasvatetaan useaan megawattiin nimenomaan merituulipuistojen taloudellisuuden parantamiseksi. Tällöin perustuskustannukset suhteessa tuotettuun energiaan edelleen pienenevät.

Myös jääkuormien kannalta merelle kannattaa rakentaa suuria voimaloita. Siirryttäessä 600 kW kokoluokasta megawattiluokkaan jäävoimat kasvavat vain vähän verrattuna tuulivoimien kasvuun. Jäävoimat kasvavat suhteessa jään kohtaamaan pinta-alaan (600 kW:n laitoksen tornin tyven halkaisija on noin 3–3,5 m ja 1,5 MW:n luokassa 4 metriä), ja tuulivoimat suhteessa korkeuteen ja roottorin halkaisijaan (600 kW:n laitoksen korkeus 50 m ja halkaisija 40 m, 1,5 MW korkeus 60–80 m ja halkaisija 57–66 m). Megawattiluokan voimalan peruskuormitus on merkittävästi suurempi kuin puolen megawatin, ja jääkuormien merkitys kokonaiskuormituksessa vähenee voimalan koon kasvaessa.

Suuren tuulipuiston kohdalla kaikki kiinteät kustannukset jakautuvat suuremmalle tuotetulle energiamäärälle. Myös sähköverkkokustannukset suosivat suuria projektikokoja, jolloin merikaapelikustannus jakautuu useamman yksikön kesken. Esimerkiksi Kokkolalle lasketun tuulipuiston tapauksessa 10 voimalan verkkoonliittämiskustannusten on arvioitu olevan 1 100 kmk/laitos, 20 voimalan tapauksessa 600 kmk/laitos ja 30 voimalan tapauksessa 450 kmk/laitos.

Kun tuulivoimalaitosten etäisyys mantereeseen kasvaa, kasvavat myös sähköverkkoon liittämisen kustannukset. Esimerkiksi Tanskassa 7,5 MW merituulipuiston kustannusten on laskettu olevan 26 p/kWh, kun etäisyys on 5 km, ja 35 p/kWh, kun etäisyys on 30 km. Kun tuulipuiston kokoa kasvatetaan, kustannukset tuotettua tehoa kohti vähenevät. Esimerkiksi 200 MW merituulipuiston kustannusten on laskettu olevan 22–23 p/kWh, kun etäisyys mantereeseen on 5–30 km (Morthorst & Schleisner, 1997).



Kuva 21. Kolmen perustustyypin kustannukset veden syvyyden funktiona.

Perustaminen syvään veteen lisää kustannuksia (kuva 21). Veden syvyyden vaikutuksen perustuskustannuksiin on arvioitu olevan 12–34 % siirryttäessä 5 m syvyydestä 11 m syvyyteen (Juhl et al., 1997).

# 11. Yhteenveto

Perämeren alueella on laajoja matalikoita, jotka soveltuvat tuulivoiman tuottamiseen. Meren pohja on enimmäkseen kohtuullisen kantavaa ja tasaista. Merkittävän ongelman muodostaa jäiden aiheuttama jääkuorma, joka rasittaa perustuksia ja voimalaitosta. Alueelle mahdollisesti rakennettavat merituulivoimalat olisivat ensimmäiset maailmassa, joiden mitoituksessa jääkuormat olisivat olennaisen tärkeitä. Raportissa on käyty läpi jäälle sopivat lujuusarvot ja jään aiheuttamat kuormitustapaukset ja niiden laskenta. Pääasiallinen kuorma syntyy jään liikkeessa sen murskautumisesta rakennetta vasten. Rakenteen kartiomuoto pienentää tätä kuormaa noin kolmannekseen ja vähentää myös dynaamista kuormitusta. Megawattiluokan tuulivoimaloiden kannalta päädyttiin suositteluun paikkoja, joilla liikkuvien jäiden paksuus on alle 40 cm. Alle megawatin laitoksia ei suositella sijoitettavaksi yli 5 m syvyiseen veteen alkutalven jääkasautumien välttämiseksi. Tuulivoimalaan suositellaan rakennettavaksi jääkartio vesirajaan pienentämään jääkuormia. Lisäksi tulee huomioida mahdollisesti tarvittava tornin alaosan vahvennus. Myös aaltokuormia ja eroosion vaikutusta on käsitelty raportissa Perämeren merituulivoiman kannalta, ja nämä tulee ottaa huomioon merituulivoimalan perustuksia suunniteltaessa.

Merituulivoiman tekninen potentiaali Suomen Perämeren matalikoilla, Vaasasta Tornioon, on yli 40 TWh/a, kun vaaditaan 7 m/s keskituulennopeus, alle 10 m veden syvyys ja liikkuvien jäiden paksuudeksi alle 40 cm. Potentiaali on laskettu täyttämällä kaikki yllä olevat ehdot täyttävät alueet tuulivoimalaitoksilla (lähes 2 000 km<sup>2</sup>, yli 11 000 voimalaa, vajaat 17 000 MW). Käytännössä toteutuskelpoisia alueista on vain osa, kun otetaan huomioon alueiden käytön rajoitukset (mm. merenkulku, luonnonsuojelu ja puolustusvoimat).

Merituulivoimalaitosten perustukset ovat huomattavasti vaativampia kuin maalle rakennettavat. Rakenteiden suunnittelussa on huomioitava kaikkien ympäristötekijöiden vaikutukset. Rakennemateriaaleissa ja pintakäsittelyissä on kiinnitettävä huomio teräksen korroosion ja betonin huokosveden jääytymisen estoon sekä pohjan eroosioon. Kulkutiet tuulivoimalaitokseen on tehtävä siten, että sinne nousu on mahdollista sekä kohtuullisessa aallokossa että talvella jäiden aikaan. Perustusrakenteiden muotoilulla voidaan pienentää jääkuormia merkittävästi. Mitoituksen tulee ottaa huomioon sekä paikalliset korkeat jääpaineet että laajalta alalta kertyvät kokonaisjääkuormat sekä staattisina että dynaamisina. Kun tarkastellaan alle 40 cm paksuisia liikkuvia jäitä, jotka



murskautuvat jääkartiota vasten, jäävät jäiden aiheuttamat kuormittavat voimat alle 1 MN:iin. Raportissa on tarkasteltu elementeistä rakennettua kasuuniperustusta ja sen pystytystä erityyppisiin vesiin.

Perustuksien ja tuulivoimalan kuljettaminen paikan päälle nostaa kustannuksia, koska siirrettävät ja nostettavat massat ovat suuria. Perustus painaa satoja tonneja betonivalmiina ja tuhansia tonneja massoilla täytettynä, ja voimalan paino on lähes 200 tonnia. Tornin korkeus on 50–80 metriä. Pystytyksessä on tarkasteltu ensisijaisesti uittoa ja sen vakavuutta.

Yhden megawattiluokan tuulivoimalan perustuksen kustannukset ovat arviolta 1,5–2,5 miljoonaa markkaa sisältäen perustuksen asentamisen ja merenpohjan valmistelutyöt. 10 laitoksen merituulipuistolle tehdyt alustavat kustannusarviot osoittavat, että merituulivoima on vielä selvästi maalle rakennettavaa kalliimpaa, 32–35 p/kWh verrattuna 26 p:iin/kWh. Rakennettaessa suuria merituulipuistoja kustannukset tuotettua kWh kohti putoavat. Esimerkiksi Tanskassa vuosituhannen vaihteessa rakennettavien merituulipuistojen, joiden suuruusluokka on 100 tuulivoimalaa (150 MW), arvioidut tuotantokustannukset ovat noin 30 p/kWh (maalle rakennettaessa noin 20 p/kWh). Tuulivoimalaitoskoko on viimeisten 10 vuoden aikana kasvanut sadan kilowatin kokoluokasta megawattiluokkaan. Tällä hetkellä 1,5 MW voimalaitoksia on kaupallisesti saatavilla, ja nimenomaan merituulivoimaa ajatellen on aloitettu 2–3 MW laitosten suunnittelu. Perustustekniikoiden kehittyessä ja suuria yksiköitä rakennettaessa on merituulivoimalla mahdollista saavuttaa maalle rakennettavan tuulivoiman kustannukset ainakin siinä vaiheessa, kun parhaat rannikkopaikat on jo rakennettu.

# Lähdeluettelo

Cammaert, A., Kimura, T., Koma, N., Yashima, N., Yano, S. & Matsushima, Y. 1986. Adfreeze forces on offshore platforms. Proc. OMAE-86, Vol-IV. ASME, New York. S. 541–548.

Cammaert, A. B. & Muggeridge D. B. 1988. Ice interaction with offshore structures. van Nostrand Reinhold, New York. 432 s.

de Bruijne, R. & 't Hooft, J. L. 1996. Status and development of wind energy in the Netherlands. Proceedings of European Community Wind Energy Conference ECWEC'96. H. S. Stephens & Associates, UK. S. 40–44.

de Bruijne, R. 1997. The Netherlands market: a trend towards large scale applications. Proceedings of European Wind Energy Conference EWEC'97. H. S. Stephens & Associates, UK. (Julkaistaan 1998.)

Energia-Ekono. 1998. Pohjois-Pohjanmaan rannikon tuulivoimakartoitus - teknistaloudelliset tarkastelut. Energia-Ekono.

Energistyrelsen. 1995. Vindmøller i danske farvande - Kortlægning af myndighedsinteresser, vurderinger og anbefalinger. Miljø- og Energiministeriets udvalg om havbaserede vindmøller, Energistyrelsen, Tanska.

Faltinsen, O. M. 1990. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain. 328 s.

Haapanen, E., Määttänen, M. & Koskinen, P. 1997. Offshore wind turbines in ice-infested waters. Proc. OWEMES'97, La Maddalena, Italy, 10.–11.4.1997. ENEA, Italy. S. 297–304.

Herbich, J. B. (ed.) 1991. Handbook of coastal and ocean engineering, Volume 2, Offshore structures, marine foundations, sediment processes and modeling. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA. 1154 s.

IAHR working group on "Ice Forces on Structures" State of Art Reports, 1980, 1984, 1986, 1988 ja 1992.

Juhl, H., Lorin Rasmussen, J., Birck, C., Gormsen, C. & Lyngesen, S. 1997. Cost-efficient foundation structures for large offshore wind farms. Proceedings of Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas OWEMES'97, La Maddalena, Italy, 10.–11.4.1997. ENEA, Italy. S. 407–419.

Karppinen, T., 1989. Merenmittausaluksen suorituskyky merenkäynnissä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tutkimusselostus LAI-9210/89, Espoo. 21 s. + liitt. (Luottamuksellinen.)

Källstrand, B. 1996. Do simple models give a correct description of the wind conditions in a coastal area? Proceedings of European Community Wind Energy Conference ECWEC'96. H. S. Stephens & Associates, UK. S. 534–537.

Kärnä, T. 1992. Modelling of dynamic soil-structure-ice interaction. Proc. Structural Analysis Espoo, March 17–18, 1992. Espoo: VTT Symposium 128. S. 139–158.

Lepistö, A. 1997. Haastattelu. Hailuoto 18.3.1997.

Leppäranta, M. & Hakala, R. 1989. Field measurements of the structure and strength of first-year ice ridges in the baltic sea. The American Society of Mechanical Engineers, the Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, the Hague, the Netherlands, Vol. IV. ASME, New York. S. 169–174.

Leppäranta, M., Palosuo, E., Grönvall, H., Kalliosaari, S., Seinä, A. & Peltola, J. 1988. Itämeren jäätalven vaiheet (leveyspiiriltä 57°N pohjoiseen). Finnish Marine Research N:o 254, Supplement 2. Merentutkimuslaitos, Helsinki. 83 s.

Madsen, P.S. 1996. Tunø Knob offshore wind farm. Proceedings of European Community Wind Energy Conference ECWEC'96. H. S. Stephens & Associates, UK. S. 4–7.

Martin, N. 1998. One hundred megawatt offshore. *Windpower Monthly*, Vol. 11, no 1.

Michel, B. 1978. *Mechanics of ice*. Les Presses de L'Universite Laval, Quebec.

Morthorst, P. E. & Schleisner, L. 1997. Offshore wind turbines - wishful thinking or economic reality? Proceedings of European Wind Energy Conference EWEC'97, Dublin 6.–9.10.1997. H.S. Stephens & Associates, UK. (Julkaistaan 1998.)

Mäkinen, S. & Kronqvist, J. 1997. Haastattelu. Kalajoki 20.3.1997.

Määttänen, M. 1984. Design recommendations for ice effects on aids-to-navigation. IALA Technical Committee to Study the Effect of Ice on Lighthouses. International Association for Lighthouse Authorities, Paris. 55 s.

Määttänen, M. 1987. Ten years of ice-induced vibration isolation in lighthouses. Proc. 6th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Houston Texas, March 1–6, 1987, Vol. 4. The American Society of Mechanical Engineers, New York. S. 261–266.

Määttänen, M., Nortala A., Hoikkanen, A. & Avis, J. 1996. Ice failure and ice loads on a conical structure - Kemi-I cone full scale ice force measurement data analysis. Invited lecture. In: Proc. IAHR Symposium on Ice 1996, Vol. I. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China. S. 8–16.

Nevel, D. 1979. Bending and Buckling of a Wedge on an Elastic Foundation. Proc. Iutam, Symposium on Physics and Mechanics of Ice. Copenhagen, Denmark. S. 278–288.

Newman, J. N., 1982. *Marine hydrodynamics*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA. 402 s.

NOVEM, 1997. *Haalbaarheidsstudie Demonstratieproject Near Shore Windpark*, Novem, Hollanti.

Noponen, J. & Määttänen, M. 1993. Jään terminen liikenopeus ja jäävoimat. Research Report No. 16. Teknillinen korkeakoulu, Lujuusopin laboratorio, Espoo.

Oksanen, P. 1980. Coefficient of friction between ice and some construction materials, plastics and coatings. VTT Rakennetekniikan laboratorio, Tiedonanto 7. Espoo. 73 s.

Oksanen, P. 1982. Adhesion strength of ice. VTT Research Report 123. Espoo. 61 s. + liitt. 5 s.

Palosuo, E., Leppäranta, M., Seinä, A. 1982. Formation, thickness and stability of fast ice along the finnish coast. Research Report No 36, Styrelsen för vintersjöfartforskning, Helsinki and Norrköping. 19 s. + liitt.

Peltola, E. 1989. Tuulienergian tuotantomahdollisuudet Suomessa. Rannikko ja saaristoalueet. NEMO-raportti 9. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo. 87 s. + liitt.

Pettersson, H. 1997. Perämeren aallokko. Merentutkimuslaitos, raportti 31.10.1997. 2 s.

Pinola, K. 1997. Haastattelu. Raahe 19.3.1997.

Poulsen, E. 1997. Vestas experience with off-shore wind energy. Proceedings of European Wind Energy Conference EWEC'97. H. S. Stephens & Associates, UK. (Julkaistaan 1998.)

Ralston, T. 1977. Ice force design considerations for conical offshore structures. Proc. POAC 1977, Vol II. Memorial University of Newfoundland, St.John's, Newfoundland, Canada. S. 741–752.

Rautavuoma, R. 1997. Haastattelu. Virpiniemi 17.3.1997.

RIL 144-1997 Rakenteiden kuormitusohjeet.

Sanderson, T. J. O. 1986. A pressure-area curve for ice. The Eighth International Symposium on Ice, Iowa City, USA, August 18–22, 1986, Vol. II. IAHR, USA. S. 361–384.

Seinä, A., Grönvall, H., Kalliosaari, S. & Vainio, J., 1996. Jäätalvet 1991–1995 Suomen merialueilla. MERI Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, No. 27. Merentutkimuslaitos, Helsinki. S. 3–77.

SMHI & Merentutkimuslaitos, 1982. Climatological ice atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern (1963–1979). Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) and Institute of Marine Research (Merentutkimuslaitos). Norrköping, 220 s.

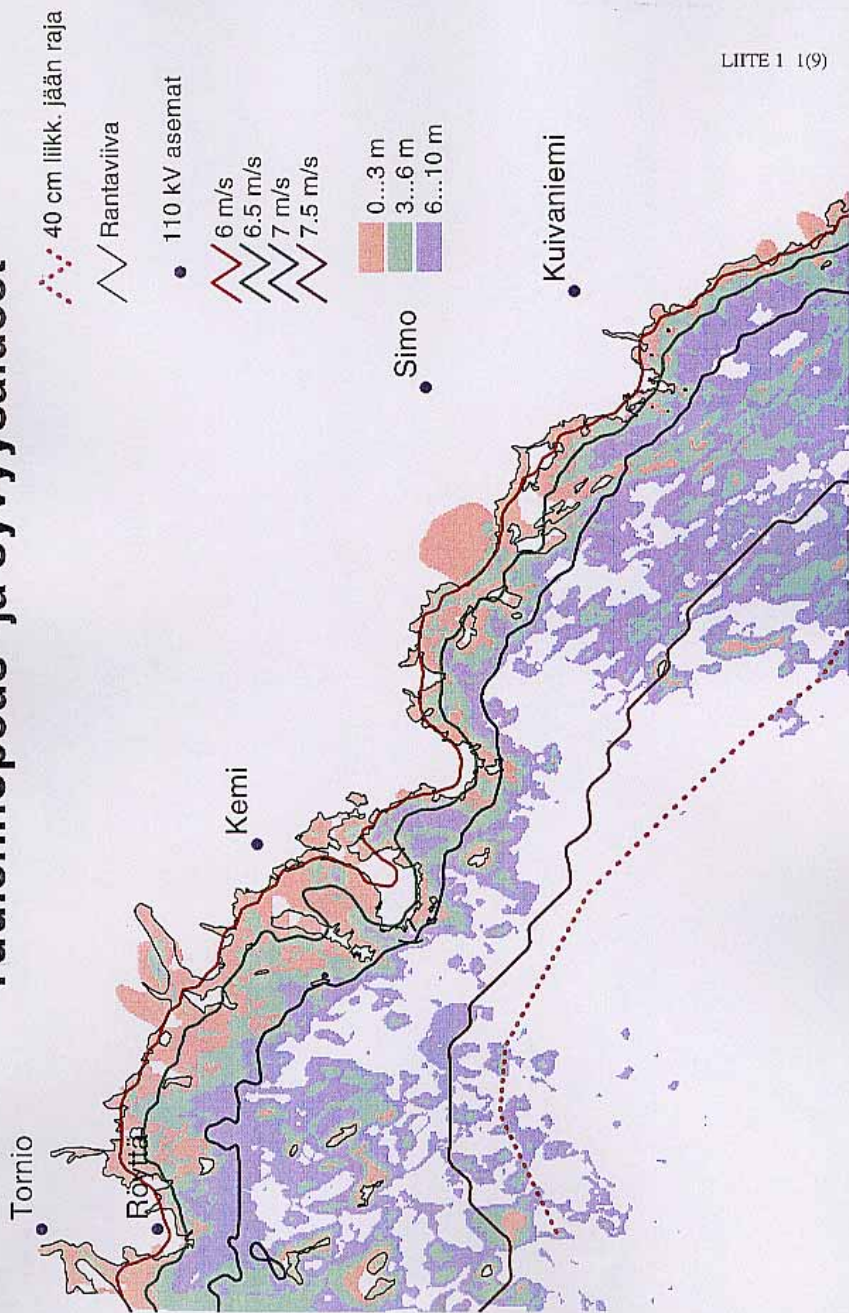
Sodhi D. & Nevel D. 1980. A review of buckling analysis of ice sheets. In: IAHR State of the Art Report on Ice Forces, Special Report 80–26. US Army CRREL, Hanover, NH.

Sommardal, T., Holttinen, H., Lemström, B. & Peltola, E., 1994. Tuulivoimaloiden sijoittaminen luodoille. VTT tiedotteita 1572, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 58 s. + liitt. 24 s.

Tammelin, B. 1991. Suomen Tuuliatlas. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 356 s.

Wizelius, T. 1997. Havsbaserad vindkraft i Öresund. Energimagasinet 7:1997.

# Tuulennopeus- ja syvyyssalueet



LIITE 1 1(9)

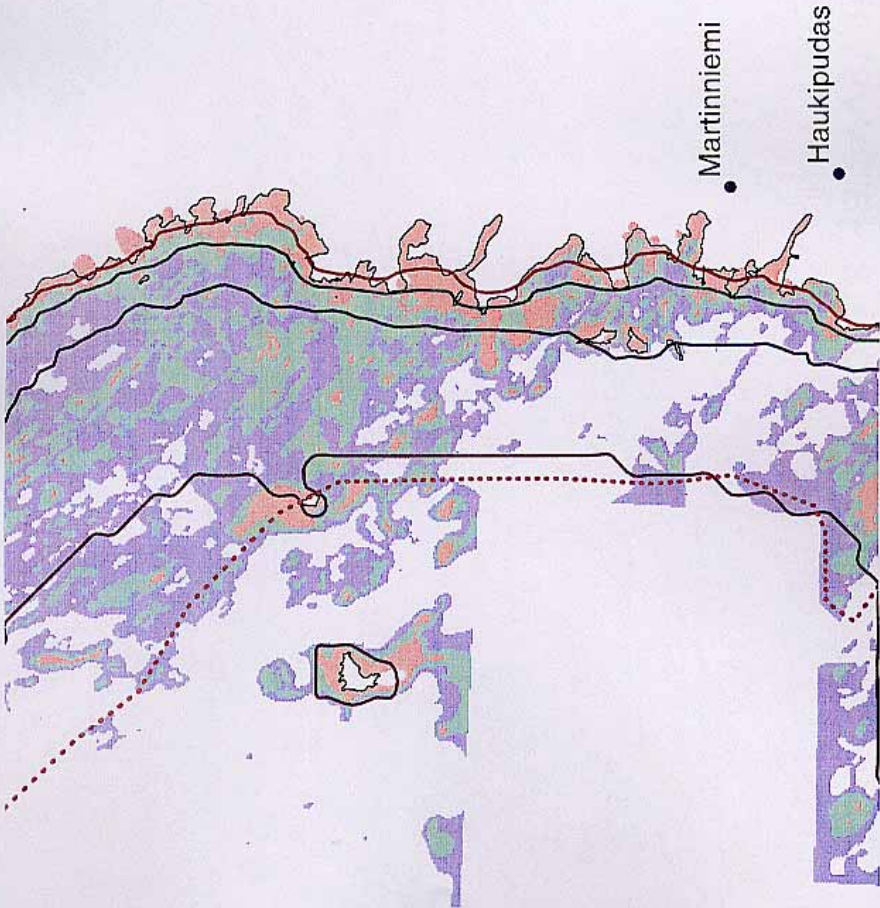
40 cm liikk. jään raja

Rantaviiva

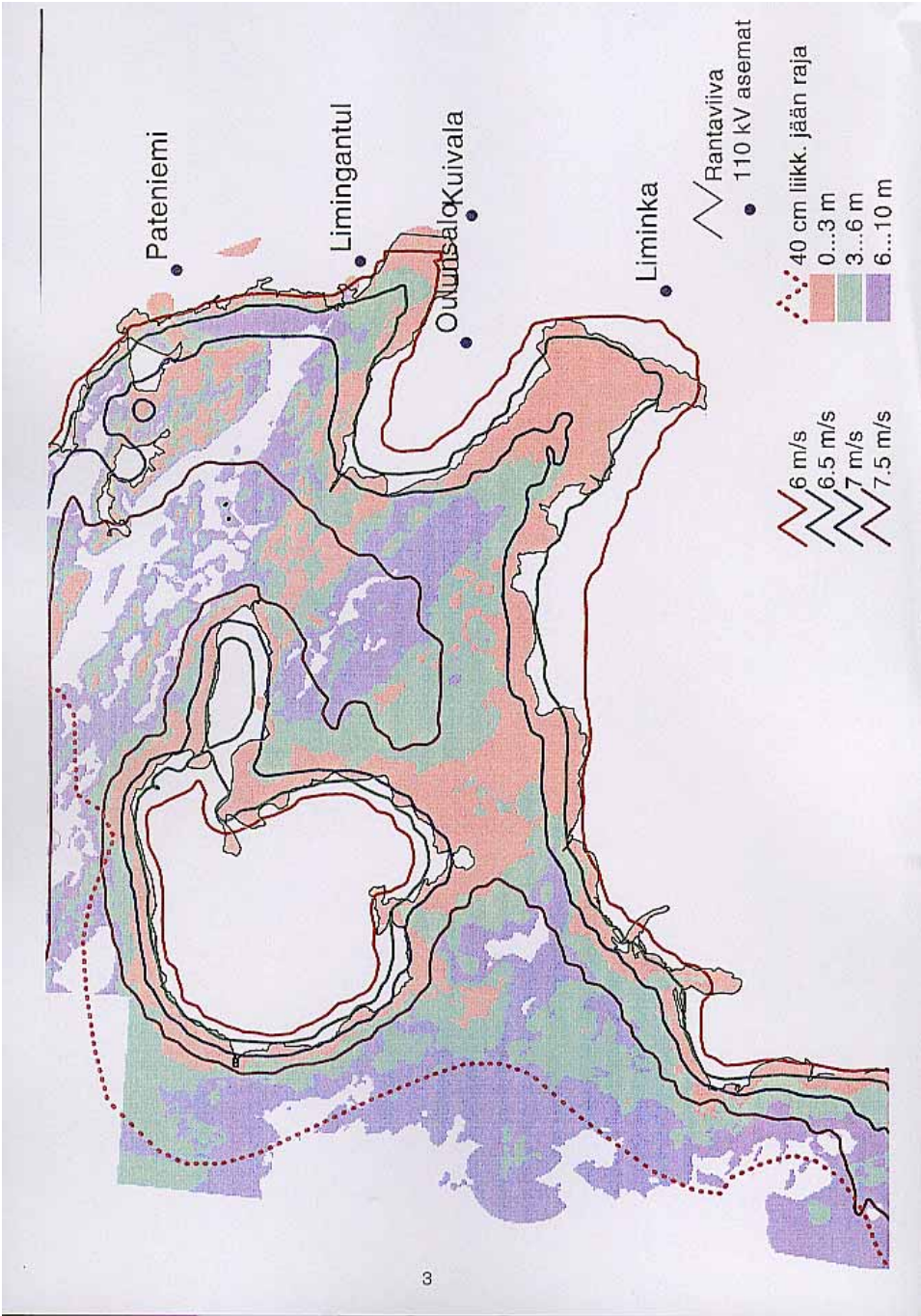
110 kV asemat

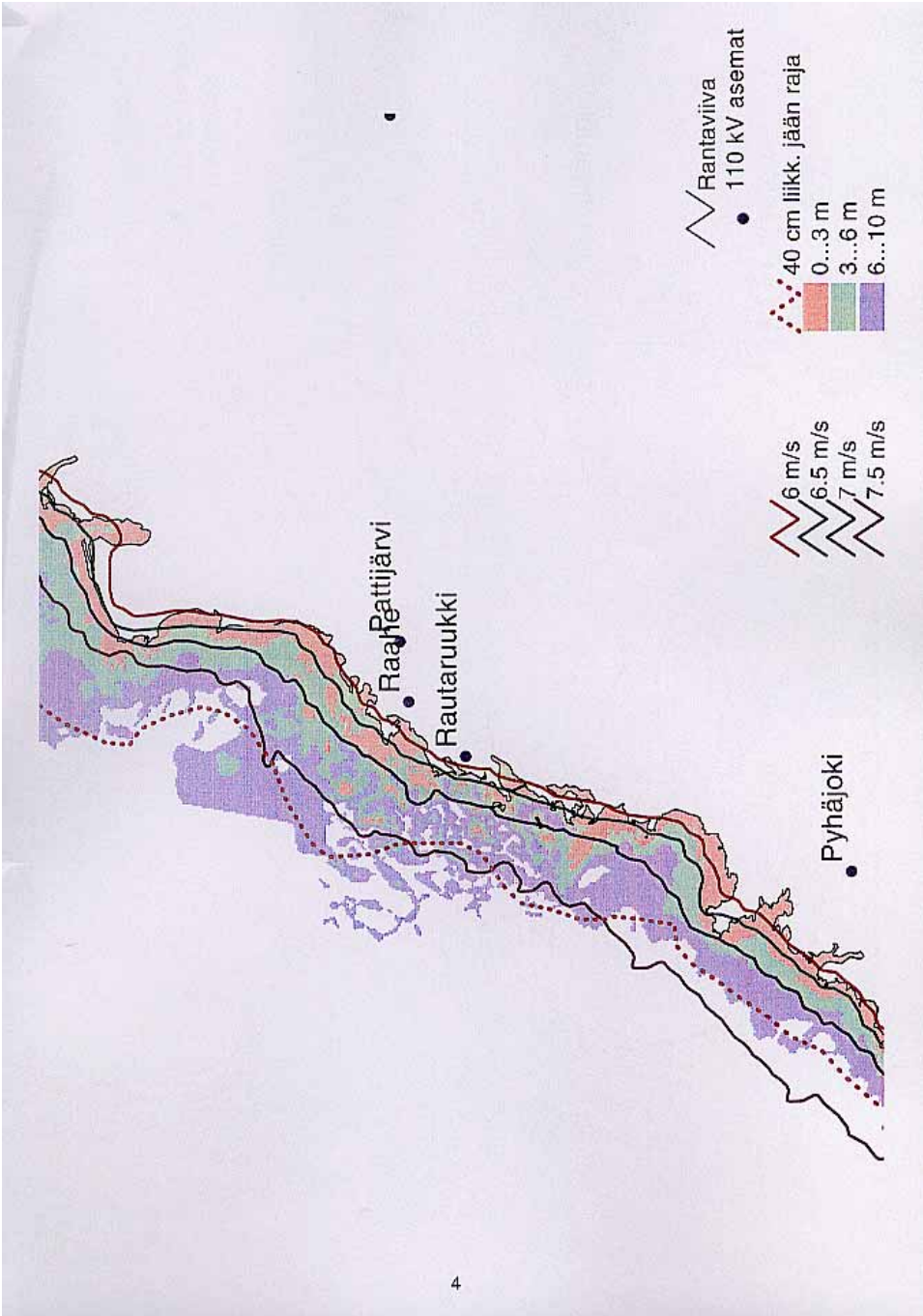
6 m/s  
6.5 m/s  
7 m/s  
7.5 m/s

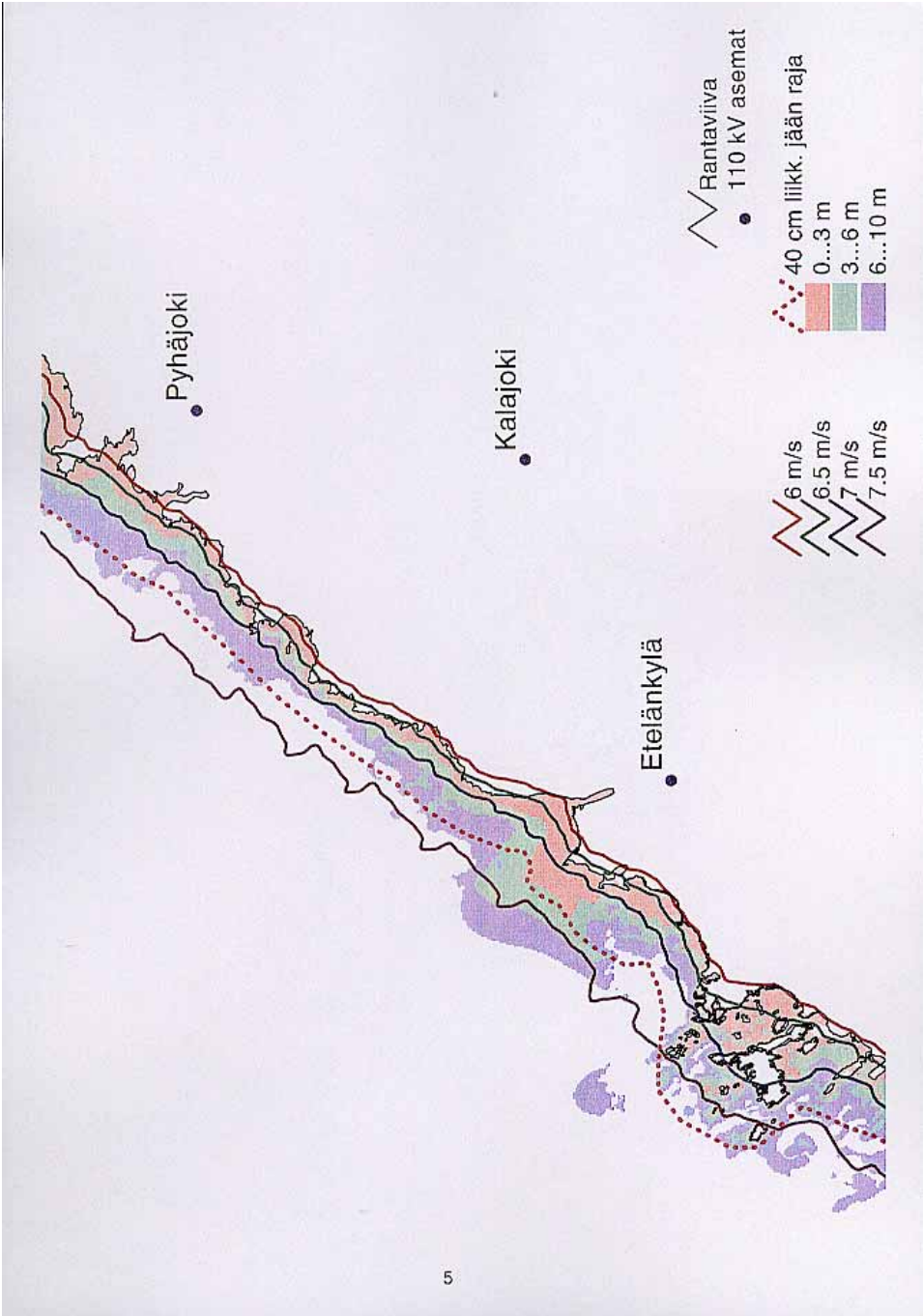
0...3 m  
3...6 m  
6...10 m

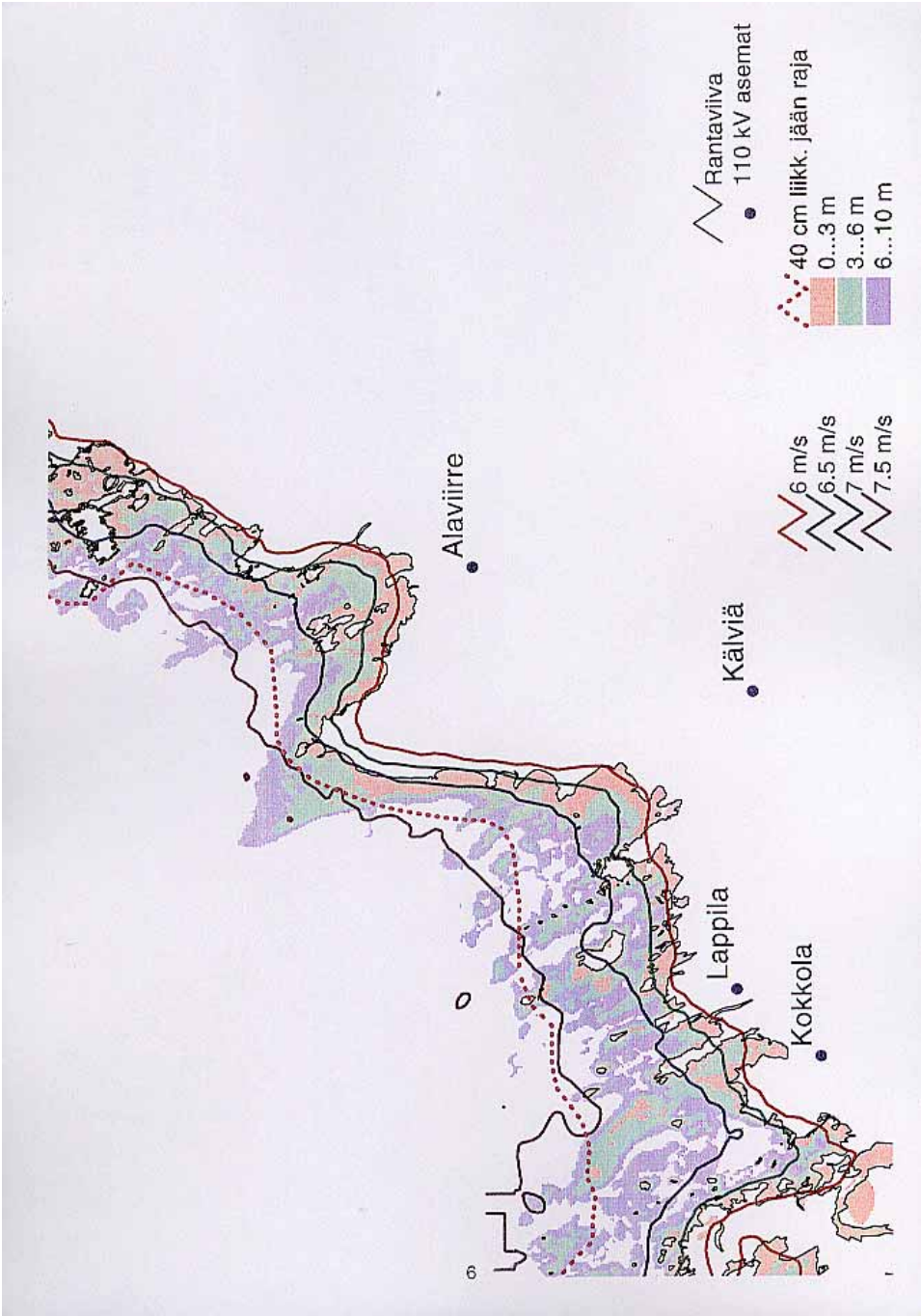




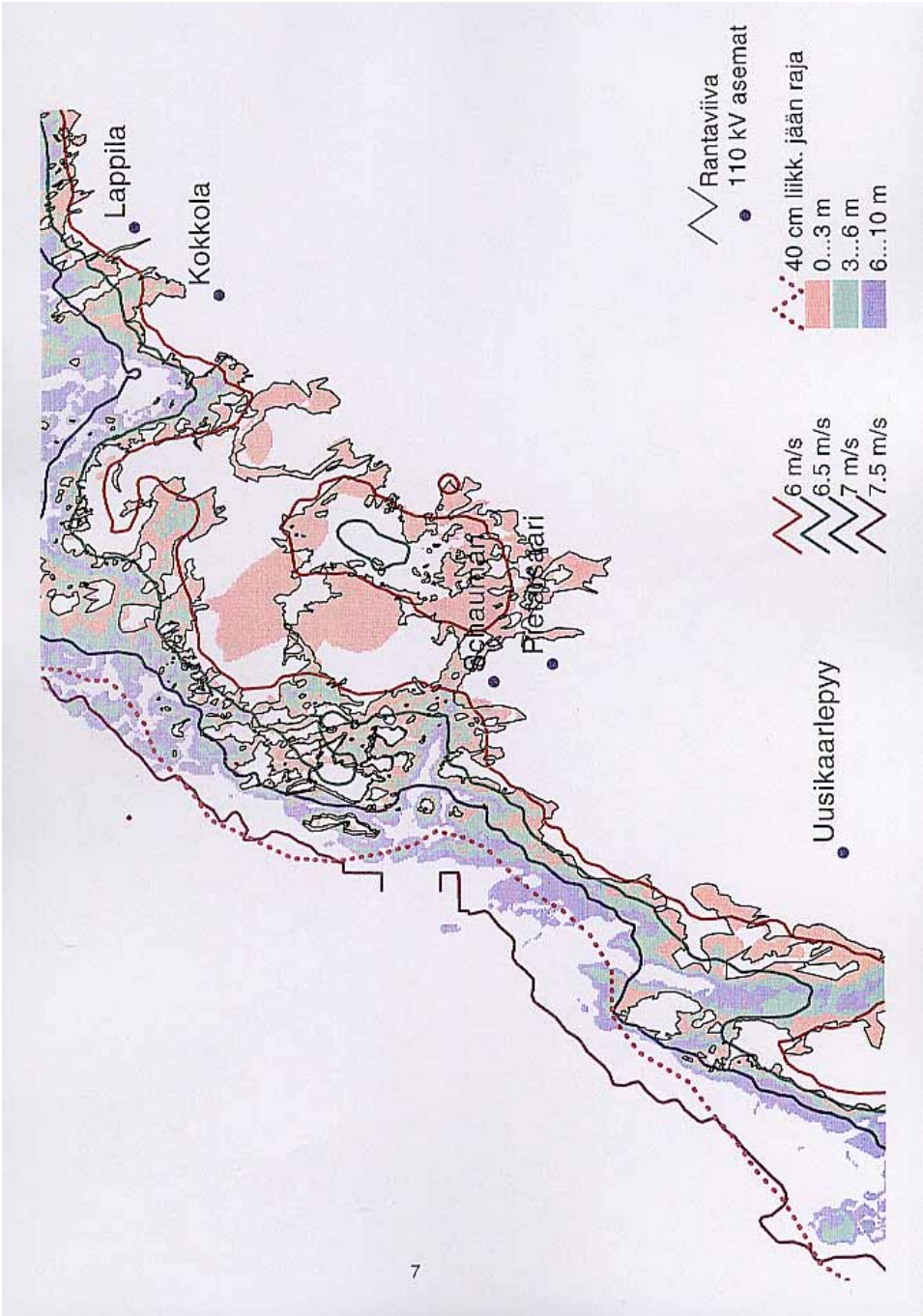


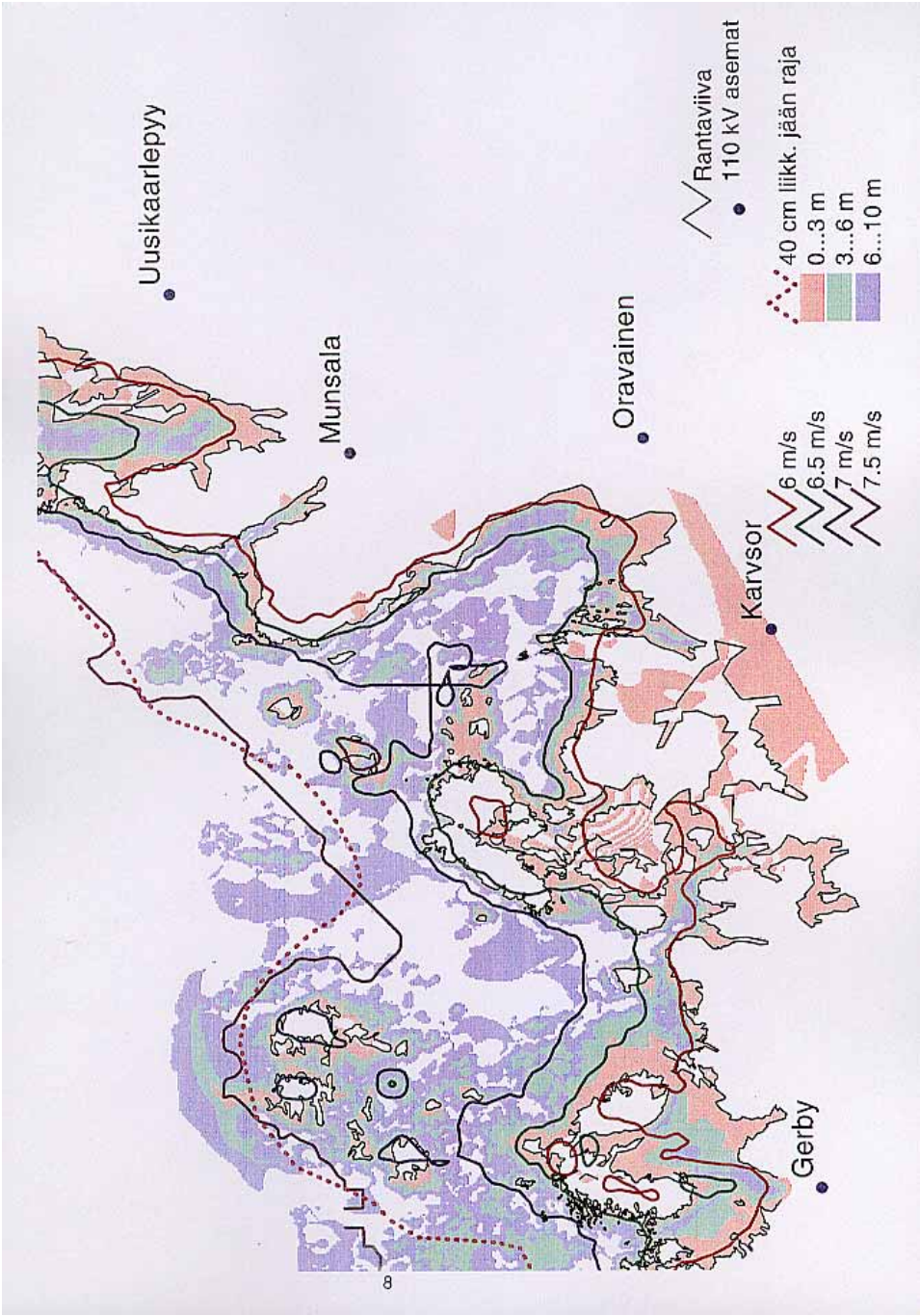




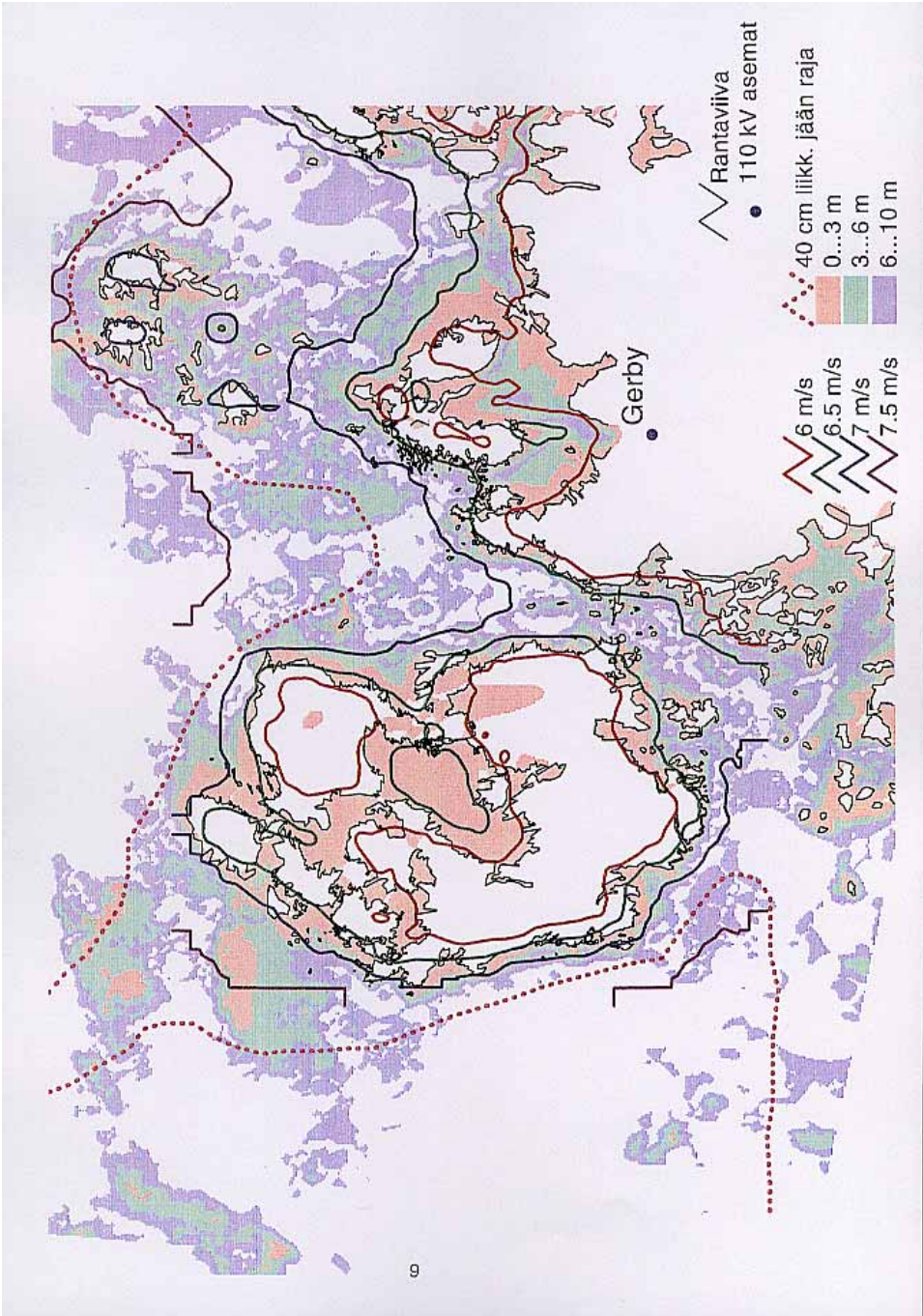






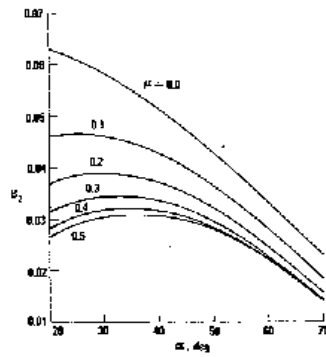
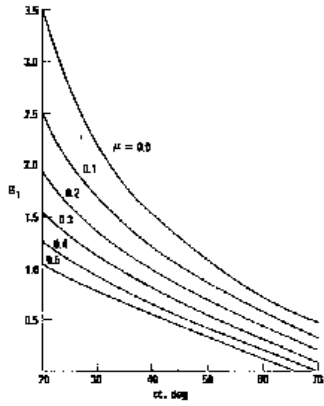
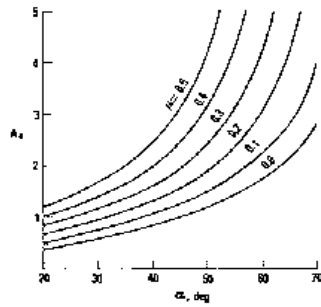
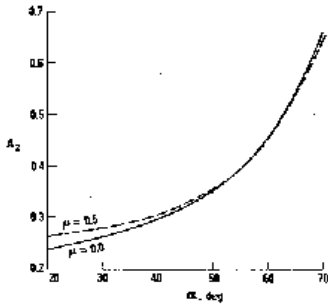
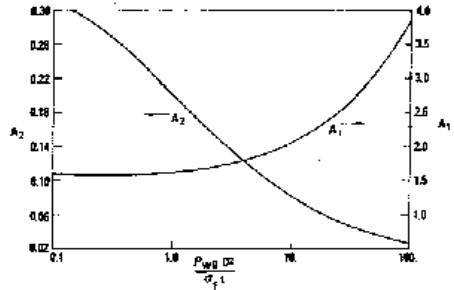
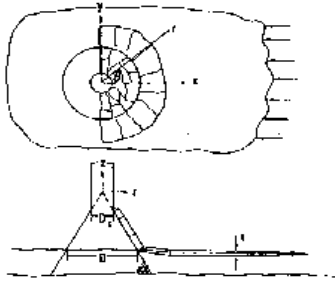






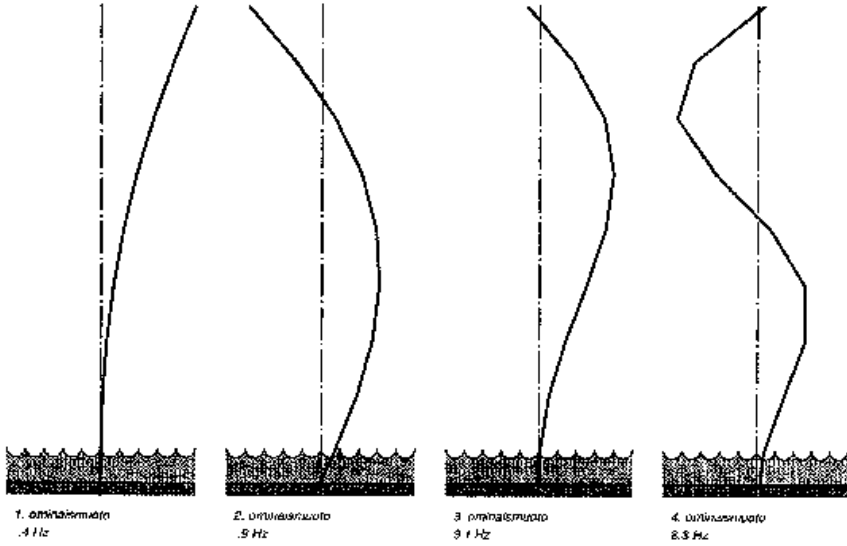
## LIITE 2

# Kartion jäävoimakaavan kertoimet (Ralston)

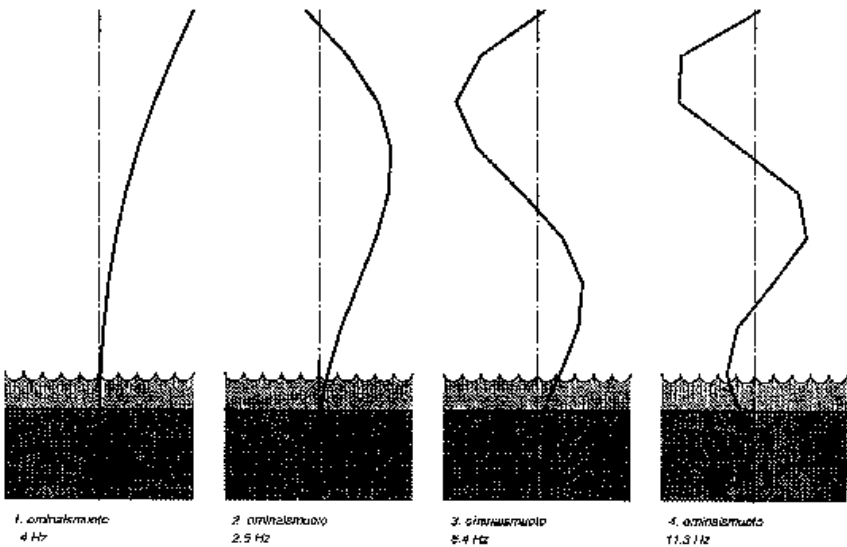




# Värähtelyanalyysi 1,5 MW voimalalle WG/KASUUNIPERUSTUS

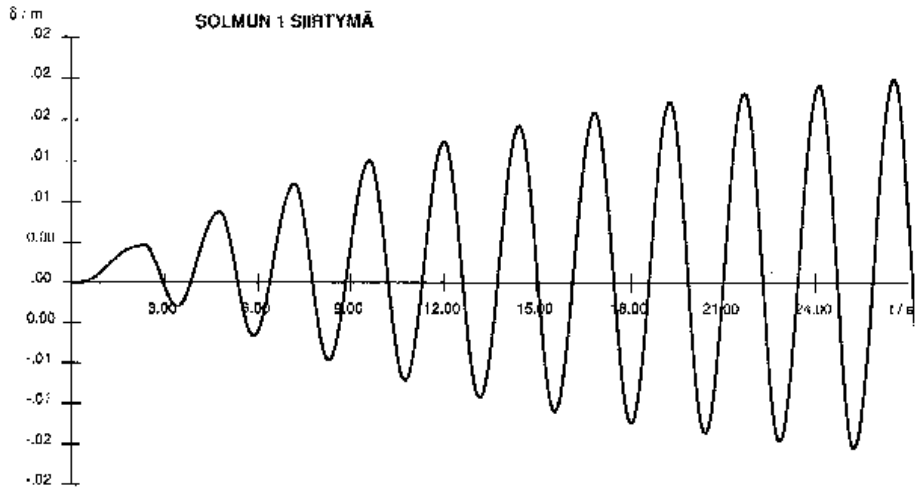


## WG/PAALUPERUSTUS



### WG/KASUUNIPERUSTUS

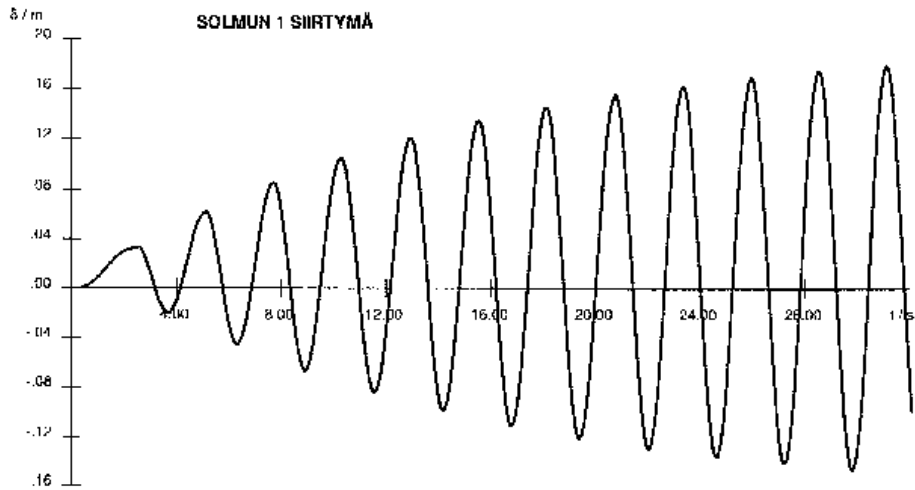
SOLMUN 1 SIIRTYMÄ



Transientivahä  
1. värähtelivävyys 4 Hz  
Maksimi 0.02 m  
Minimi -0.02 m

### WG/PAALUPERUSTUS

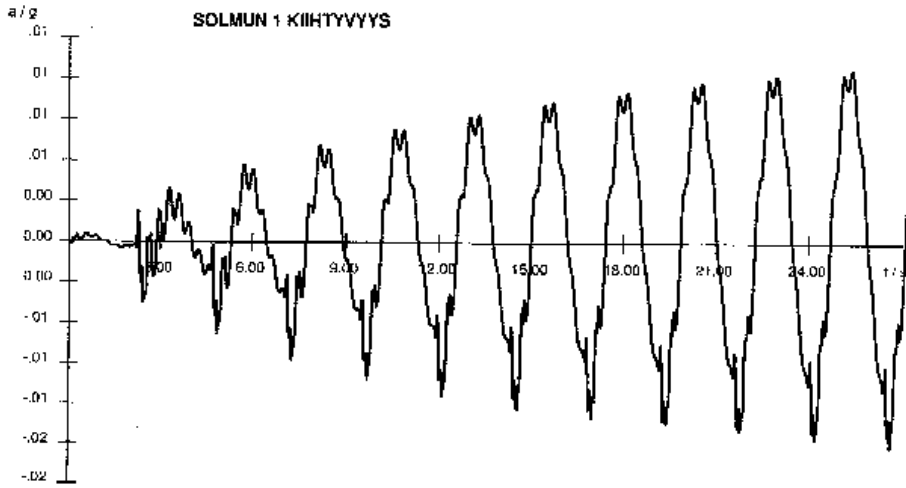
SOLMUN 1 SIIRTYMÄ



Transientivahä  
1. värähtelivävyys 4 Hz  
Maksimi 0.18 m  
Minimi -0.15 m

### WG/KASUUNIPERUSTUS

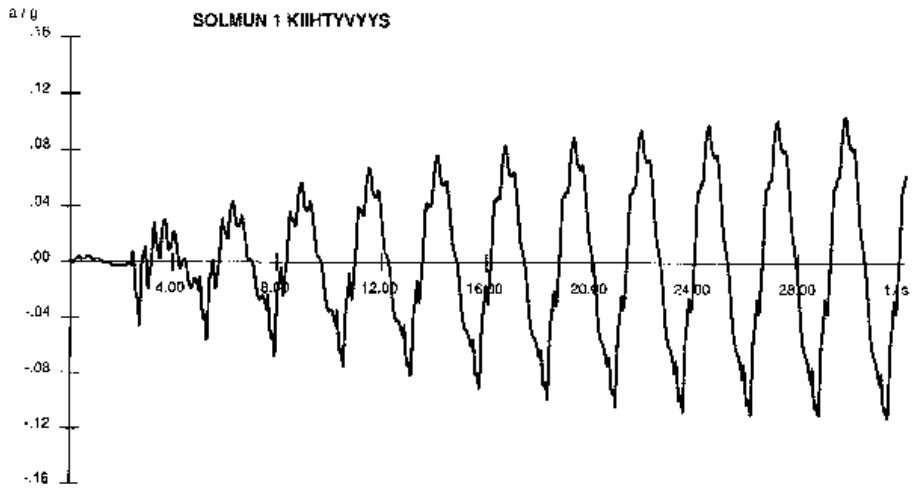
#### SOLMUN 1 KIIHTYVYYS



Transientti-aika  
1. resonanssitaajuus 4 Hz  
Maksimi .01 g  
Minimi -.02 g

### WG/PAALUPERUSTUS

#### SOLMUN 1 KIIHTYVYYS



Transientti-aika  
1. resonanssitaajuus 4 Hz  
Maksimi .10 g  
Minimi -.11 g