

Kiinteiden merimerkkien kuormitusohje

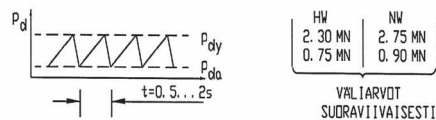
9.5.2011



MITOITUSKUORMAT:

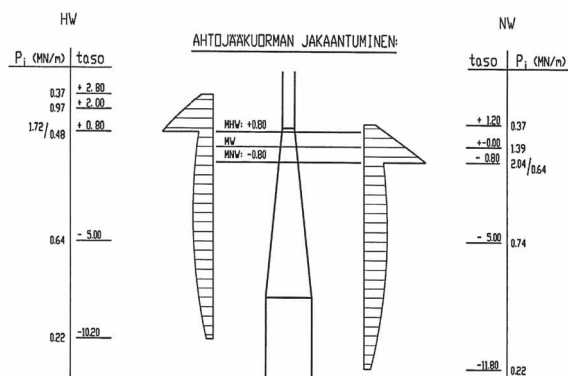
1. TUULIKUORMAT
NOPEUSPAINNE : $p = 1.5 \text{ kN/m}^2$
MUOTOKERTOIMET : LEVYT : $c = 2.0$
PUTKI : $c = 0.8$
2. KIINTOJÄÄKUORMAT
 $P_1 = 3.85 \text{ MN TASOLLA} + 0.55$
 $P_2 = 4.60 \text{ MN TASOLLA} - 1.05$ } VALIARVOT SUORAVIIVAISESTI
3. AHTOJÄÄKUORMAT
 $R_{H1} = 6.3 \text{ MN TASOLLA} - 2.70$
 $R_{H2} = 0.6 \text{ MN}$
 $R_{V1} = 7.0 \text{ MN TASOLLA} - 4.20$
 $R_{V2} = 0.8 \text{ MN}$ } VALIARVOT SUORAVIIVAISESTI

4. DYNAAMINEN KUORMITUS



5. KORROOSIOVARAUKSET

- VALILLA +12.00 - + 1.50: 3 mm
- VALILLA + 1.50 - - 2.50: 6 mm
- VALILLA - 2.50 - -12.50: 3 mm
- VALILLA -12.50 - -17.00: 0 mm



Kiinteiden merimerkkien kuormitusohje

9.5.2011

Liikenneviraston ohjeita 10/2011

Liikennevirasto

Helsinki 2011

Kannen kuva: Liikenneviraston kuva-arkisto

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-670-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

9.5.2011

Väylänpidon ohjaus ja kehittäminen

Vastaanottaja
Liikenneviraston Investointi- ja Kunnossapito-toimialat

Voimassa
9.5.2011 lähtien toistaiseksi

Asiasanat

Kiinteiden merimerkkien kuormitusohje

Tämä ohje on tarkoitettu vesialueella sijaitsevien kiinteiden merimerkkien kuormitusohjeeksi. Ohje perustuu kansainväliseen jääkuormanormiin ISO/CEN 19906 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. Ohjeessa esitetyt kuormat eivät ole riippuvia rakennemateriaaleista.

Ohjetta voidaan käyttää myös muiden vesialueelle perustettavien kiinteiden merimerkkien kaltaisten rakenteiden kuormitusohjeena.

Johtaja
Väylätekniikkaosasto



Markku Nummelin

Insinööri



Mauno Alaluusua

LISÄTIETOJA
Mauno Alaluusua
Liikennevirasto/Kunnossapito
puh. 020 637 3332

Esipuhe

Merimerkkien suomalainen mitoituskäytäntö on pohjautunut Korzhavinin 1959 julkaisemaan mittaustuloksiin perustuvaan menetelmään. Mitoituskuormia on määritetty myös Rakenteiden kuormitusohjeen RIL 144-2002 mukaisesti. Kansainvälinen jääkuormanormi ISO/CEN 19906 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures on ollut kehitteillä vuodesta 2002 lähtien ja on tullut ratifioitavaksi joulukuussa 2010.

Tämä ohje perustuu ISO/CEN 19906 normiin, mutta se on sovitettu kattamaan suomalainen merirakennekäytäntö.

Ohjeen on laatinut tekniikan tohtori Mauri Määttänen Lujari Oy:stä. Työtä ovat ohjanneet Risto Lång ja Mauno Alaluusua Liikenneviraston väylänpito-osastolta.

Helsingissä toukokuussa 2011

Liikennevirasto
Väylänpito-osasto

Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ	6
1.1	Johdanto.....	6
1.2	ISO/CEN 19906 normin soveltuvuus Suomen merirakenteille	7
1.3	Jääolosuhteet	8
2	RAKENTEIDEN KUORMAT.....	9
2.1	Tuulikuorma	9
2.2	Jääkuorma pystysuora rakennetta vasten	9
2.3	Dynaaminen jääkuorma	9
2.4	Ahtojääkuorma.....	11
2.5	Kartion jääkuorma.....	11
	2.5.1 Kartion jäävoimat F_H ja F_V ; plastinen kantokuormateoria	12
	2.5.2 Kartion jäävoima; elastinen jään taivutusmurto	13
LIITTEET		
Liite 1	ISO/CEN 19906 normin sovitus suomalaiseen nykyiseen mitoituskäytäntöön	

1 Yleistä

1.1 Johdanto

Kansainvälinen jääkuormanormi *ISO/CEN 19906 Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures* on ollut kehitteillä vuodesta 2002 lähtien ja on tullut ratifioitavaksi joulukuussa 2010. Tavoite on, että kaikki arktisten ja kylmien alueiden avomerirakenteet mitoitetaan, rakennetaan, ylläpidetään ja puretaan tämän normin periaatteiden mukaan. Jäävaikutusten mitoitus on osa samaan merirakenteiden normiperheeseen kuuluvista normeista:

- | | |
|-------------------------------|---------------|
| – Yleisvaatimukset | ISO/CEN 19900 |
| – Ympäristöolosuhteet | ISO/CEN 19901 |
| – Teräsrakenteet | ISO/CEN 19902 |
| – Betonirakenteet | ISO/CEN 19903 |
| – Kelluvat rakenteet | ISO/CEN 19904 |
| – Siirrettävät rakenteet | ISO/CEN 19905 |
| – Arktiset offshore rakenteet | ISO/CEN 19901 |

Vaihtoehtoisesti ISO/CEN 19906 sijaan voi jäävaikutusten määrittämiseen käyttää mitoitusmenetelmiä, mitkä perustuvat teoreettisiin malleihin tai analyyseihin ja käytännössä koeteltuihin menetelmiin edellyttäen, että saavutetaan vähintään ISO/CEN 19906 luvun 7 mukainen varmuustaso ja toiminnan luotettavuus.

Uusien konstruktioiden jäävaikutusten suunnittelu, samoin kuin mallikokeiden tai teoreettisten mallien kalibrointi on aina, kun on mahdollista, varmistettava täyden mittakaavan mittaustuloksiin perustuen.

ISO/CEN 19906 noudattaa luotettavuuteen ja rajatilamitoitukseen perustuvaa tilastollista lähestymistapaa. Merenkulun turvalaitteet ovat arktisia kaasua- ja öljyteollisuusrakenteita huomattavasti yksinkertaisempia, halvempia ja tavallisesti miehittämättömiä rakenteita kuuluen altistusluokkaan L3, jossa turvallisuustavoite on $1,0 \times 10^{-3}$. Merenkulun turvalaitteille täysi tilastollinen jääkuormamitoitus johtaa helposti liiallisiin kustannuksiin. ISO/CEN 19906 mahdollistaa myös yksinkertaisemman deterministisen mitoitustavan, joka esitetään tässä ohjeessa.

Merimerkeissä liikkuvan jään aiheuttamat kuormat ovat hallitsevia. Oma paino ja merivirrat Suomen vesialueilla ovat merkityksettömiä jääkuorman rinnalla. Tuulikuorma esiintyy, mutta se on useimmiten vaikutukseltaan vähäinen perusrakenteissa. Talviaikana aaltokuorma ei vaikuta yhdessä jääkuorman kanssa. Deterministisessä mitoituksessa käytetään nimellistä¹ äärikuormaa (ELIE/ULS)² yhdessä samanaikaisen muun kuorman painotetulla ääriarvolla.

ISO/CEN 19906 normissa jääkuormaa laskettaessa käytetään yhdistelmänä äärimmäistä jään paksuutta yhdessä nimellisen jäälajuuden kanssa. Mitoituksen tavoitteena oleva 10^{-3} luotettavuustaso, vaurio kerran tuhannessa vuodessa, on ehkä liiankin tiukka yksinkertaisille merimerkeille.

1.2 ISO/CEN 19906 normin soveltuvuus Suomen merirakenteille

Suomen oloissa jääkuormamitoitus rajoittuu yksivuotiseen matalan suolapitoisuuden jään. Suomessa esiintyvät rakennemitoitukselle tärkeät jääolosuhteet ovat kiintojää, liikkuva jää ja ahtojää. Rakennesovellutukset ovat merimerkkejä tai vastaavia rakenteita, joissa ei ole pysyvää miehitystä eikä niiden vaurioituminen aiheuta vakavia ympäristöhaittoja. ISO:n periaatteiden mukaisesti mitoituksessa vaatimukset ovat tällöin lievempiä.

Jääkuormia aiheuttava jään liike syntyy merivirtojen ja tuulten vaikutuksesta ja jään lämpölaajenemisesta. Kaksi ensin mainittua aikaansaavat useimmiten niin suuren jään liikenopeuden, että jään murtumiskuormat voivat kehittyä maksimiinsa (ISO: Limit Strength, jää murtuminen rajoittaa jääkuormaa). Talvella laajojen merialueiden ollessa jäässä merivirtojen vaikutus on vähäistä muualla kuin saariston salmi- paikoissa, joissa taas jää on ohutta. Lämpölaajenemisnopeus on aina niin hidasta että jää viruu ja rajoittaa voimakkaasti jääkuormien suuruutta.

Rakenteen muodosta riippuu millainen jään murtotapa rakennetta vasten syntyy.

- Pystysuoraa rakennetta vasten jää murskautuu (crushing). Luvussa A.8.2.4.3 ISO/CEN 19906 esitetty menetelmä rajoittuu alueelle, mikä ei kata suomalaista merirakennekäytäntöä. Korjauksena esitetään tässä ISO:n pohjalta modifioitu menetelmä.
- Dynaaminen jääkuormamitoitus pystyrakennetta vasten ISO:ssa noudattaa suomessa kehitettyä käytäntöä. Luku A.8.2.6 ISO/CEN 19906.
- Kartiomaista rakennetta vasten jää murtuu taivutuksella. ISO:n esittämät menetelmät soveltuvat sellaisenaan. Luku A.8.2.4.4 ISO/CEN 19906.

¹ Nimellinen tarkoittaa konservatiivista suuretta, jota ei ole määritetty tilastollisesti vaan esimerkiksi käytännön kokemuksesta. (Esim: MTL 100 v. jääpaksuus ja käytetty puristuslujuus 2,25 MPa (molempien ei tarvitse olla ääriarvo samanaikaisesti, s. ISO/CEN 19906 s. 147)

² ELIE (Extreme-level ice event) ULS-mitoitus pääasiassa rakenteen lineaaris-elastisen käyttäytymisen mukaan. Teräsrakenteilla paikallista myötämistä sallitaan. Kuormitusten esiintymisen vuosittaisen todennäköisyyden on oltava $<10^{-2}$

ULS (Ultimate limit state) vaatimus edellyttää, että rakenteisiin ei synny mitään merkittävää vauriota hyväksyttävän alhaisella todennäköisyydellä rakenteen suunnittelueliniän aikana ELIE-tason mukaisilla jääkuormilla

- Mitoitus paikallisen jääpaineen vaikutuksille, esimerkiksi tarve vesirajan levykentän jäykistäminen. Luku A.8.2.5.2 ISO/CEN 19906.
- Ahtojääkuorma on ISO-normissa esitetty vain pystysuoralle tasaleveälle rakenteelle. Luku A.8.2.4.5 ISO/CEN 19906.
- Jääkentän lämpölaajenemisesta johtuvaa kuormaa ei ISO:ssa ole esitetty.
- Jään kiinnitarttumis-/irtoamiskuormaa ei ISO:ssa ole esitetty.

1.3 Jääolosuhteet

Kiinteän merimerkin jääkuormamitoituksen lähtökohtana on perusteellinen sijaintipaikan jääolosuhteiden tuntemus. Tärkeimmät olosuhdetiedot ovat

- kiintojään paksuus
- liikkuvan jään paksuus
- kerrostuneen jään esiintyminen
- ahtojäiden esiintyminen
- MWL minimi ja maksimi jäiden yhteydessä.

Koko Suomen merialueelta on käytettävissä Merentutkimuslaitoksen laajat tilastot kiintojään ja liikkuvan jään paksuuksista:

Palosuo E., Leppäranta M. ja Seinä A.: Formation, thickness and stability of fast ice along the Finnish coast. Research Report No 36. Winter Navigation Research Board, 1982.

Seinä, A., 2010: Ice service. Proc. ICT services for environmental safety and security in the Baltic Sea. Helsinki, 12 April 2010.

Kerrostunutta jäätä syntyy pääasiassa ohuen jään liikkussa, mutta ahtojäiden yhteydessä myös paksulla jäällä. Ahtojäiden esiintyminen on esitetty Ilmatieteen laitoksen jääkartoissa, mutta pitkäaikaisytteenvetoja ei ole tehty. Palosuo et.al julkaisua ja Ilmatieteen laitoksen jääkarttoja vertaamalla voi päätellä myös merkittävän liikkuvan ahtojään esiintymisen rajat: useasti vain paksummalla kuin 30–40 cm paksun liikkuvan jäävyöhykkeen ulkopuolella.

Jos liikkuvan jään paksuudesta ei ole tietoa, mitoituksessa tulee käyttää suurinta kiintojään paksuutta. Jos ahtojään kolin syvyydestä ei ole tietoa, on käytettävä paikallista vesisyvyyttä. Jääolosuhteista kannattaa tarvittaessa hankkia lisätietoa haastattelemalla paikallisia merellä liikkujia, kuten esimerkiksi luotsikuttereiden kuljettajia ja kalastajia.

2 Rakenteiden kuormat

2.1 Tuulikuorma

Jääkuorman kanssa samanaikaisesti vaikuttavan tuulikuorman suuruuden laskenta on esitetty osassa ISO/CEN 19901-1. Huomioiden tuulikuormien pienuus jääkuormiin verraten merimerkeissä Suomen rannikolla voidaan tuulikuorma laskea myös yhteiseurooppalaisten eurokoodistandardien mukaisesti, SFS-EN 1991-1-4. ISO/CEN 19906 ei anna osavarmuuskerrointa altistusluokassa L3. Tuulikuorma on stokastisesti riippuvainen liikkuvan jään aiheuttamien kuormien kanssa. Yhdistettäessä ELIE-jääkuormaan on tuulen rinnakkainen osavaikutus silloin 0,9 kertainen (ISO/CEN 19906 Table 7.3).

2.2 Jääkuorma pystysuoraa rakennetta vasten

Liikkuvan jään murskautuessa pystyrakennetta vasten jäävoima lasketaan ISO/CEN 19906 kaavoista pienelle sivusuhteelle w/h modifioituna:

$$F_G = p_G h w \quad (1)$$

$$p_G = C_F \left[\left(\frac{h}{h^*} \right)^{-0,5 + \frac{h}{5h^*}} \left(\frac{w}{h} \right)^{-0,16} + e^{\frac{-w}{3h}} \sqrt{1 + 5 \frac{h}{w}} \right] \quad (2)$$

jossa

p_G	keskimääräinen kokonaispaine, MPa;
w	rakenteen jääpaineelle altis projektioleveys, m;
h	liikkuvan jään paksuus, m;
h^*	referenssipaksuus = 1,0 m;
m	koetuloksiin perustuva vakio = -0,16;
n	koetuloksiin perustuva vakio = -0,50 + $h/5$ kun $h < 1,0$ m = -0,30 kun $h \geq 1,0$ m
C_F	jään referenssilujuus, MPa. =1.8 MPa pyöreä paalu =2.0 MPa suora seinämä

2.3 Dynaaminen jääkuorma

ISO/CEN 19906 dynaaminen jääkuormamitoitus perustuu pitkälti suomalaiseen vakiintuneeseen käytäntöön. Rakenteelle on tehtävä dynaaminen analyysi, jonka perusteella lasketaan (kaava 3), mitkä ominaismuodot ovat herkkiä kokemaan jään aiheuttamia värähtelyjä. Niille ominaismuodoille, jotka ovat alttiita värähtelyille, asetetaan ko. ominaismuodon taajuudella toistuva sahanterän muotoinen dynaaminen kuormitus, jonka dynaaminen vaste lasketaan. Herätekuorman amplitudi säädetään sellaiseksi, että rakenteen liikenoisuus jääkuorman vaikutuskohdassa ei ylitä ko. kohdassa esiintyvää suurinta liikkuvan jään nopeutta. Käytännössä lasketaan oletetulla kuvan 1 mukaisella dynaamisen kuorman amplitudilla ΔF rakenteen dynaaminen vaste, mikä skaalataan em. ehdon toteutumiseksi. Rakenne on

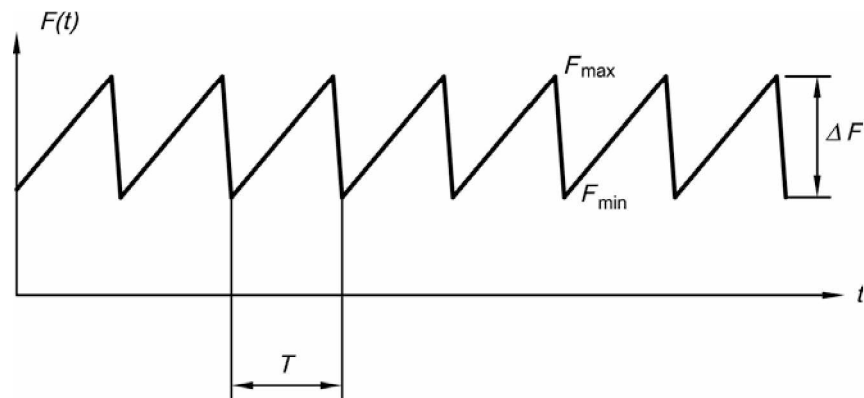
mitoitettava kestäämään näin saadun kuormituksen aiheuttama väsyttävä kuormitus. Tarkistus on tehtävä kaikille värähtelyalttiille ominaismuodoille.

Ominaismuotojen tarvitsema vaimennus, jotta jään aiheuttamia värähtelyjä ei esiinny

$$\xi_n \geq \frac{\phi_{nc}^2}{4\pi f_n M_n} \cdot h \cdot \theta \quad (3)$$

jossa

- ξ_n ominaismuodon n suhteellisen vaimennuksen vaadittu taso
- ϕ_{nc} ominaismuodon n amplitudi jään vaikutuskohdassa
- M_n ominaismuodon n massa, kg
- f_n ominaismuodon n taajuus, (Hz)
- h jään paksuus, m
- θ kokeellinen vakio, $40 \cdot 10^6$ kg/(m·s)



Kuva 1. Resonoiva dynaaminen jääkuorma

Periodi $T = 1/f_n$ ja dynaamisen voiman amplitudi ΔF . Jäävoiman ylä- ja alarajan F_{max} tai F_{min} arvoilla ei ole merkitystä täysin kehittyneelle dynaamiselle vasteelle. Siten yksinkertainen valinta on esimerkiksi $F_{min} = 0$. Amplitudi ΔF skaalataan sen suuruiseksi, että rakenteen värähtelyn liikenoisuus jääkuorman vaikutuskohdassa ei ylitä jään luonnossa tapahtuvaa ajautumisnopeutta. Mitoitus väsyttävälle kuormalle tehdään tätä vastaavalla dynaamisen kuorman amplitudilla ΔF . Sama menettely toistetaan myös muille yhtälön 3 osoittamille ominaismuodoille, joille $f_n < 10$ Hz, kullekin omalla ΔF arvolla.

Lisäksi on suoritettava tarkistus yksittäisen jäävoiman äkinäisen laukeamisen aiheuttamalle dynaamiselle relaksaatiokuormitukselle. Jääkuormana käytetään tällöin suurinta odotettavissa olevaa kiintojäävoimaa, kaava 1. Jos ominaismuoto on lähellä kaavan 3 rajaa, kannattaa mitoitustarkistus tehdä kolmelle perättäiselle jäävoiman laukeamiselle kyseisen ominaismuodon jakson aikaväleihin, eli kolme ensimmäistä kuvan 1 kuormajaksoa. Väsymismitoitus yksittäisjäävoimien laukeamiskuormituksille tehdään low-cycle fatigue periaatteella (myötölujuuden suhteen). Tätä vaatimusta ei ole ISO/CEN 19906 normissa.

2.4 Ahtojääkuorma

Ahtojääkuorma F_R koostuu ahtojään yhteydessä tavallisesti olevan kiintojääkerroksen F_c (konsolidoitunut kerros) ja ahtojään (köliosaa) F_k voimien summasta. Kiintojäävoima lasketaan kuten tavanomainen kiintojäävoima pystysuoraa (kaava 1) tai kartiomaista rakennetta vasten.

ISO/CEN 19906 on omaksunut venäläisten (Dolgoplov et.al.) kehittämän mallin ahtojään köliosaa voimalle F_k :

$$F_R = F_c + F_k \quad (4)$$

$$F_k = \mu_\phi h_k w \left(\frac{h_k \mu_\phi \gamma_e}{2} + 2c \right) \left(1 + \frac{h_k}{6w} \right) \quad (5)$$

jossa

$$\mu_\phi = \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \text{ahtojään kölilohkareiden}$$

passiivipaine,

$$\phi = \text{jäämassan sisäinen kitkakulma} \approx 20^\circ \dots 40^\circ$$

c = keskimääräinen köliosaa jäämassan koheesio $\approx 5 \dots 7 \text{ kPa}$

w = rakenteen leveys

$$\gamma_e = (1 - e)(\rho_w - \rho_i) g = \text{tehollinen noste}$$

e = ahtojäämassan huokoisuus $\approx 0,25 \dots 0,35$

ρ_w = veden tiheys

ρ_i = jään tiheys

Täyden mittakaavan mittaustulosten (Kemi-1 kartio, Confederation silta) mukaan po. kaavojen ahtojääkuormat ovat todellista suurempia. Ahtojään kölin koheesio riippuu siitä, kuinka kylmissä olosuhteissa ja kuinka kauan sitten valli on muodostunut. Usein koheesio on selvästi pienempi, erityisesti kölin syvimmissä kerroksissa. Myös kiintojää murtuu ahtojäävallin mukana pystyrakennetta vasten helpommin kuin ilman ahtojäävallin mukana oloa. Kaavan 5 mukaiset ahtojäävoimat kapeilla merimerkeillä ovat jopa kertaluokkaa pienempiä kuin mitä toteutetuissa rakenteissa on käytetty.

2.5 Kartion jääkuorma

ISO/CEN 19906 normissa esitetään, mitä fysikaalisia ilmiöitä esiintyy jään murtuessa taivutuksella kartiota vasten: taivutusmurto, jäälohkareiden nousu ylöspäin kartion pintaa pitkin, mahdollisen jääkasauman muodostus sekä murretun jään syrjäytyminen kartion yli ja ohi. Käytäntöön esitetyistä useista malleista normi esittelee Ralston- tai Croasdale-menetelmät. Ralstonin menetelmä ennustaa 20–30 % liian suuria jääkuorma-arvoja Kemi-1 mittaustuloksiin verraten. Jääkuormaennusteet Croasdalen menetelmällä ovat hiukan pienempiä kuin Ralstonin menetelmällä, mutta kuitenkin täyden mittakaavan koetuloksiin verraten turvallisella puolella. Croasdalen menetelmä on herkkä ahtojääkasan kaltevuuden arvoille.

Ralston ja Croasdale menetelmien jäävoimien laskentakaavat on esitetty kohdissa 2.5.1 ja 2.5.2.

2.5.1 Kartion jäävoimat F_H ja F_V ; plastinen kantokuormateoria

H_B	Jään taivutusmurtoon tarvittava vaakavoimakomponentti
V_B	Jään taivutusmurtoon tarvittava pystysuora voimakomponentti
H_R	Murretun jään ylöspäin liukumiseen tarvittava vaakavoimakomponentti
V_R	Murretun jään ylöspäin liukumiseen tarvittava pystyvoimakomponentti
σ_f	Jään taivutuslujuus
h	Jään paksuus
h_r	Ylöspäin liukuvan jääkerroksen paksuus
D	Kartion vesirajan halkaisija
ρ_i	Jään tiheys
ρ_w	Veden tiheys
g	Maan vetovoiman kiihtyvyys
ν	Poisson-luku
μ	jää/kartio kitkakerroin

$$f = \sin \alpha + \mu E_1 \cos \alpha$$

$$g_r = \frac{\sin \alpha + \frac{\alpha}{\cos \alpha}}{\frac{\pi}{2} \sin^2 \alpha + 2 \mu \alpha \cos \alpha}$$

$$h_v = \frac{f \cos \alpha - \mu E_2}{\frac{\pi}{4} \sin^2 \alpha + \mu \alpha \cos \alpha}$$

$$W = \rho_i g h_r \frac{D^2 - D_T^2}{4 \cos \alpha} \quad G = \frac{\rho_i g D^2}{4 \sigma_f h}$$

$$E_1 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{-1/2} d\eta \quad E_2 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{1/2} d\eta$$

$$H_R = W \frac{\tan \alpha + \mu E_2 - \mu f g_r \cos \alpha}{1 - \mu g_r}$$

$$V_R = W \cos \alpha \left(\frac{\pi}{2} \cos \alpha - \mu \alpha - f h_v \right) + H_R h_v$$

$$H_B = \frac{\sigma_f h^2}{3} \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g_r} \left(\frac{1 + Y x \ln x}{x - 1} + G (x - 1)(x + 2) \right) \quad x = 1 + \left(3G + \frac{Y}{2} \right)^{-1/2}$$

$$V_B = H_B h_v$$

$Y = 2.711$ Tresca myötöehto tai $Y = 3.422$ Johansen myötöehto

$$F_H = H_B + H_R \quad F_V = V_B + V_R$$

2.5.2 Kartion jäävoima; elastinen jään taivutusmurto

Tarvittavat voimakomponentit prosessin eri vaiheissa (samanaikaisesti)

H_B	Jään taivutusmurto
H_P	Kiintojäänppuskeminen jääkasan
H_R	Murrettujen lohcareiden työntö ylös kartion pintaa pitkin jääkasan alla
H_L	Jään päällä olevan murskekasan nostaminen
H_T	Jäälohkareen kääntö pystyyn kartion yläreunan kohdalla
e	jääkasan huokoisuus
ρ_i	jään tiheys,
ρ_w	veden tiheys,
μ	jää/kartio kitka
μ_i	jää/jää kitka
g	Maan vetovoiman kiihtyvyys

$$F_H = \frac{H_B + H_P + H_R + H_L + H_T}{1 - \frac{H_B}{\sigma_f w_c h}}$$

$$w_c = D + \frac{\pi^2}{4} L_c$$

$$H_B = 0.68 \xi \sigma_f \left(\frac{\rho_w g h^5}{E} \right)^{0.25} \cdot \left(D + \frac{\pi^2}{4} L_c \right)$$

$$L_c = \left(\frac{E h^3}{12 \rho_w g (1 - \nu^2)} \right)^{0.25}$$

$$H_P = D h_r^2 \mu_i \rho_i g (1 - e) (1 - \tan \theta / \tan \alpha)^2 \cdot \frac{1}{2 \tan \theta}$$

$$H_R = DP \frac{1}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}, \text{ jossa}$$

$$P = 0.5 \mu_i (\mu_i + \mu) \rho_i g (1 - e) h_r^2 \sin \alpha \cdot \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) +$$

$$+ 0.5 (\mu_i + \mu) \rho_i g (1 - e) h_r^2 \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + h_r h \rho_i g \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

$$H_L = 0.5 D h_r^2 \rho_i g (1-e) \xi \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) +$$
$$+ 0.5 D h_r^2 \rho_i g (1-e) \xi \tan \phi \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 + \xi c D h_r \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)$$
$$H_T = 1.5 D h^2 \rho_i g \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}$$

ISO 19906 normin sovitus suomalaiseen nykyiseen mitoituskäytäntöön

1 Jääkuorma pystyrakennetta vasten

Liikkuvan jään murskautuessa pystyrakennetta vasten jäävoima lasketaan ISO/CEN 19906 jääkuormanormin kaavoilla:

$$F_G = p_G h w \quad (1)$$

$$p_G = C_R \left(\frac{h}{h^*} \right)^n \left(\frac{w}{h} \right)^m \quad (2)$$

jossa

- p_G keskimääräinen kokonaispaine, MPa;
 w rakenteen jääpaineelle altis projektiöleveys, m;
 h liikkuvan jään paksuus, m;
 h^* referenssipaksuus = 1,0 m;
 m koetuloksiin perustuva vakio (= -0,16);
 n koetuloksiin perustuva vakio
= -0,50 + $h/5$ kun $h < 1,0$ m
= -0,30 kun $h \geq 1,0$ m
 C_R jään referenssilujuus, MPa.
=1.8 MPa Itämerellä

ISO/CEN 19906 jään murskautumisvoiman laskenta perustuu eri puolilta maailmaa – erityisesti arktisen alueen paksuista jäistä - kerättyihin täyden mittakaavan mittaus- tuloksiin jään paksuutta tavallisesti huomattavasti leveämmistä rakenteista sekä subarktiselta alueelta, mm. Norströmsgrundin majakasta LOLEIF- ja STRICE-EU pro- jekteissa. Kokeellinen kaava 2 sisältää jään tehollista murskautumislujuutta pienen- tävän kokotekijän ja kosketusalan leveys/paksuussuhteen – sivusuhteen – vaikutuk- set. Käyttörajoitukseksi on asetettu sivusuhte $w/h > 2$.

Suomen merialueilla liikkuva jää on paksuudeltaan alle 1,0 m. Kerrostunut liikkuva jää voi olla paksumpaakin, mutta sen lujuus on alhaisempaa. Paksumpaa kiintojäättä esiintyy vain rannikon kiintojävyöhykkeellä, jossa jään liike on niin hidasta, että suu- rimpia jäävoimia antavaa jään haurasta murskautumista ei tapahdu (viruminen). Suomalaiset teräsmajakat ja reunamerkit ovat leveydeltään lähellä samaa mittaa kuin jään paksuus, eli sivusuhte on lähellä arvoa 1. Tällöin jään murtuminen tapahtuu muodonmuutoksia rajoittavassa 3-D-geometriassa, mikä kasvattaa jään murskautu- mislujuutta kolmidimensionaalisen jännitystilän takia. Tämä jo yli 50 vuotta vanha tietämys ei kuitenkaan näy riittävästi ISO-normin suurella sivusuhteella w/h johde- tussa kaavassa. Sivusuhteen pienetessä näkyvä tehollisen jääpaineen kasvu ISO- käyrissä kuvassa 1 johtuu pääosin kokotekijästä. Lähtökohtana oleva 7,2 m leveän Norströmsgrundin data on mitattu olosuhteissa, joissa $w/h > 10$, kun taas teräsmaja- koiden ja reunamerkkien osalta pitää päästä tasolle $w/h \approx 1.0$. Norströmsgrund maja- kan pinnasta on mitattu myös kapeammilla (≈ 1 m) paneleilla paikallista jään painetta,

mutta geometrinen tilanne ei ole sama kuin vastaavanleveyisellä pyöreällä paalulla. Siten ISO kaavan 2 käyttörajoituksen alaraja on kyseenalainen.

ISO/CEN 19906 esittämät mitoitusmenetelmät kartiomaisille rakenteille ja ahtojääkuormille soveltuvat sellaisinaan myös Itämeren olosuhteisiin. Mitoitus dynaamisille jääkuormille pohjautuu taas melko suoraan suomalaiseen nykykäytäntöön.

1.1 ISO pystyrakenteen jääkuormalaskennan laajennus alueelle $w/h < 10$

Suomalainen mitoituskäytäntö pohjautuu Korzhavinin 1959 julkaisemaan mittaustuloksiin perustuvaan menetelmään, jonka mukaan jään tehollinen murskautumispaine riippuu sivusuhtekijästä w/h riippuvasta kertoimesta k_3 :

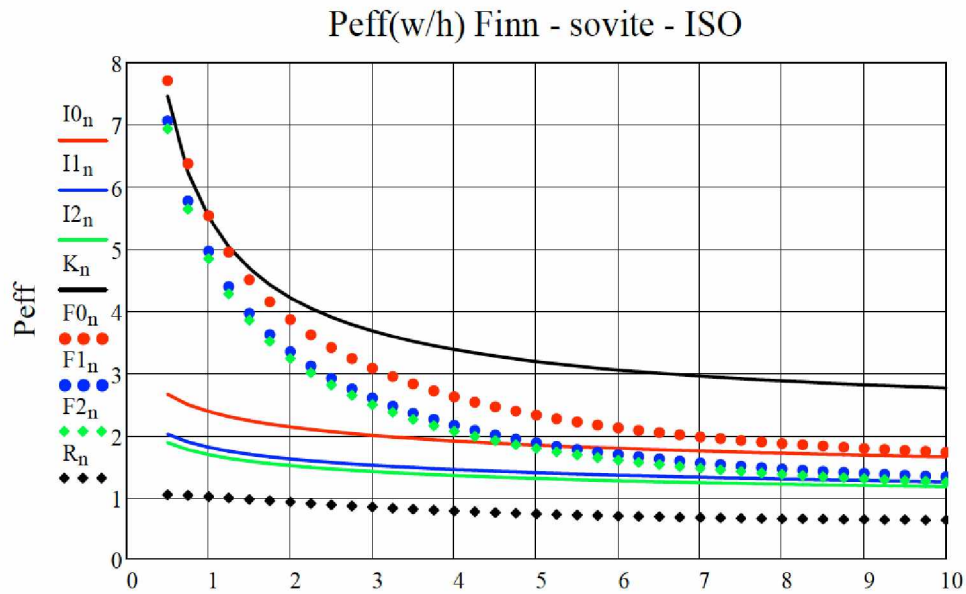
$$k_3 = \sqrt{1 + \frac{5h}{w}} \quad (3)$$

tai eurokoodistandardin kuormitusohjeissa esitettyä miltei saman tuloksen antavasta kertoimesta:

$$k_3 = 1 + 1.5 \frac{h}{w} \quad (4)$$

Esimerkiksi suomalaisilla merimerkeillä usein esiintyvä $w/h = 1$ kasvattaa 2,45 tai 2,5-kertaisesti jään tehollista puristuslujuutta. Sivusuhteen alarajalla $w/h=2$ sivusuhtekijä nostaa tehollisen jääpaineen vastaavasti 1,87 tai 1,75 kertaiseksi. Vaikutus Norströmsgrundin mittaustulosten sivusuhteen alueella $w/h \approx 10$ on vain 1,22 tai 1,15.

Kuvaan 1 on piirretty kolmelle eri jään paksuudelle 0,5, 1,0 ja 2,0 m ISO-menetelmän mukainen tehollinen jääpaine (kolme yhtenäistä alinta käyrää) sivusuhteen w/h funktiona sekä 35-vuotisen suomalaisen mitoituskäytännön mukainen kaavan 3 mukainen tehollinen jääpaine (ylin musta käyrä). Jään puristuslujuuden referenssiarvona C_R on käytetty ISO:n subarktisella alueella 1,8 MPa ja suomalaisessa käytännössä pyöreän paalun poikkileikkaukselle 2,25 MPa (ylin käyrä). Havaitaan, että ISO mitoitus johtaisi alle puoleen Suomen käytännön mukaisista jäävoimista, esimerkiksi hyvin yleisellä sivusuhteen 1 arvolla ja 1 m jääpaksuudella vain 32 % tasolle!



Kuva 1. Jään tehollinen murskautumispaine sivusuhteen w/h -funktiona eri jään paksuuksille: Korzhavin, $h=0.5$ m, $h=1.0$ m, $h=2$ m, vvv - ISO(k_3)/Korzsh suhde $h=0.5$ m.

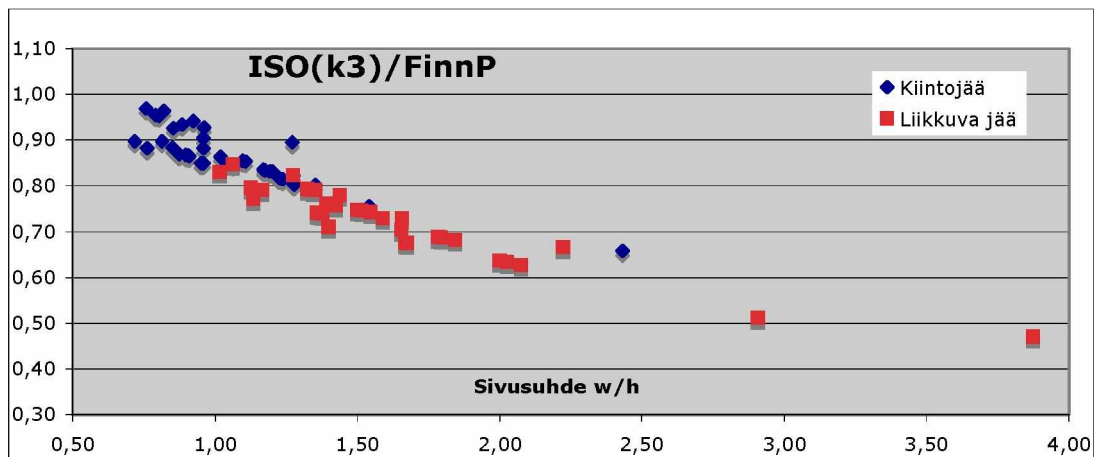
Tavoitteena on aikaansaada jatkuvuus ja yhteensopivuus ISO:n ja suomalaisen käytännön kesken siten, että pienillä sivusuhteen arvoilla (≈ 1) ollaan lähellä suomalaista käytännössä turvalliseksi todettua mitoitusta. Sivusuhteen kasvaessa lähestytään ISO:n menetelmää, jossa ISO-käyrä pohjautuu Norströmsgrundin mittaustuloksiin. Kuvaan 1 on esitetty tällainen sovitus, jossa ISO-menetelmään lisätään eksponentiaalisesti sivusuhteen kasvaessa pienenevä Korzhavin-sivusuhtetekijä k_3 . Pisteiviivoilla esitetyt käyrät eri jään paksuuksilla osoittavat sovituksen toimivuuden. Alin pisteikäyrä esittää ehdotetun sovituksen ja suomalaisen mitoituskäytännön suhdetta 0.5 m jääpaksuudella.

Sivusuhtetekijän vaikutuksen selvittämiseksi kerättiin kokemusperäistä tietoa Suomen väylille 1970-luvulta lähtien rakennetuista merimerkeistä ja niiden jäävoimamitoituksesta, Liite A. 70-luvun alussa rakennetuista hoikista merimerkeistä moni katkesi jääkuormien ylitettyä rakenteen kestävyuden. Sivusuhtetekijän vaikutus jään tehollista lujuutta kasvattavana tekijänä ylitti tuolloin odotukset siirryttäessä leveistä kasuunimajakoista kapeisiin teräsrustuksiin. Kun sivusuhtetekijä huomioitiin 70-luvun puolivälin jälkeen, yksikään näin suunnitelluista merimerkeistä ei ole enää vaurioitunut liian suurten staattisten jääkuormien takia.

Kuinka paljon 70-luvun puoliväliin jälkeen tehtyjen rakenteiden luotettavuus on yksinomaan sivusuhtetekijästä johtuvaa ei ole täysin varmaa. Historia osoittaa kuitenkin, että mitoituskäytäntö on johtanut ehkä tarpeettoman lujaan staattiseen mitoitukseen. Myös dynaamisten jääkuormien takia osassa 70-luvun alkupuoliskon teräsrakenteisissa merimerkeissä on esiintynyt yläosan väsymisvaurioita.

Rakenneperustuksen äärikestävyyden kannalta kriittinen kuormayhdistelmä sisältää usein kiintojään kanssa ahtojäävoimat samanaikaisesti. Suomalaisessa mitoituskäytännössä jääkuorma on laskettu useimmiten suurimman alueella esiintyneen kiintojääpaksuuden perusteella. Todellisuudessa ahtojääkuorman kanssa tulisi käyttää liikkuvan jään maksimipaksuuteen perustuvaa kuormaa. Kiintojään vakiintuessa alkutalvesta liikkuvaa paksua ahtojäää ei voi enää esiintyä. Liikkuvan jään paksuusvyöhyk-

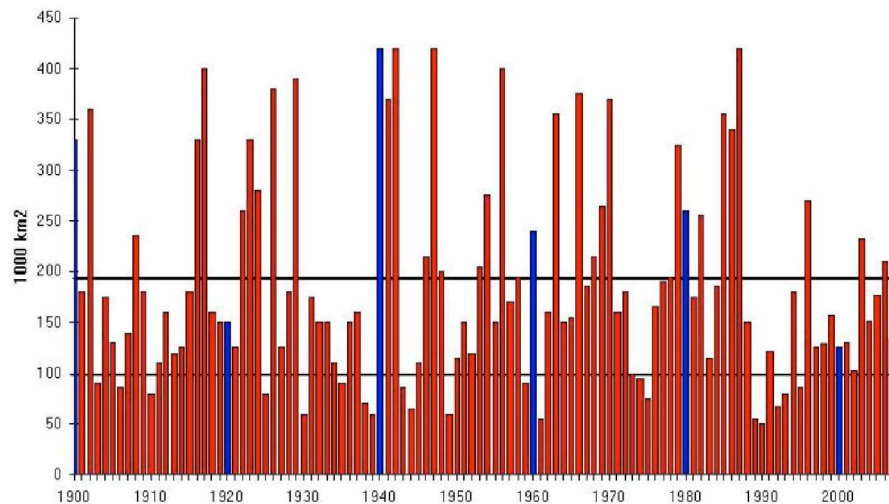
keellä $h_L < 40$ cm 2.1 km rannasta sijaitsevan Kemi-Ajoksen offshore tuulivoimalaperustuksen yhden talven mittaukset ovat osoittaneet, että paksu kiintojää ei ole liikunut muuta kuin virumisnopeudella johtaen pieniin jääkuormiin. On mahdollista, että moni kiintojävyöhykkeellä sijaitseva merimerkki on ylimitoitettu, mutta vastakkaisia esimerkkejä myös löytyy, kuten Perämerellä AR1 (6.4 km rannasta), R3 ja L64 Liikkuvan jään paksuusvyöhykkeellä $h_L < 50$ cm vauriotapaukset johtuivat kiintojään $h_k > 90$ cm liikahduksista, joita ei olisi tilastojen mukaan pitänyt esiintyä.



Kuva 2. Modifioidun $ISO(k_3)$:n ja Suomen mitoituskäytännön mitoituskuormien suhde ilman ahtojääkuormaa sivusuhteen w/h funktiona

Liitteen A merimerkeistä laskettu Kuva 2 osoittaa, että kun ISO menetelmää modifioidaan Korzhavin kertoimella k_3 saadaan hyvä vastaavuus suomalaiseen nykykäytännöön. Vastaavuuden keskiarvomitoitus jäävoiman suhteen on 0,87 kiintojääkuormien tapauksessa ja 0,73 liikkuvan ohuemman jään tapauksessa. Sovitusten keskihajonnat ovat myös pienet, 0,06 ja 0,07 (johtuvat ISO-yhtälön tehollisen paineen riippuvuudesta sivusuhteen lisäksi myös jään paksuudesta). Pelkät jään murskaamiseen tarvittavat voimat pienenevät noin 13 % tähänastisesta käytännöstä sivusuhteella ≈ 1 . Toisaalta ahtojäävoimia ei ole tässä mukana. Ahtojäävoimat ovat tähänastisessa mitoituksessa olleet samaa suuruusluokkaa tai suurempia kuin liikkuvan jään kuormat, Liite A. Koska nykymitoitus ei ole johtanut yhteenkään rakennevaurioon, on perusteltua pienentää hiukan mitoituskuormia ylimitoituksen välttämiseksi. (yhteensä noin 100 rakennetta ≈ 20 vuoden käyttöhistorian aikana vastaa alle 10^{-3} todennäköisyyttä. Jäätalvien ankaruus vuoden 1975 jälkeen ei poikkea oleellisesti viime vuosisadan tilastossa, Kuva 3. Kuvan 2 mukaan modifioitu ISO-menetelmä pienentää kiintojääkuormaa noin 13 %

Esitetty menettely noudattaa ISO/CEN 19906 normin mukaista determinististä ELIE mitoitusta. Merentutkimuslaitoksen mukainen lähes 100 vuoden maksimijään paksuustilasto edustaa 100 vuoden äärimmäistä jäänpaksuutta. Korzhavin kertoimella korotettu 2.25 MPa jään murskautumislujuus pyöreälle paalulle edustaa puolestaan nimellistä jään murskautumislujuutta.



Kuva 3. Jäätalvien ankaruus vuosina 1900–2008: Itämeren jääpeite

Tältä pohjalta voidaan uutena käytäntönä siirtyä kaavasta 2 sivusuhdetekijällä modifioituun ISO(k_3) pystyrakenteen jäävoiman mitoituskaavaan:

$$p_G = C_F \left[\left(\frac{h}{h^*} \right)^{-0,5 + \frac{h}{5h^*}} \left(\frac{w}{h} \right)^{-0,16} + e^{\frac{-w}{3h}} \sqrt{1 + 5 \frac{h}{w}} \right] \quad (5)$$

Murskautumislujuuden referenssiarvo C_F riippuu vesirajan muodosta

$C_F = 1,80$ MPa pyöreä w -halkaisijainen paalu
 $C_F = 2,00$ MPa suora seinämä, leveys w

2 Vauriotapaukset

Jäävoimamitoituksen luotettavuutta voi arvioida myös vaurioituneiden rakenteiden murtokuorma-analyseistä. Näistä harvoista tapauksista on kerätty oleelliset tiedot taulukkoon 1. Mukana on myös kolme ruotsalaista majakkavaurioita. Eniten vaurioita Suomessa tapahtui 70-luvun puolivälissä kun oli siirrytty vesirajassaan kaapeisiin teräksisiin peruspaaluihin, eikä huomioitu mitoituksessa 60-luvun alussa Venäjältä raportoitua merkittävän suurta sivusuhdetekijän k_3 vaikutusta.

Tainion majakka liukui kallion päällä paikoiltaan talvella 1967 (tiettävästi ennen kuin lopullinen kasuunin reunavallitus meren pohjalla oli valmistunut). Arvioitu murtokuorma oli 6 MN, mikä on sama kuin modifioitun ISO-menetelmän kiintojäävoima ja nykyisen menetelmän liikkuvan jään voima. Nykyisin käytetty menetelmä olisi edellyttänyt 8.7 MN mitoitusvoimaa kiintojäälle. Sama liukumiskohtalo koitui kahdelle ruotsalaiselle majakalle. Björnklack ja sen sisarmajakka Borussiagrundet Ruotsissa Piteån edustalla siirtyivät paikoiltaan ensimmäisen talven aikana, jonka jälkeen ne vahvistettiin ankkuripulteilla. Jääpaksuus oli ennakoitua maksimikiintojään paksuutta suurempi. Arvioitu murtokuorma 10.9 MN tuntuu suurelta suhteessa suunnittelutavoitteeseen 3.75 MN.

Nygrån majakka Ruotsissa Luulajan edustalla katkesi vuonna 1969. Jään paksuus oli arvioitu 0,6–0,9 m ja vesirajan halkaisija 2,5 m, jolloin sivusuhte on ollut alueella 4,2–2,8. Mitoitusvoima oli $1,5 \text{ MN/m}^2 \cdot 2,5 \text{ m} = 3,75 \text{ MN}$. Vaurion jälkitarkastuksessa todettiin murtokohdassa valutyön keskeytymisen takia syntynyt katkos, mikä oli johtanut

betoniterästen korroosioon. Riippuen vaurioitilanteen jäävoiman vaikutuskorkeudesta, 1–2 m valukatkoksen yläpuolella, murtokuorma on ollut 4–8 MN. Suomalaisen käytännön mukainen mitoitusvoiman olisi pitänyt olla 7.3–9.7 MN (liikkuvalle ja kiintojälle) ja modifioidulla ISO-menetelmällä 5.3–7.3 MN. Viimemainittu onkin jo arvioitua murtokuormaa 4.0 MN suurempi.

Kemi-1 teräsmajakkan perustuksen murtuminen plastisella lommahduksella tapahtui toukokuun alussa 1974. Peruspaalun leveys vesirajassa oli $w=1,18$ m ja hiukan aiemmin mitattu jääpaksuus $h=0,93$ m. Sivusuhte on ollut 1,30. Jäävoima oli laskettu leveistä kasuunimajakoista perityllä ja vielä lisätyllä periaatteella 2 MN/m, jonka perusteella mitoittava jääkuorma olisi ollut vain 2.4 MN. Toteutusvaiheessa peruspaalu mitoitettiin kuitenkin kestäämään 4.0 MN jäävoima vesirajassa, jolloin materiaali on jo myötörajalta ilman rakenteellista varmuutta. Jälkianalyysin mukaan plastisen lommahduksen aiheuttavan jääkuorma on ollut noin 4.4 MN. Kemi-1 vaurion jälkeinen suomalainen mitoituskäytäntö edellyttää 4.4 MN mitoitusjäävoimaa sekä lisäksi ahtojääkuorman ja rakenteellisen varmuuden. Laskettaessa ISO:n mukaisesti tämä alle sivusuhterajoitusta 2 kapeamman rakenteen jääkuorma saataisiin tulokseksi vajaa 2 MN. Modifioidulla ISO-menetelmällä päädytään arvoon 4,8 MN, mikä on 10 % suurempi kuin arvioitu 93 cm paksun jään murtokuorma. Jos perustuksen mitoituksessa käytetään normaalia 1,5 kertaista varmuuskerrointa olisi rakenne kestänyt. On hyvin mahdollista, että vaurioitilanteessa on ollut yli 1 m paksua kerrostunutta jäätä tai ahtojäävalli samanaikaisesti.

Samalla tavalla kuin Kemi-1 mitoitettu ja vuonna 1973 rakennettu Nukkujan matalan majakka (Kemi-2) kesti kuusi vuotta aina keväeseen 1979 asti, jolloin jääkuormat aiheuttivat pysyvän kallistuman perustukseen. Peruspaalun plastisen lommahduksen aiheuttaneen jään paksuudesta tai ahtojään mukanaolosta ei ole tietoa. Kemi-2 oli mitoitettu kestäämään 25 % suurempi jääkuorma kuin Kemi-1. Todennäköisesti vuoden 1974 jälkeen omaksuttu mitoituskäytäntö olisi ollut riittävä myös tässä tapauksessa.

Reunamerkit Ristinmatala AR1 ja Pohjanletto R3 sekä linjataulu L64 olivat mitoitettut samalla periaatteella kuin Kemi-1 teräsmajakka ja myös kaikki nämä saivat kallistuman paalun vaipan plastisen lommahduksen tapahtuessa lähellä merenpohjaa. Jos mitoitus olisi tehty nykykäytäntöä ja kiintojääpaksuutta soveltaen, nämäkin rakenteet olisivat kestäneet.

Vauriotapausten vertaaminen mitoitusjääkuormiin ei ole suoraan vertailukelpoinen, koska varmuuskertoimet ovat erilaisia ja mahdollinen ahtojään vaikutus vaurioon jää pois. Taulukossa 1 on esitetty tähänastisen suomalaisen mitoituskäytännön liikkuvalle jääpaksuudelle laskettu jääkuorma Finn. Se on useimmiten pienempi kuin murtokuorma. Murtokuormaan tulee vielä varmuuskertoimen mukainen lisä, jolla murtuminen vasta saa tapahtua, mutta vaurion aiheuttanut kuorma pitää jo sisällään tämän varmuuden.

Taulukko 1. Vauriotapausten yhteenveto

Vaurioituneet	Vaurio vuosi	Vesisyv.	Kiintojäät	Liikk.jää	VaurioJää	w MWL	F _{iso} (K3)/F _{muurto}	F _{iso} (K3)/F _{muurto}	F _{iso} (K3)/F _{muurto}	Murtotapa w/h			
Tainio	1966	9,0	0,80	0,45	0,80	3,50	6,00	4,54	1,00	0,52	1,00	4,4	Liuku(1,7MN/m)
Kemi-1	1974	12,0	1,00	0,80	0,93	1,18	4,40	4,45	1,22	0,89	1,10	1,3	Lommahdus
Nukkujan matala	1979	11,0	1,00	0,80	0,90	1,18	4,40	4,45	1,22	0,89	1,05	1,3	Lommahdus
AR1 Ristilänsi	1974	11,5	1,10	0,45	0,90	1,12	4,40	1,97	1,36	0,40	1,02	1,2	Lommahdus
RM3	1974	8,5	1,10	0,45	0,95	0,90	3,70	1,70	1,46	0,43	1,19	0,9	Lommahdus
L64	1974	5,2	1,10	0,45	0,95	1,30	4,40	2,18	1,46	0,43	1,18	1,4	Lommahdus
Nygrån	1969	5,0	1,00	0,80	0,90	2,50	4,00	7,26	1,82	1,32	1,56	2,8	Katkesi
Björnlack&Borussiagr.	1985	6,9	1,00	0,80	1,40	2,90	10,9	16,9	0,70	0,51	1,18	2,1	Lask. liuku

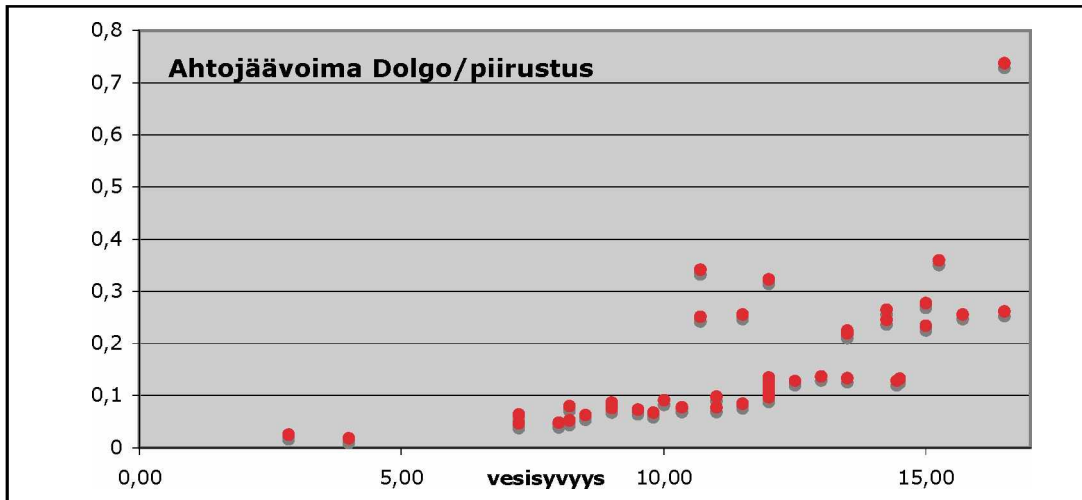
Merkittävin havainto Taulukosta 1 on vauriotapausten yhteydessä mitattu jään paksuus. Se on kaikissa tapauksissa paljon suurempi kuin pitkäaikaisten tilastojen mukainen alueella esiintyvä suurin liikkuvan jään paksuus. Edelleen havaintojen mukaan jään liikematka on ollut lyhyt ja tapahtunut kiintojävyöhykkeellä. (Poikkeuksina ovat Kemi-1 ja Nukkujan matalan majakat, jotka ovat selvästi liikkuvan jään vyöhykkeellä sisältäen myös ahtojäävalleja). Otolliset olosuhteet jään liikahtukseen kiintojävyöhykkeellä muodostuvat myrskyn nostattaman tulva-aallon irrottaessa jääkentän rannoista ja karikoista, jolloin tuulen ja tulva-aallon virtausten yhteisvaikutuksesta jää liikahtaa. Tämä osoittaa paikallisten jääolosuhteiden tarkan tuntemuksen merkitystä. Koko rannikkoa koskevat tilastot ovat suuntaa-antavia, eivätkä välttämättä sisällä lyhyitä jään liikahtuksia.

Jos mitoitus kiintojään alueella tehdään suurimman kiintojäpaksuuden mukaan ja huomioidaan mahdollinen ahtojää tai kerrostunut jää, sekä huomioidaan lisäksi rakenteelliset varmuuskertoimet päädytään ylimitoitukseen. Esimerkiksi AR1, R3 ja L64 tapauksissa suurimman kiintojään mukaan mitoitettaessa ehdotettu modifioitu ISO-menetelmä sisältää jo miltei riittävästi varmuutta todettuun murtokuormaan verrattuna. Paksun kiintojään liike on siksi harvinainen, että mitoitusta ei tarvitse tehdä väsyttävillä kuormilla.

3 Ahtojäävoima

Kuvassa 4 on Suomen vesialueilla Liitteessä A olevien majakoiden ja reunamerkkien ahtojäävoima ISO/CEN 19906 mukaisesti verrattu piirustuksissa esitettyihin ahtojäävoimiin, eli laskettu suhde ISO-normi/piirustuksen ahtojäävoima. Ahtojään parametreina on käytetty keskimääräisiä arvoja: sisäinen kitkakuorma 30 astetta, huokoisuus 30 % ja koheesio 5 kPa, sekä ahtojään kölisyytytenä asennuspaikan vesisyvyyttä.

Havaitaan, että vakiintuneessa käytännössä on käytetty moninkertaisia ahtojäävoimia! Vain Ahvenanmeren tutkamerkeissä päädytään 74 % tasolle ISO normin tasosta. Ahtojäävoima on ISO-kaavan mukaan suoraan verrannollinen rakenteen leveyteen. Siten leveämmillä rakenteilla, kuten kartioilla, ahtojäävoima kasvaa suoraan verrannollisena rakenteen leveyteen, vrt. Taulukon 2 ahtojäävoimia.



Kuva 4. Piirustuksissa käytetyn ja ISO/CEN 19906 mukaisen ahtojäävoiman suhde liitteen A rakenteille.

4 Kartiomaiset rakenteet

Taulukkoon 2 on laskettu Suomen vesialueilla olevien kartioiden sekä kiintojään kartiota vasten tarvitsemat murtovoimat että ISO/Dolgopolov mallin mukaisesti ahtovoimat ja käyttäen suurimpia kuormia antavia ahtojään ominaisuuksien arvoja: koheesio 7 kPa, jäälohkareiden keskinäinen kitkakulma 40° ja huokoisuus 0,30. Ahtojään kolin syvyytenä on käytetty 10*kiintojään paksuus, mikä ei kaikissa paikoin ole mahdollinen. Saadut ahtojäävoimat ovat merkittävästi pienemmät kuin piirustusten mukaiset mitoitusarvot huolimatta siitä, että on käytetty kiintojääpaksuutta. Kemi-1 testikartiolla mitattu kokonaisvoima 23.3.1986 oli 4.6 MN, mutta se sisälsi vain tason -5,5 m yläpuolella olevan osuuden ahtojäävoimista. Sama noin 80 cm paksu kiintojää oli antanut 2.2 MN mitattuja jäävoimia ilman samanaikaista ahtojäätä. Dolgopolovin mallin mukaan kokonaisahtojäävoima 8 m syvälle vallille on 3.7 MN. Siten todellinen kokonaisvoima on 5.9 MN. Jos valli ulottuu pohjaan asti, -12 m syvyyteen, ahtojäävoiman osuus on 6.6 MN ja kokonaisvoima 8.8 MN. Tämä jää vielä alle puoleen Kemi-1 kasuunimajakkan mitoitusjäävoimasta.

Kiinteiden merimerkkien kuormitusohje 9.5.2011

Taulukko 2. Kartiomaisten rakenteiden jääkuormat

Kartiot	Valm. vuosi	Vesisyvyys	Kartiokulma	Kartiion kaulaD	Kiintojää (m)	Liikkuva jää (m)	FkiintoPiiir	FdynPiiir	Fcone kiintoj.	Fahtopiiir	FahtoDolgo	DWL
Kemi 2	2001	12,0	60	1,10	1,1	0,8	1,8	0,3	11,3	3,3	1,9	2,8
Kotalahti LT 3 kpl	1993	7,0	60	0,86	1,1	0,5	4,6	0,2	7,6	3,2	1,8	2,6
RM2	2003	12,0	60	1,10	1,1	0,6	1,5	0,2	7,9	3,3	1,8	2,8
TM4	2003	12,8	60	1,10	1,1	0,6	2,5	0,2	9,7	3,3	1,8	2,8
RM3 Johan kasuuni	1992	9,0	71,5	0,76	1,1	0,5	5,6	2,3	9,0	6,9	1,4	1,8
Pietarinkanta	2002	9,0	60	1,10	0,9	0,6	2,0	0,0	7,9	2,2	1,3	2,8
Asunmaa	2002	12,0	60	1,10	0,9	0,6	2,0	0,0	7,9	2,2	1,3	2,8
RR1 ja RR2	1996	9,0	60	0,83	0,8	0,4	3,3	1,4	9,9	1,7	1,1	2,6
RR4	1996	6,0	60	0,82	0,8	0,4	1,5	0,0	2,1	1,7	1,1	2,5
Soloyeva	1986	9,8	60	1,10	0,7	0,6	3,3	1,6	6,2	1,3	0,8	2,8
Vuosaari 3	2006	12,0	60	1,10	0,8	0,6	6,2	0,8	10,7	1,7	1,1	2,8
Elo2 kartiokasuuni	1990	11,5	74	0,68	0,8	0,6	4,7	1,9	12,8	4,9	0,7	1,5
Kemi-1 23.3.1986	1986	12,0	56	6,80	0,8	0,8				2,2	3,7	8,8

