

KATSAUS JÄÄLAUTTOJEN JA -KENTTIEN AIHEUTTAMIEN RAKENTEIDEN KUORMITUSTEN LASKENTAMENETELMIIN

Eila Lehmus

Rakenteiden Mekaniikka, Vol 15
No. 4 1982, s. 1...21

YHTEENVETO: Artikkelissa käsitellään jään aiheuttamien rakenteiden kuormitusten laskentamenetelmiä alalta julkaistun kirjallisuuden pohjalta. Aluksi selvitetään jäävoiman syntymiseen ja suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Koska jääkentän murtomekanismi pystysuoraa tasoa vastaan poikkeaa murtomekanismista kaltevaa tasoa vastaan, laskentamenetelmiä esitettäessä rakenteet on jaettu etureunansa perusteella pystysuoriin ja kalteviin rakenteisiin. Lisäksi on lyhyesti käsitelty veden pinnan korkeuden muutoksista aiheutuvia pystyvoimia.

JOHDANTO

Arktisten alueiden luonnonvarojen hyödyntämistä kohtaan herännyt kiinnostus on lisännyt arktiseen tekniikkaan liittyvää tutkimusta monissa maissa. Aluksi on keskitytty arktisen ilmaston, jään ominaisuuksien sekä jää- ja lumikuormien tutkimiseen. Nykyisiä arktisen tutkimuksen aloja ovat laiva- ja meritekniikka, rakennustekniikka, materiaalitekniikka sekä mittaustekniikka ja automaatio.

Tässä artikkelissa käsitellään jään aiheuttamien voimien laskentamenetelmiä alalta julkaistun kirjallisuuden pohjalta. Esityksen lyhentämiseksi on ahtojäävallien sekä jäävuorten aiheuttamat rasitukset jätetty pois. Samasta syystä on tarkastelun ulkopuolelle jätetty jääsaaria ja poraustasanteita vastaan syntyvät voimat.

Jääkuorma voi olla staattinen tai dynaaminen. Jään rakenteisiin kohdistama kuormitus aiheutuu jään lämpölaajenemisesta, vedenpinnan korkeuden muutoksista tai jääkentän liikkeistä tuulten ja merivirtojen vaikutuksesta. Edellä mainittujen ulkoisten tekijöiden lisäksi kuorman suuruuteen vaikuttavat jään ominaisuudet kuten ikä, tiheys, suolapitoisuus sekä lämpötila. Teoreettisesti oikea laskentamalli, joka ottaa huomioon kaikki vaikuttavat tekijät, ei kuitenkaan välttämättä anna oikeaa tulosta, koska luonnossa jään ominaisuudet ja jääolosuhteet voivat vaihdella huomattavasti.

TERMISET JÄÄKUORMAT

Jään laajeneminen lämpötilan noustessa on joskus merkittävä kuormitusteki-

jä. Yleensä jyrkät lämpötilan muutokset ovat harvinaisia, mutta niiden esiintyessä syntyy helposti suuria jäänpaineita. Jään pyrkiessä laajenemaan jäähän syntyy puristusjännityksiä, mikäli laajeneminen on estetty. Tällaisia alueita ovat esim. järvet, altaat, kanavat ja padoilla tai muilla rakenteilla suojatut rannikkoalueet. Jään kylmeneminen ei yleensä aiheuta suuria rasituksia rakenteille, koska jää halkeilee vetojännitysten vaikuttaessa.

Jään lämpeneminen riippuu ilman lämpötilan muutoksista sekä auringon säteilyenergian absorptiosta. Ilman lämpötilan muutosta voidaan kuvata yksinkertaistetuilla funktioilla. Askelfunktiossa lämpötila muuttuu hyppäyksittäin. Luonnossa näin ei tapahdu, joten askelfunktiossa tulee käyttää tiheää askeljakoa ja pieniä muutoksia askelta kohti, jotta se kuvaisi todellisuutta likimain. Riittävän pitkällä aikavälillä lämpötilan nousua voidaan kuvata lineaarisella funktiolla. Kolmas mahdollisuus on päivittäinen, sinimuotoinen muutosfunktio.

Jään lämpölaajenemisen aiheuttaman jäänpaineen määrittämiseksi ei ole olemassa tarkkaa menetelmää, koska paikalliset olosuhteet, lämpötila, kiderakenne, jännitystila sekä kuormitus aika vaikuttavat jään kimmoisiin ja plastisiin ominaisuuksiin. Suhteellisen hitaasti kasvava lämpötila aiheuttaa Drouin'in ja Michelin /1/ mukaan suurimman jäänpaineen, koska lämpöaalto ehtii syvemmälle ennen kuin jännitys pinnassa pienenee virumisen ansiosta. Michelin mukaan yli 30 cm paksuisilla jäillä lämpölaajenemisen vaikutus pysyy samana, koska jännitys alkaa pienetä yläpinnassa ennen kuin lämpötila kasvaa 30 cm:n alapuolella. Yleensä suurin paine saavutetaan melko pian sen jälkeen, kun suurin jännitys on saavutettu yläpinnassa. Laajenevan jään aiheuttamia voimia pienentää se, että lämpötilan alentuessa jäähän syntyy lämpötilaeroista vetojännityksiä ja halkeamia. Kun lämpötila nousee, syntyneen railon on puristuttava kiinni, ennen kuin puristusjännitys voi muodostua.

Myös lumipeite pienentää jään lämpölaajenemisen aiheuttamia kuormia, koska lumen lämmönjohtavuus on $1/10 - 1/30$ jään lämmönjohtavuudesta ja lumi toimii täten lämmöneristeenä pienentäen ja hidastaen jään lämpötilan muutoksia. Lämpölaajeneminen aiheuttaa suurimman paineen alkutalvesta, kun jää on vasta muodostunut ja lumeton /1/. Tällaisen kylmän kauden aikana jää laajenee nopeasti, jos ilma lämpenee nopeasti.

Jään absorptio on pieni näkyvän valon alueella. Aallonpituuden ollessa suurempi kuin $1 \mu\text{m}$ noin 40 % säteilyenergiasta absorboituu 10 cm vahvuiseen jäähän. Jään paksutessa absorptio hieman kasvaa siten, että 30 cm jää absorboi 55 % ja 120 cm jää 65 % /1/.

Laboratoriomittauksista saadut termiset jäänpaineet ovat yleensä suurempia kuin vastaavat arvot luonnon olosuhteissa, missä jää on heikompaa halkeamien, sisäisten dislokaatioiden ja epäjatkuvuuden vuoksi. Toistuva laajeneminen ja kutistuminen aiheuttaa lisäksi alhaisempia paineita kuin ensimmäinen laajeneminen. Lämpötilan muutoksesta dT aiheutuu jäähän suhteellinen pituudenmuutos

$$\epsilon = \alpha \cdot dT, \quad (1)$$

missä α on pituuden lämpötilakerroin. Lähteen /1/ mukaan pituuden lämpötilakerroin on

$$\alpha = (5,4 + 0,018T) \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}},$$

missä T on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Jään termisten jännitysten laskemiseen käytetään reologista yhtälöä. Lähteessä /2/ on ehdotettu kolmen parametrin yhtälöä

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + K D \sigma^n, \quad (2)$$

missä $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$, muodonmuutosnopeus

$\dot{\sigma} = d\sigma/dt$, jännityksen muutosnopeus

E = kimmokerroin

K, n = viskoosin muodonmuutoksen kertoimia

D = diffuusiokerroin jään vesimolekyyleille

Ensin on siis arvioitava lämpötilajakauma ajan funktiona jääkerroksen eri kohdissa, jonka jälkeen jännitykset voidaan määrittää reologisesta yhtälöstä.

Termisten jääkuormien mitoituservoina käytetään Pohjois-Amerikassa, Skandinaviassa ja Neuvostoliitossa arvoja väliltä 0,05 - 0,30 MN/m riippuen paikallisista olosuhteista, rakenteen joustavuudesta sekä siitä, kuinka vapaasti lämpöliikkeet voivat tapahtua. Lisäksi on mainittava se, että yli 40 cm:n jääpeitteet ovat harvoin vailla lumipeitettä ja halkeiluja.

JÄÄHÄN VAIKUTTAVAT ULKOISET VOIMAT

Jäälauttaan tai jääkenttään vaikuttavista ulkoisista voimista oleellisimpia ovat ilman ja veden virtauksista aiheutuvat kitkavoimat. Jos jään muodonmuutokset jätetään huomiotta, jääkentän tai -lautan liikeyhtälö voidaan esittää muodossa

$$m \cdot dv/dt = F_i + F_v, \quad (3)$$

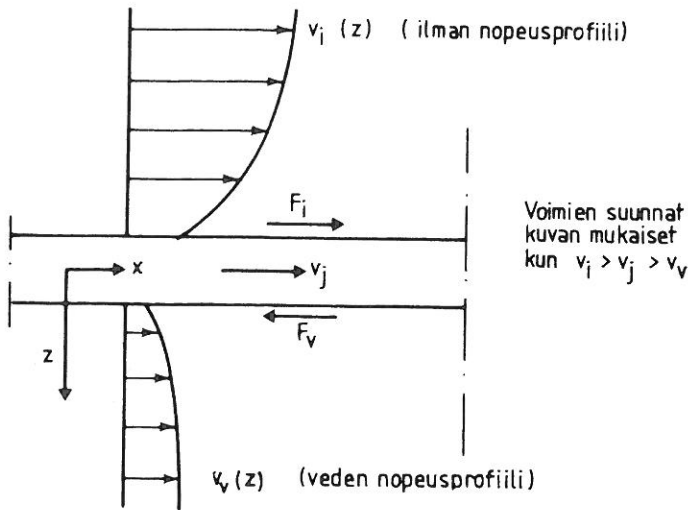
missä m on jään massa pinta-alayksikköä kohti, dv/dt on jään liiketilan muutos, kiihtyvyyden tai hidastuvuus, F_i on jään ja ilman ja F_v on jään ja veden välinen kitkavoima pinta-alayksikköä kohti (kuva 1).

Ilman tai veden virtauksen aiheuttamat kitkavoimat arvioidaan lausekkeella

$$\tau = \rho c(Z)[v(Z)]^2, \quad (4)$$

missä ρ = ilman tai veden tiheys [kg/m^3]

Z = etäisyys jään pinnasta [m]



Kuva 1. Jäälautan kitkavoimat.

missä $v(Z)$ = ilman tai veden virtausnopeus etäisyydellä Z jään pinnasta [m/s]

$c(Z)$ = pintakitkan kerroin, joka liittyy virtausnopeuden mittauskohdan etäisyyteen Z jään pinnasta kaavan

$$c(Z) = k^2 \left[\ln \frac{Z+Z_0}{Z_0} \right]^{-2} \quad (5)$$

mukaan. Yhtälössä (5) k on Karmanin vakio (yleensä oletetaan 0,4:ksi) ja Z_0 on rajapinnan karkeutta kuvaava tekijä.

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty eräitä mitattuja arvoja suureille Z_0 , c_i (ilmavirtauksen kitkakerroin) ja c_v (veden virtauksen kitkakerroin).

Jos kitkavoimista tarvitaan vain karkea arvio, yhtälössä (4) esiintyvä kitkakerroin voidaan olettaa vakioksi. Kitkakertoimille on tällöin syytä ottaa riittävän suuret, epäedullisinta mahdollista tilannetta kuvaavat arvot.

Taulukko 1. Mitattuja arvoja rajapinnan karkeutta kuvaavalle tekijälle Z_0 ja ilmavirtauksen kitkakertoimelle c_i /5/.

Pinta	Z_0 (cm)	c_i (10 m)*10 ³
Rikkonainen jää	0,23 - 0,57	2,27 - 2,87
Lumipeite	0,0023 - 0,285	0,95 - 2,38
Tasainen jää	0,0017 - 0,03	0,97 - 1,48
Röykkiöitynyt jää	0,0011 - 0,32	0,85 - 2,47
Sohjolumen peittävä jää	0,0036 - 0,33	1,02 - 2,49

Taulukko 2. Mitattuja arvoja rajapinnan karkeutta kuvaavalle tekijälle Z_0 ja veden virtauksen kitkakertoimelle C_v /5/.

Pinta	Z_0 (cm)	$C_v (\frac{1}{2} \text{ m}) * 10^3$
Hyvin karkea	8,1 - 10,0	41 - 50
Karkea	1,5 - 4,7	12,8 - 26,5
Sileä	0,2 - 1,4	5,2 - 12,3

Tuulten ja merivirtojen aiheuttamat voimat vaihtelevat suuresti. Niiden vaikutuksesta tapahtuu jään kasaantumista loiville rannoille ja rakenteille. Edellä mainittujen voimien lisäksi aaltovoimilla on merkitystä, kun jääkasa rakenteen edessä on niin matala, että aalto kulkeutuu kasan läpi menettämättä kaikkea energiaansa vaimennukseen. Voimien lisäksi jään rakenteella, pohjaolosuhteilla ja -geometrialla on havaittu olevan merkitystä jään kasautumiseen.

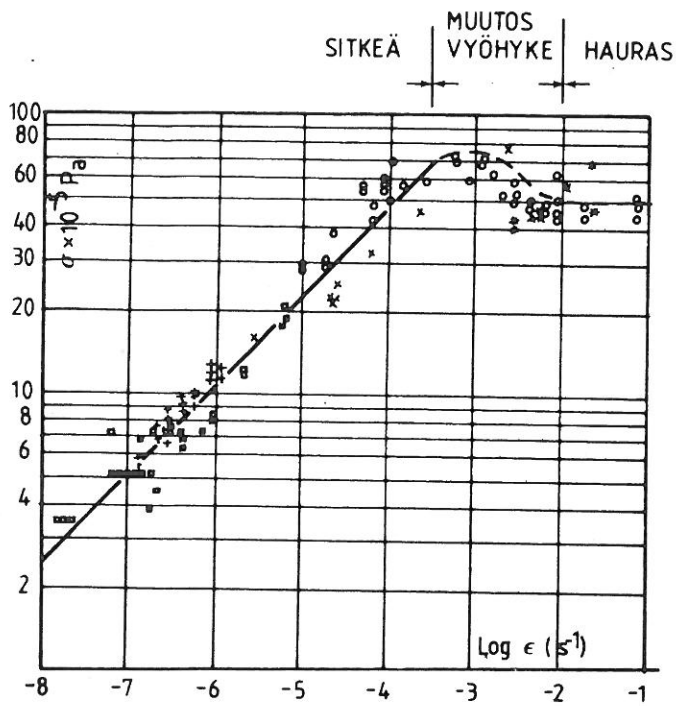
VOIMAN SUURUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Jääkuorman luonne riippuu jään liikenopeudesta sekä lujuudesta, mutta myös rakenteen mitoilla sekä jään paksuudella on merkitystä. Leveitä, massiivisia rakenteita suunniteltaessa riittää yleensä jään ominaisuuksien huomioon ottaminen, koska jään ja rakenteen vuorovaikutustilanteessa syntyvien värähtelyjen taajuus sisältää vain harvoin massiivisen, jäykän rakenteen ominaistajuuden. Kevyitä, hoikkia rakenteita tarkasteltaessa myös rakenteen omat värähtelyominaisuudet on otettava huomioon.

Jään muodonmuutosnopeudesta riippuen murtuminen voi olla sitkeä, hauras tai jokin siltä väliltä. Kuten kuvasta 2 näkyy, jään yksiaksiaalinen puristus- ja tunkeutumislujuus riippuu myös muodonmuutosnopeudesta.

Jään ja rakenteen välistä kosketusta murtumisen aikana kuvaa kosketuskerroin k ($k = 1,0$, kun kosketus on täydellinen esim. rakenteeseen kiinni jäänyt jääkenttä). Vaikka puristuslujuus kasvaa lämpötilan laskiessa, niin ei voida suoraan olettaa, että "kylmä" jää aiheuttaisi suurimman voiman rakennetta vastaan. "Kylmän" jään lujuus on tosin suurempi kuin "lämpimän" jään, mutta se on haurasta, jolloin kosketuskerroin on pieni. "Lämmin" jää on taipuisa ja kosketus on näin ollen täydellisempi kuin "kylmän" jään murtuessa.

Murtumistapa vaikuttaa myös kosketuskertoimeen, koska pienillä muodonmuutosnopeuksilla jää ehtii mukautua niin, että kosketus pysyy koko ajan lähes täydellisenä. Lähteen /4/ mukaan jää plastisoituu, jos muodonmuutosnopeus $\dot{\epsilon} < 5 \cdot 10^{-4}$ 1/s. Murtumistavan lisäksi kosketuskertoimeen vaikuttaa rakenteen leveys. Lähteen /5/ mukaan muodonmuutosnopeus voidaan määrittää likimääräi-



Kuva 2. Eri tutkijoiden mittaamia S2-tyypin jään puristus- ja tunkeutumislujuuksia.

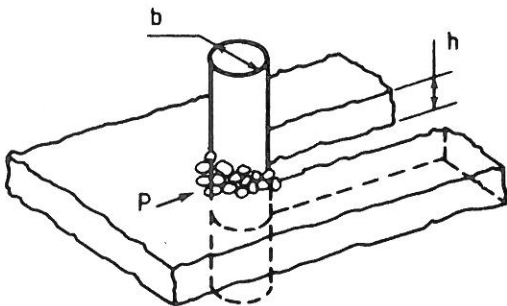
sesti yhtälöstä

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{2D}, \quad (6)$$

missä v on jääkentän tunkeutumisnopeus ja D on rakenteen leveys.

Tasapaksun jääpeitteen myötäessä rakennetta vastaan voimalla P syntyvä nimellispaine p_e on kuvan 3 mukaan

$$p_e = \frac{P}{bh}. \quad (7)$$



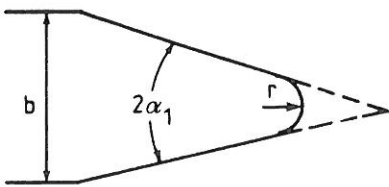
Kuva 3. Nimellispaineen määrittäminen.

Ongelmana on nimellispaineen määrittäminen erilaisille olosuhteille. Muodonmuutosnopeuden ja kosketuskertoimen lisäksi on rakenteen muodolla ja mitoilla havaittu olevan merkitystä nimellispaineeseen.

Jään painetta laskettaessa käytetään rakenteen muodon huomioon ottamiseksi muotokerrointa m , jonka arvot ovat $m = 1,0$ suoralle etureunalle, $m = 0,9$ puolipyörän muotoiselle etureunalle sekä $m = 0,85 \sqrt{\sin \alpha}$ kiilamaiselle etureunalle, kun kiilakulma 2α vaihtelee välillä $60^\circ - 120^\circ$. Jos kiilakulma on pyöristetty, voidaan ekvivalentti terävä kulma määrittää kaavasta

$$2\alpha = 2\alpha_1 + \frac{4r}{b}(40^\circ - \alpha_1) \quad (8)$$

Kaavan merkinnät käyvät ilmi kuvasta 4.



Kuva 4. Pyöristetty virtapilarin etureuna.

Monet tutkijat ovat todenneet, että ns. tunkeumakertoimen I (= nimellispaineen suhde jään puristuslujuuteen) arvo riippuu suhteesta b/h . Eri myötöehtoihin perustuva tarkastelu I :n määrittämiseksi on esitetty lähteessä /4/. Afanasev /5/ on esittänyt seuraavat yhtälöt tunkeumakertoimelle

$$I = \sqrt{5 \cdot h/b + 1} \quad , \quad \text{kun } b/h > 1 \quad (9)$$

ja

$$I = 4 - 1,55 \cdot b/h \quad , \quad \text{kun } b/h \leq 1 \quad (10)$$

Leveän rakenteen tunkeumakerroin siis lähenee ykköstä. Toisin sanoen kapeaan rakenteeseen kohdistuva jäänpaine on suurempi kuin leveään rakenteeseen kohdistuva paine. Jäänpaineen suunnitteluarvoksi on ehdotettu vähintään 4000 kPa, kapeille rakenteille jopa 7000 kPa.

Eräs nimellispaineen approksimaatio on Korzhavinin /6/ esittämä

$$p_e = I m k \sigma \quad , \quad (11)$$

missä σ on jään puristuslujuus.

JÄÄKENTÄN AIHEUTTAMAT PYSTYSUORIEN RAKENTEIDEN KUORMAT

Jään murtuminen pystysuoraa rakennetta vastaan tapahtuu murskaantumalla

tai lommahtamalla. Joskus jääkenttä saattaa lohkeilla ja jatkaa kulkuaan rakenteen leikatessa siihen itsensä levyisen väylän. Rakenteeseen kiinni jäänyt jää aiheuttaa liikkeelle lähtiessään suuremman voiman kuin liikkuva jää sen reunan osuessa rakenteeseen. Lisäksi jää muodostaa usein ns. kauluksen rakenteen ympärille, jolloin tartuntapinnan korkeus on suurempi kuin jääkentän korkeus.

Staattisia voimia aiheuttavat lähinnä ulkoiset tekijät, tuuli ja veden virtaus sekä ilman lämpeneminen. Myös laajan, liikkuvan jääkentän aiheuttama voima on staattista, mikäli kentän nopeus on niin hidasta, että jää plastisoituu. Tällaista tapausta vastaava vaakavoima voidaan määrittää kaavasta

$$H = kmnf\sigma_c \cdot bh , \quad (12)$$

missä n on skaalatekijä ja f kerroin, joka ottaa huomioon puristuslujuuden muuttumisen muodonmuutosnopeuden funktiona.

Yleensä kriittisiä jääkuormia aiheuttavat useiden neliökilometrien laajuiset jääkentät, mutta myös pienet ajelehtivat lautat voivat saada aikaan suuria dynaamisia rasituksia, mikäli lautan liike-energia on riittävä. Vaikka voima olisi luonteeltaan dynaaminen, massiivista, jäykkää rakennetta kuormittava voima voidaan määrittää staattista mitoituskäytännön avulla.

Varsinkin keväällä jäiden lähtöaikaan ja muulloinkin kovalla tuulella jää liikkuu suhteellisen nopeasti. Tällöin nopeus on yleensä riittävän suuri, jotta murtuminen tapahtuu joko hauraasti tai siirtymävyöhykkeellä (kuva 2). Jäykän, massiivisen rakenteen ominaistaajuus poikkeaa yleensä jään ja rakenteen vuorovaikutustilanteen taajuussisällöstä. Hoikkien teräsrakenteiden käyttö merirakenteina tuo ongelmaan mukaan myös rakenteen ominaisuudet. Tällöin jään ja rakenteen dynaaminen vuorovaikutusanalyysi on oleellinen sekä käyttö- että murtotilan mukaisen suunnittelun perustaksi. Liikkuvan jääkentän kuormittaman rakenteen liikeyhtälö on

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{P(t)\} , \quad (13)$$

missä $[m]$ on massamatriisi, $[c]$ vaimennusmatriisi, $[k]$ jäykkymatriisi, $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ ja $\{\ddot{x}\}$ ovat rakenteen siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyyshetket ja $\{P(t)\}$ rakenteen kuormitusvektori.

Pyrittäessä ratkaisemaan ongelma yleispätevästi, tulee yhtälöön (13) sisällyttää rakenteen lisäksi riittävän laajalti jääkenttää, koska myös jää varastoi liike-energiaa sisäisten muodonmuutosten vuoksi. Tämän tapaisen työlään analyysin suorittamisen asettaa kyseenalaiseksi mm. se, että jään murtotapaa ja murtolujuutta ei voida arvioida luotettavasti.

Nimellislujuuden arvoina käytetään $2,0 - 3,0 \text{ MN/m}^2$. Jos kosketus jään ja rakenteen välillä on täydellinen ja murtuminen tapahtuu muodonmuutosnopeuden ollessa välillä $10^{-4} - 10^{-2} \text{ 1/s}$, nimellislujuuden arvot voivat vaihdella jopa $3,0 - 5,0 \text{ MN/m}^2$. Dynaamisen voiman suuruutta pienentää se, että keväällä jäiden lähtöaikaan jää on usein hyvin lämmintä ja osittain heikentyneenä,

jolloin lujuus on alhainen.

Mikäli lautan alkunopeus v_0 on niin suuri, että pilarin etureuna tunkeutuu koko leveydeltään lautan sisään, saadaan teoreettisesti suurimmaksi vaakavoimaksi

$$H_{\max} = \sigma_c b h . \quad (14)$$

Todellisuudessa H_{\max} on kerrottava vähennyskertoimella C_F .

Kaavaan (12) voidaan käyttää myös dynaamisen voiman määrittämiseen. Koska kosketus jään ja rakenteen välillä vain harvoin on täydellinen, käytetään kosketuskertoimen k ja skaalatekijän n asemasta yhdistettyä ns. tunkeumakerrointa I (yhtälöt (9) ja (10)), jolloin vaakavoimaksi saadaan

$$H = m I \sigma_c b h . \quad (15)$$

Dynaamiselle tapaukselle murtotapahtuma on hauras ($\dot{\epsilon} \geq 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s}$) ja puristuslujuutena voidaan käyttää jään yksiaksiaalista puristuslujuutta.

Vuoden 1974 CSA siltanormien mukaan lasketaan vaakavoima kaavasta

$$H = C_n p b h , \quad (16)$$

missä C_n on etureunan kaltevuuskulmasta (β) riippuva kerroin (taulukko 3).

Taulukko 3. Kertoimen C_n arvot

Rakenteen etureunan kaltevuuskulma (β) vaakatason suhteen	C_n
$90^\circ - 75^\circ$	1,00
$75^\circ - 60^\circ$	0,75
$60^\circ - 45^\circ$	0,50

Jään nimellispaine riippuu paikallisista olosuhteista jäiden lähtöaikaan. Kaavassa (16) voidaan käyttää seuraavia arvoja:

$$p = \begin{cases} 0,7 \text{ MPa,} & \text{kun jää on sulamisesta johtuen osittain heikentyntä ja liikkuu lämpötilan ollessa lähellä sulamispistettä} \\ 1,4 \text{ MPa,} & \text{kun jää liikkuu isoina lauttoina lämpötilan ollessa lähellä sulamispistettä} \\ 2,1 \text{ MPa,} & \text{kun jää on ehjää ja liikkuu lämpötilan ollessa lähellä sulamispistettä} \\ 2,8 \text{ MPa,} & \text{kun jää on ehjää ja liikkuu tuulen tai veden virtauksen vaikutuksesta lämpötilan ollessa selvästi alle sulamispisteen} \end{cases}$$

Rakenteiden kuormitusohjeet (RIL144-1982) antavat lähes samat arvot Suomen oloihin.

Tryden /9/ mukaan pystysuoraa rakennetta vastaan tuleva jäänpaine voidaan määrittää kaavasta

$$H = k\sigma_{\infty}bh, \quad (17)$$

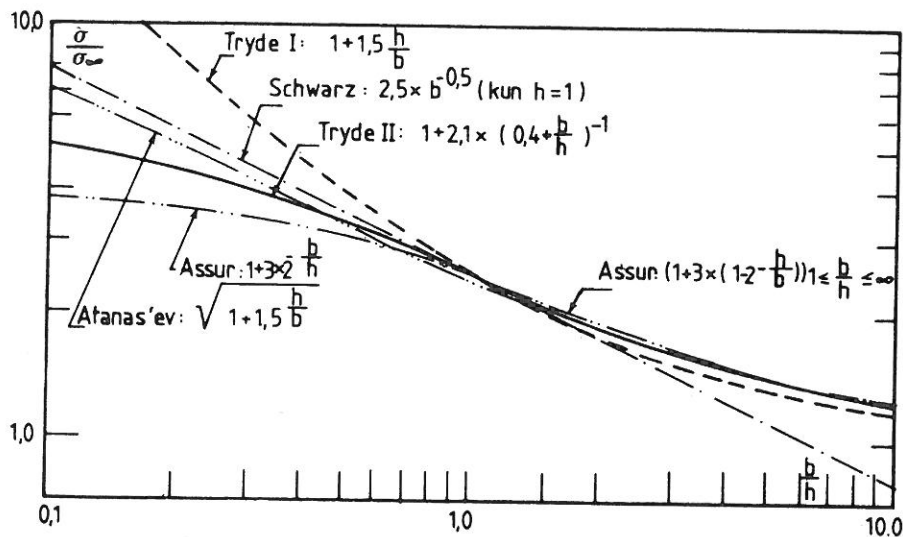
missä k on dimensioton kerroin ja σ_{∞} jään puristuslujuus äärettömän leveätä rakennetta vastaan. Hoikille rakenteille kuten pilareille ja sylintereille k saadaan seuraavasta yhtälöstä

$$k = \frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = 1 + 1,5 \frac{h}{b}, \quad (18)$$

missä suhde h/b on välillä $0 - 2$. Tulosten mukaan em. k :n lauseke antaa liian suuria arvoja jäänpaineelle, kun $h/b > 1$. Parempia tuloksia saadaan, jos k :lle annetaan arvoksi lauseke

$$k = 1 + 2,1(0,4 + \frac{b}{h})^{-1}. \quad (19)$$

Kuvassa 5 on Tryden saamia tuloksia esitetty yhdessä eri tutkijoiden saamien tulosten kanssa.



Kuva 5. Jään tunkeutumislujuus funktiona rakenteen leveyden (b) suhteesta jään paksuuteen (h).

Jääkentän kohdatessa pystysuoran rakenteen voi lommahtaminen rajoittaa esiintyvää voimaa. Pienimittakaavaisissa laboratorioskokeissa on todettu, että lommahduskuorma on pienempi kuin murskautumiseen tarvittava voima, mikäli rakenteen leveyden suhde jään paksuuteen on suuri. Lähteen /10/ mukaan jääkenttä lommahtaa, jos em. suhdeluku on suurempi kuin kuusi. Monet tulok-

set kuitenkin osoittavat, että em. tekijän lisäksi jääkentän on oltava riittävän ohut (20 - 30 cm).

Lommahtamista tutkittaessa jääkenttä oletetaan yleensä kimmoisella alustalla olevaksi isotrooppiseksi laataksi. Oletus on voimassa niin kauan, kuin jää ei kokonaan painu veden alle tai nouse ylös vedestä. Tasossaan kuormitetun ohuen laatan lommahduskuorma määritetään yhtälöstä

$$D \nabla^4 w + Kw = N_{xx} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_{yy} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad (20)$$

missä D on laatan taivutusjäykkyys, K alustakerroin, w laatan taipuma sekä N_{xx} , N_{xy} ja N_{yy} tasovoimat pituusyksikköä kohti. Lommahduskuorma saadaan yhtälön (20) ominaisarvoina. Lisäksi määritellään laatan karakteristinen pituus

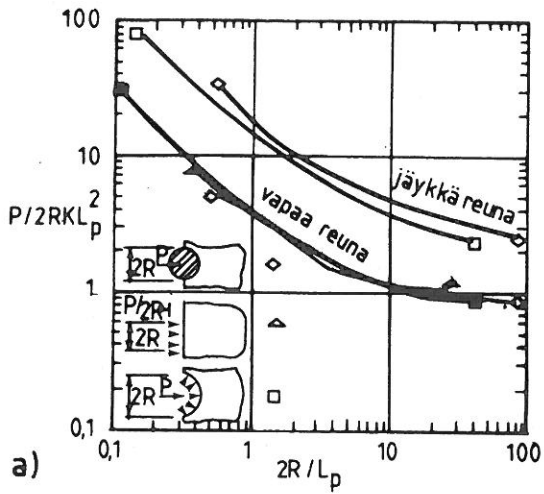
$$L_p = \left(\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K} \right)^{1/4}, \quad (21)$$

missä E on jään kimmomoduli ja ν Poissonin luku (jäälle $\nu = 0,3$). Jääkenttää tarkasteltaessa alustakertoimena käytetään veden ominaispainoa.

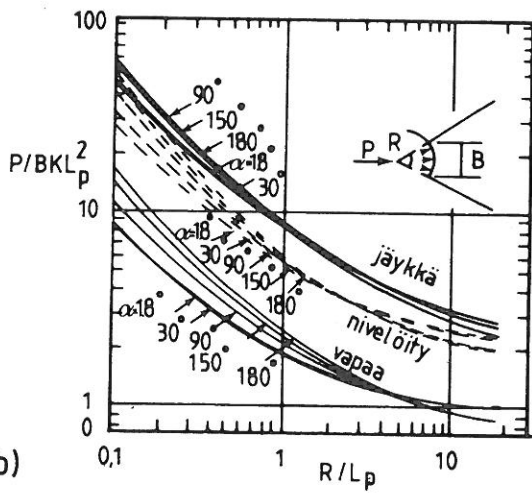
Numeerisin menetelmin yhtälö (20) voidaan ratkaista myös monimutkaisille geometrioille ja reunaehdoille. Suljetussa muodossa ratkaisu on mahdollista saada vain yksinkertaisille geometrioille ja tasaisille normaalivoimien jakautumille.

Sodhi /11/ on tutkinut puoliäärettömän kiillamaisen laatan lommahdusta ympyräsyylinteriä vastaan, koska jäälevyn törmätessä leveään rakenteeseen syntyy aluksi säteittäisiä halkeamia ja suurin paine on näin ollen suhteessa ajelehtivien, kiillanmuotoisten laattojen lommahduskuormaan. Ratkaisussa on käytetty elementtimenetelmää ja oletettu, että laattaan syntyy vain säteittäisiä normaalivoimia. Kuvassa 6 on Sodhin tulosten rinnalla esitetty eri tutkijoiden esittämiä tuloksia lähteen /11/ mukaan.

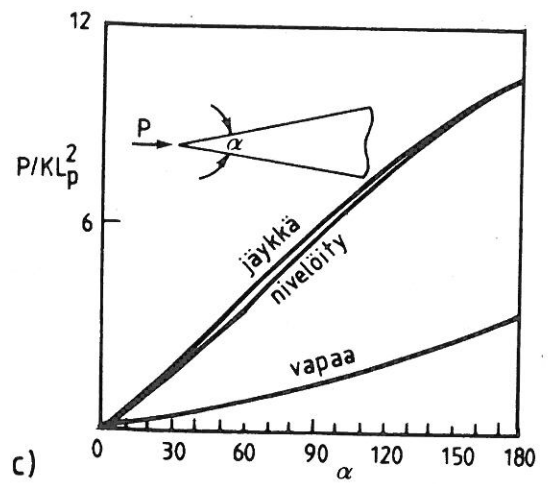
Lähteessä /11/ on myös kuvat tapauksista, joissa laatan kiillakulma α on suurempi kuin 180° . Tuloksista on selvästi havaittavissa, että lommahduskuormat ovat suuria, kun suhde R/L_p on pieni. Tällöin lommahtaminen ei yleensä ole rajoittava murtumistapa. Kokeiden mukaan laskentatulokset yliarvioivat lommahduspainetta n. 30 %. Luonnonjään lommahduskuorma riippuukin rakenteen geometriasta sekä jään paksuudesta ja muista ominaisuuksista. Karakteristinen pituus L_p vaikuttaa voimakkaasti laatan lommahduskuormaan. Kun L_p puolestaan riippuu jään kimmokertoimesta, on tehollisen kimmokertoimen arvon määrittäminen oleellista lommahdustehtävää ratkaistaessa.



a)



b)



c)

Kuva 6. a) Dimensioton lomahduspaine suhteen $2R/L_p$ funktiona puoliäärettömälle laatalle.
 b) Dimensioton lomahduspaine suhteen R/L_p funktiona eri kiilakulman α arvoilla puoliäärettömälle sektorille.
 c) Pistemäinen lomahduskuorma kiilakulman α funktiona.

Vaakavoiman pienentämiseksi rakenteen etureuna voidaan tehdä kaltevaksi. Samalla kun kalteva etureuna pienentää voiman vaakakomponenttia, se saa aikaan pystykomponentin, jonka ansiosta jää leikkautuu helpommin ja rakenteen stabiilius paranee. Kaltevan etureunan käyttö riittää niissä tapauksissa, joissa jään liike on yksisuuntainen ja tiedetään. Jos liikkeen suuntaa ei tiedetä, voidaan käyttää jäätä joko ylös- tai alaspäin taivuttavaa kartio- maista rakennetta.

Liikkuvan lautan murtuessa kaltevaa tasoa vastaan seuraavat seikat on otettava huomioon:

- 1) Liikkuvan lautan aiheuttama sysäys lisää voimaa.
- 2) Kaltevalle rakenteelle kasaantuvien jäälohkareiden paino lisää kuormaa.
- 3) Jään veto- ja taivutuslujuus kasvavat, koska kaltevaa seinää vastaan iskeytyvä jäälautta on puristustilassa.

Kaltevaa tasoa vastaan lautan murtuminen voi tapahtua leikkaus-, taivutus- tai puristusmurtona. Leikkausmurto tapahtuu pilarin välittömässä läheisyydessä ja se on todennäköisin kevätjään aikana, jolloin liukumisen kiderajoja pitkin tapahtuu helpommin. Mikäli kevätjää ei ole täysin kehittynyt, taivutusmurto on mahdollinen. Kun pystyvoima on tarpeeksi suuri nostamaan levyn ylös, syntyy säteittäisiä halkeamia kohtisuoraan pilarin pintaa vastaan. Voiman kasvaessa edelleen syntyy ympyrähalkeamia. Voima saavuttaa siis maksimiarvonsa ympyrähalkeaman syntyessä ja pienenee jälleen. Ilmiö toistuu ehyen lautan reunan koskettaessa pilaria. Leikkaus- ja taivutusmurto ovat edullisempia rakenteen kannalta kuin puristusmurto, sillä taivutuslujuus on vain 0,35 - 0,5 kertaa puristuslujuus ja leikkauslujuus on vieläkin pienempi.

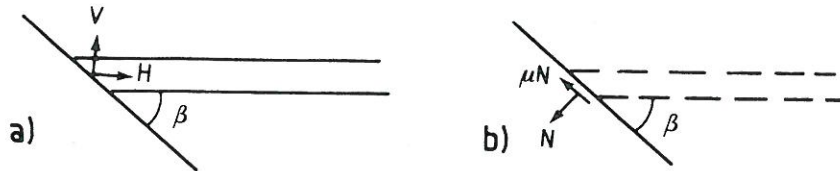
Puristusmurto on yleinen pystysuoria pintoja vastaan, mutta se voi tapahtua myös hieman kaltevaa pintaa vastaan, jolloin voiman pystykomponentti on pieni. Rajakulmaksi β on joissakin tapauksissa esitetty 75° , jota suuremmilla kulman arvoilla puristusmurto on määräävä voimia arvioitaessa. Taivutusmurto on yleisin murtumistapa teräsjäällä. Jos teräsjää on ohutta, voi myös puristusmurto tulla kysymykseen. Koska jään puristuslujuus on paljon suurempi kuin taivutus- tai leikkauslujuus, puristusmurto aiheuttaa ankarimman dynaamisen kuormituksen rakenteelle. Jos jäälevyä tarkastellaan puoliäärettömänä laattana, vaakavoiman H aiheuttama taivutusvoimaa voidaan jättää huomiotta, koska pystyvoiman kuormittaman levyn taivutusmomentin maksimin etäisyys reunstasta on useita kymmeniä kertoja murtoa vastaavan taipuman suuruinen.

Murtumistyyppin määräävistä seikoista ei ole riittävästi tietoa. Taivutusmurto on kuitenkin yleisin suurilla jäänlujuuksilla ja suurilla nopeuksilla. Käytännössä on vaikea erottaa eri murtumistyyppisiä, sillä kaksi tai useampia voi esiintyä yhtä aikaa tai vuorotellen. Jopa suhteellisen homogeenisessa lautassa lujuus vaihtelee. Siksi murtumistapa tietyillä kaltevuuskulman arvoilla muuttuu epäsäännöllisesti. Tilanteen tarkastelua vaikeuttavat vielä

jään paksuuden vaihtelu, epäjatkuvuudet, vallit, lämpötila, suolaisuus ja lumipeite.

Jään murtumiseen tarvittavasta voimasta on esitetty useita laskentamenetelmiä. Todellisessa tilanteessa voima on kuitenkin suurempi, sillä varsinaisen murtovoiman lisäksi se koostuu jääkentän irrottamiseen ja murtuneiden lohkkareiden siirtämiseen tarvittavista voimista.

Jään murtumista vinoa tasoa vastaan voidaan havainnollistaa kuvalla 7.



Kuva 7. Jäähän (a) ja rakenteeseen (b) vaikuttavat voimat jään murtuessa kaltevaa tasoa vastaan.

Tasapainoehdoista saadaan

$$H = V \left(\frac{\sin\beta + \mu\cos\beta}{\cos\beta - \mu\sin\beta} \right). \quad (22)$$

Oletetaan jäälaatan murtuvan taipumalla, jolloin voiman arvo määräytyy jäälaatan taivutuslujuudesta. Taivutusteoriaa käyttäen laskennallinen taivutuslujuus on

$$\sigma_f = \frac{6M_o}{bh^2}, \quad (23)$$

missä M_o on jäälaatan momenttikapasiteetti. Kimmoisella alustalla oleva puoliäärettömän palkin suurin taivutuskapasiteetti on

$$M_o = \frac{V}{\psi \cdot e^{\pi/4}} \cdot \sin(\pi/4), \quad (24)$$

kun voima V vaikuttaa palkin päässä. Kerroin ψ lasketaan kaavasta

$$\psi = \left(\frac{K}{4EI} \right)^{1/4}. \quad (25)$$

Yhtälöistä (22) - (24) voidaan ratkaista pystyvoima V . Sijoittamalla se vaakavoiman H lausekkeeseen ja jakamalla molemmat puolet rakenteen leveydellä b saadaan jään murtamiseen tarvittava voima pituusyksikköä kohti

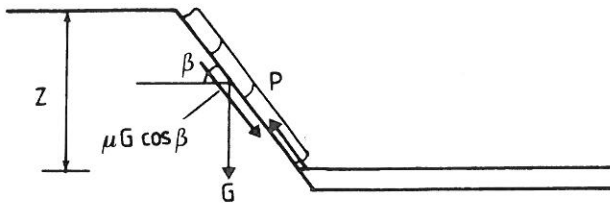
$$\frac{H}{b} = 0,68 \sigma_f \left(\frac{\rho_v g h^5}{E} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\sin\beta + \mu\cos\beta}{\cos\beta - \mu\sin\beta} \right). \quad (26)$$

Jään nouseminen ylös tasoa pitkin vaatii myös voimaa, joka kuvan 8 merkinnöin

on

$$P = \frac{Z}{\sin\beta} \cdot hb \cdot \rho_j \cdot g(\sin\beta + \mu\cos\beta) , \quad (27)$$

missä ρ_j on jään tiheys.



Kuva 8. Murtuneen jään nouseminen ylös tasoa.

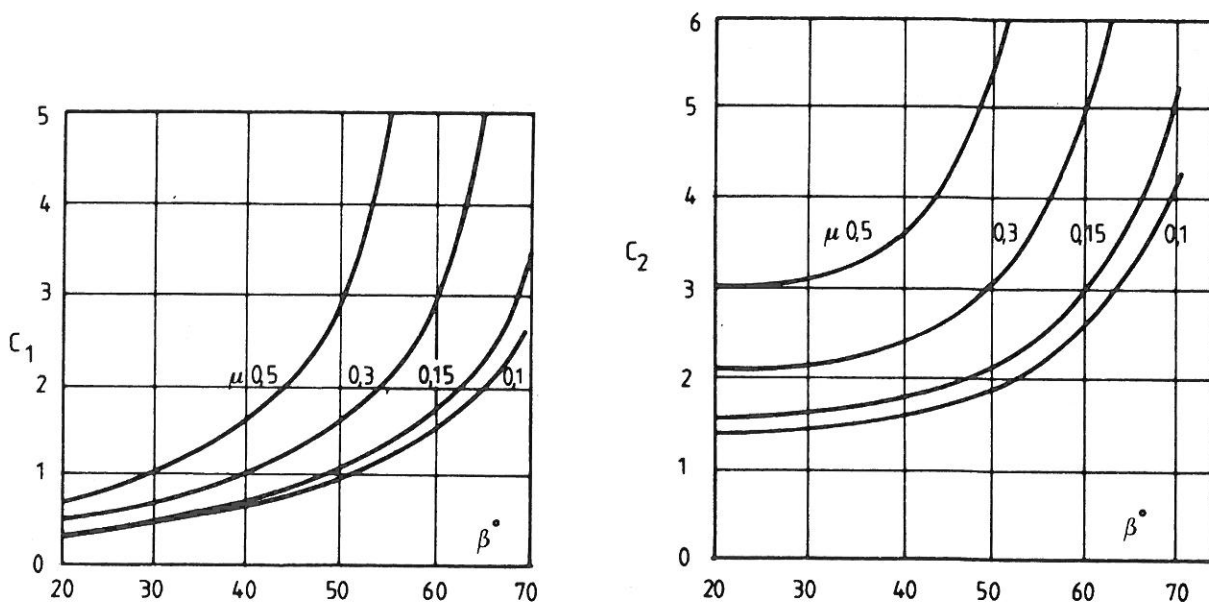
Kun P lisätään tasapainoyhtälöihin, saadaan kokonaisvoimalle lauseke

$$\begin{aligned} \frac{H}{b} = & 0,68 \sigma_f \left(\frac{\rho_v \cdot gh^5}{E} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\sin\beta + \mu\cos\beta}{\cos\beta - \mu\sin\beta} \right) \\ & + Zh \cdot \rho_j \cdot g \left[\frac{(\sin\beta + \mu\cos\beta)^2}{\cos\beta - \mu\sin\beta} + \frac{\sin\beta + \mu\cos\beta}{\tan\beta} \right] , \end{aligned} \quad (28)$$

joka voidaan yksinkertaistaa muotoon

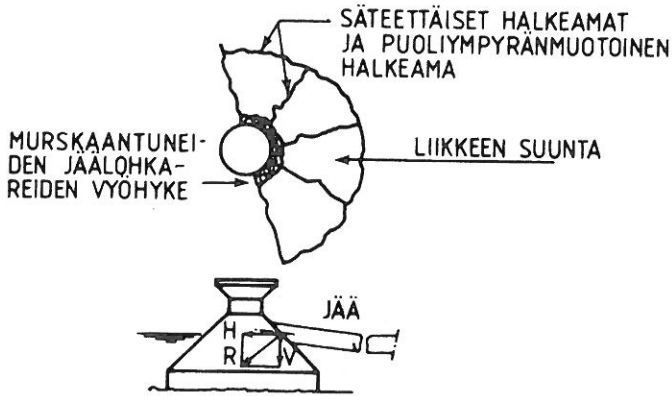
$$\frac{H}{b} = \sigma_f \cdot \left(\frac{\rho_v \cdot gh^5}{E} \right)^{1/4} \cdot c_1 + Zh \cdot \rho_j \cdot g \cdot c_2 \quad (29)$$

Kertoimet c_1 ja c_2 yleisimmillä kitkakertoimen ja kaltevuuskulman arvoilla on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Kertoimet c_1 ja c_2 .

Jään murtuessa kartiomaista rakennetta vastaan syntyy pystyvoiman vaikutuksesta säteittäisiä halkeamia jääkentän jakaantuessa kielekkeiksi rakenteen läheisyydessä (kuva 10). Säteettäisten halkeamien jälkeen syntyy kielekkeitä taivutettaessa rengasmaisen halkeama.



Kuva 10. Jääkuoren taivutusmurto.

Yhden jääkielekkeen dimensioton murtokuorma noudattaa Nevelin /12/ mukaan yhtälöä

$$\frac{6V_k}{b_o \sigma_f h^2} = 1,10 + 2,40 \left(\frac{a}{L_p}\right) - 1,10 \left(\frac{a}{L_p}\right)^3 ; \quad \frac{a}{L_p} \leq 1 \quad (30)$$

missä a on vesiviivapinnan säde ja b_o vakio, joka määrittelee kielekkeen leveyden yhtälöstä

$$b = b_o x , \quad (31)$$

missä x on etäisyys kielekkeen kärjestä.

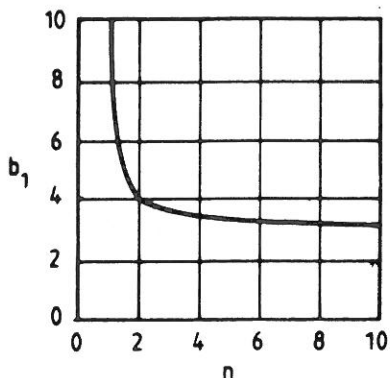
Vaakavoiman vaikutus puristus- ja taivutusjännityksiin on merkittävä vasta suurilla kaltevuuskulman arvoilla. Jos kielekkeiden oletetaan murtuvan samanaikaisesti, dimensioton kokonaispystyvoima on

$$\frac{6V}{b_1 \sigma_f h^2} = M , \quad (32)$$

missä M on yhtälön (30) oikea puoli ja b_1 on n :lle kielekkeelle

$$b_1 = 2n \tan\left(\frac{\pi}{2n}\right) . \quad (33)$$

Koska kielekkeitä syntyy ainakin 3 - 4 kappaletta, b_1 :lle saadaan tällöin kuvasta 11 arvo 3,4. Kokonaispystyvoimaksi tulee



Kuva 11. Kokonaisvertikaalivoiman kertoimen b_1 riippuvuus syntyvien samanlevyisten kielekkeiden lukumäärästä.

$$V = \left[0,62 + 1,36 \frac{a}{L_p} - 0,06 \left(\frac{a}{L_p} \right)^3 \right] h^2 \sigma_f \quad (34)$$

ja vastaava vaakavoima saadaan kertomalla V:n lauseke $2\xi/\pi$:llä, jolloin sen lausekkeeksi tulee

$$H = \left[0,40 + 0,87 \frac{a}{L_p} - 0,04 \left(\frac{a}{L_p} \right)^3 \right] \xi h^2 \sigma_f \quad (35)$$

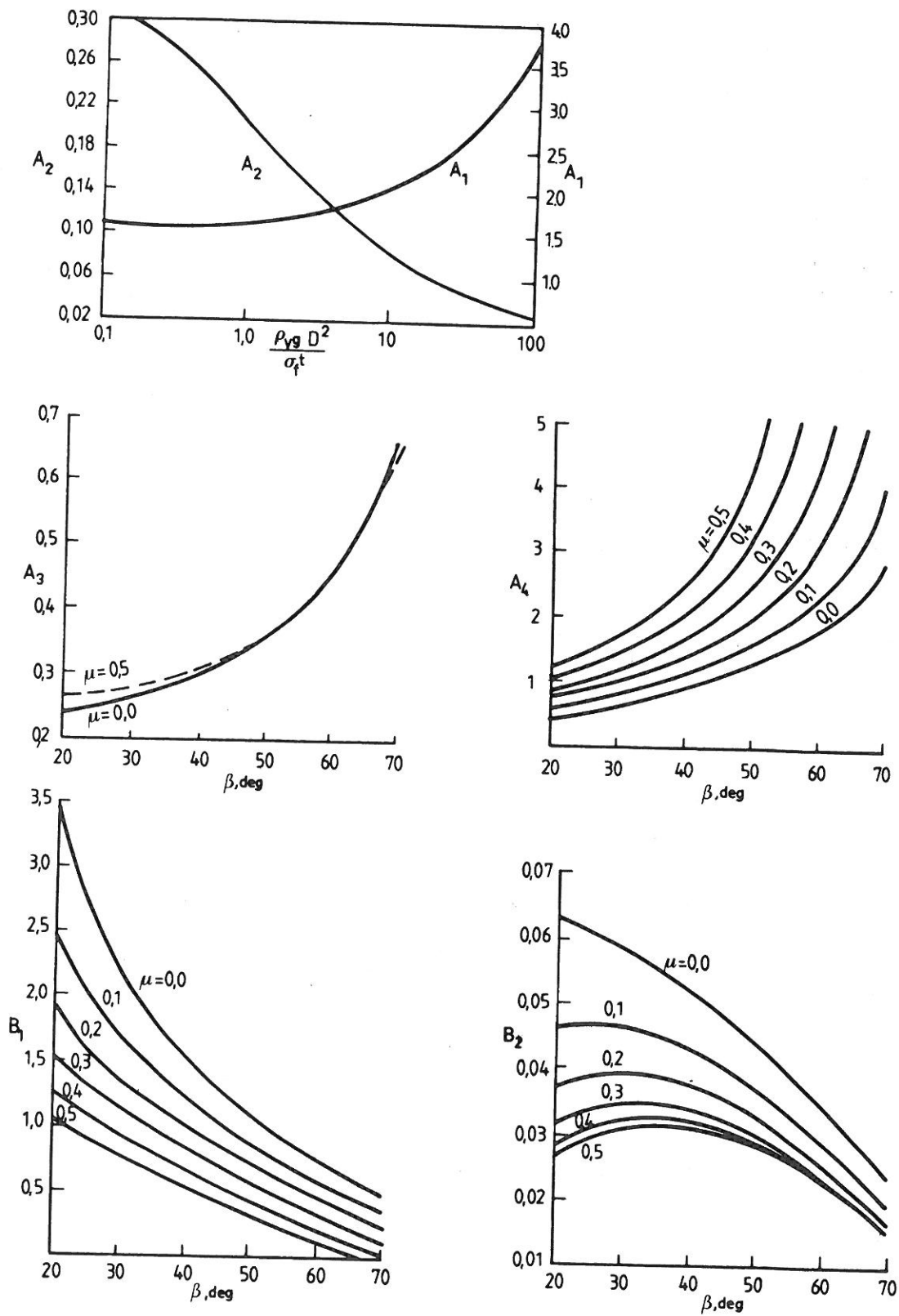
Ralston /13/ on määrittänyt kartiomaiseen rakenteeseen kohdistuvan jääkentän aiheuttamat voimakomponentit plastisuusteorian perusteella. Ylärajalauseetta käyttäen saadaan matemaattinen malli sekä jään murtumiselle että sen nousemiselle ylös kartion pintaa pitkin. Jään otaksutaan noudattavan Trescan myötöehtoa ja alustan käyttäytyvän kimmoplastisesti.

Tulokset voidaan esittää muodossa

$$H = \left[A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_v ghD^2 + A_3 \rho_v gh(D^2 - D_T^2) \right] A_4 \quad (36)$$

$$V = B_1 \cdot H + B_2 \rho_v gh(D^2 - D_T^2) \quad (37)$$

missä D on kartion läpimitta vedenpinnan tasossa ja D_T vastaavasti kartion huipussa. Kertoimet A_1 ja A_2 ovat lausekkeen $\rho_v g D^2 / \sigma_f h$ funktioita, ja A_3 , A_4 , B_1 ja B_2 puolestaan riippuvat kaltevuuskulmasta β ja kitkakertoimesta μ (kuva 12).



Kuva 12. Plastisuusteoriaan perustuvalla tarkastelulla saadut vaaka- ja pystyvoimien kertoimet.

PYSTYSUORAT JÄÄKUORMAT

Veden korkeuden vaihdellessa sen pinnalla kelluva jää liikkuu mukana ja aiheuttaa pystyvoimia rakenteisiin, jotka ovat jäässä kiinni ja estävät jään liikkeitä. Pystyvoimia arvioitaessa tarkastelu on saman tapainen kuin taivutusmurron tapauksessa kaltevaa tasoa vastaan. Jännitysten tultua riittävän suuriksi jäälaatatassa syntyy ympyräsymmetrisessä tapauksessa ensin ympyrähalkeama rakenteen lähelle ja säteettäisiä halkeamia. Pieni ympyrähalkeama pystyy yleensä vielä välittämään leikkausvoimia, jolloin kuorma kasvaa edelleen, kunnes kauemmas rakenteesta syntyy suurempia ympyrähalkeamia ja jäälaatan murtomekanismi on valmis. Joskus jään leikkauslujuus tai jään ja rakenteen välinen tartuntalujuus saattaa rajoittaa suurimman pystyvoiman syntymistä.

Suurin syntyvä voima yksittäistä rakennetta vastaan on Wortleyn /5/ mukaan

$$P = \pi \sigma_f h^2 \left(\frac{a}{L_p} \right) \left[\frac{[kei'(a/L_p)]^2 + [ker'(a/L_p)]^2}{kei(a/L_p)kei'(a/L_p) + ker(a/L_p)ker'(a/L_p)} \right], \quad (38)$$

missä a on sylinterimäisen rakenteen säde ja kei ja ker ovat Besselin funktioita. Jään taivutuslujuuden ja kimmomodulin sekä muiden lujuusominaisuuksien arvot riippuvat siitä, kuinka nopeasti ja kuinka paljon vedenpinta nousee tai laskee.

Seinämaistä rakennetta vastaan aiheutuu puoliäärettömästä jäälaatatassa paine p , joka lähteen /5/ mukaan on

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}} K L_p w, \quad (39)$$

missä w on jäälaatan taipuma.

Em. tapaukset ovat yksinkertaisia ja käytännön olosuhteissa tällaisia yksittäisiä rakenteita esiintyy harvoin. Parhaiten voiman saa arvioitua käyttämällä elementtimenetelmää murtomekanismin määrittämiseen.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Rakenteiden jääkuormien tarkka määrittäminen laskennallisesti on mahdotonta, sillä yhtenäisessäkin jääkentässä jään ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti. Joissakin tapauksissa saattaa riittää yksinkertainen menetelmä, jossa käytetään vakiokertoimia mm. jään ominaisuuksien huomioon ottamiseksi. Tällöin kertoimet ja lujuusarvot on valittava paikallisiin olosuhteisiin nähdessä riittävän suuriksi, jotta haluttu varmuus saavutettaisiin.

Paikalliset olosuhteet vaikuttavat paljon jään lujuusominaisuuksiin, koska ilmasto-olosuhteet (lämpötila, auringon säteily, tuuli, veden virtaus,

aallot ja lumi) vaihtelevat. Lisäksi on otettava huomioon, että kaavat koskevat yleensä yksittäistä rakennetta. Käytännön ongelmissa tarkastelukohteen saattaa olla rakenneryhmä, jossa osien keskinäinen vuorovaikutus tulee ottaa mukaan. Rakenteiden kuormitusohjeissa (RIL 144 - 1982) on siltapilarieihin kohdistuvan virran suuntaisen jääkuorman määrittämisessä otettu huomioon myös viereisten pilareiden etäisyys. Ohjeisiin hyväksytty kaava on yhteispohjoismaisen siltojen kuormitusmääräyksiä kehittäneen komitean ehdotuksen mukainen.

Teoriassa on mahdollista kehittää menetelmä, johon kaikki vaikuttavat tekijät sisältyvät parametreina. Parametrien muuttaminen ja suurimman arvon hakeminen käyvät nopeasti tietokoneella, mutta tästä huolimatta tulokset ovat epäluotettavia, koska jään murtomekanismi riippuu paitsi rakenteesta myös jään ominaisuuksista ja ulkoisista tekijöistä.

Jääkuormien tutkimuksessa on oleellista hallita jään ominaisuudet, mm. lujuusominaisuudet, kiderakenne ja suolapitoisuus. Esim. jään tartunta rakenteeseen riippuu rakennemateriaalin lisäksi jään omista ominaisuuksista. Tutkimustavoitteita voisivat olla jään ominaisuuksien yksiselitteinen määrittäminen ja jääkuorman riippuvuus näistä ominaisuuksista. Toinen tärkeä tutkimuskohde olisi selvittää esim. mallikokeiden avulla murtomekanismit jääkentän murtuessa eri tyyppisiä rakenteita tai rakenneryhmiä vastaan.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Michel, B., Ice Mechanics, Les Presses De L'Universite' Laval, Quebec 1978, 499 s.
- [2] Bergdahl, L., Thermal Ice Pressure in Lake Ice Covers, Chalmers University of Technology, Department of Hydraulics, Report Series A:2, 1978, 164 s.
- [3] Karri, J., Kiinteiden rakenteiden jääkuormat, VTT:n järjestämä Symposium Arktinen tekniikka, osa 1, Rakentaminen, Espoo 1981.
- [4] Joensuu, A., Arktisille merialueille soveltuvat öljyn- ja kaasunporaus-
tasanteet, TKK, Koneinsinööriosasto, Diplomityö 1981, 97 s.
- [5] Eranti, E., Lee, G.C., Introduction to Ice Problems in Civil Engineering, State University of New York, Buffalo, June 1981.
- [6] Korzhavin, K.N., Action of Ice on Engineering Structures (1962), U.S. Army CRREL, Hanover, N.H. Draft Translation 260.
- [7] Iyer, S.H., Existing Ice Codes and Suggested Criteria, IAHR Symposium on Ice Problems, Luleå 1978, Part 1, ss. 363-377.
- [8] RIL144-1982, Rakenteiden kuormitusohjeet, Helsinki 1982, ss. 55-63.
- [9] Tryde, P., Intermittent Ice Forces Acting on Inclined Wedges, CRREL Report 77-26.

- [10] Sodhi, D.S., Hamza, H.E., Buckling Analysis of a Semi-infinite Ice Sheet, Proceedings the 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Newfoundland 1977, Vol. 1, ss. 593-604.
- [11] Sodhi, D.S., Buckling Analysis of Wedge Shaped Floating Ice Sheets, Proceedings the 5th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Trondheim 1979, Vol. 1, ss. 797-810.
- [12] Carstens, T. (editor), Special Report 80-26, June 1980, Working Group on Ice Forces on Structures, IAHR, Julkaisija: CRREL, Hanover, N.H.
- [13] Ralston, T.D., Ice Force Design Considerations for Conical Offshore Structures, Proceedings the 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Newfoundland 1977, Vol. 2, ss. 741-752.

Eila Lehmus, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennetekniikan laboratorio