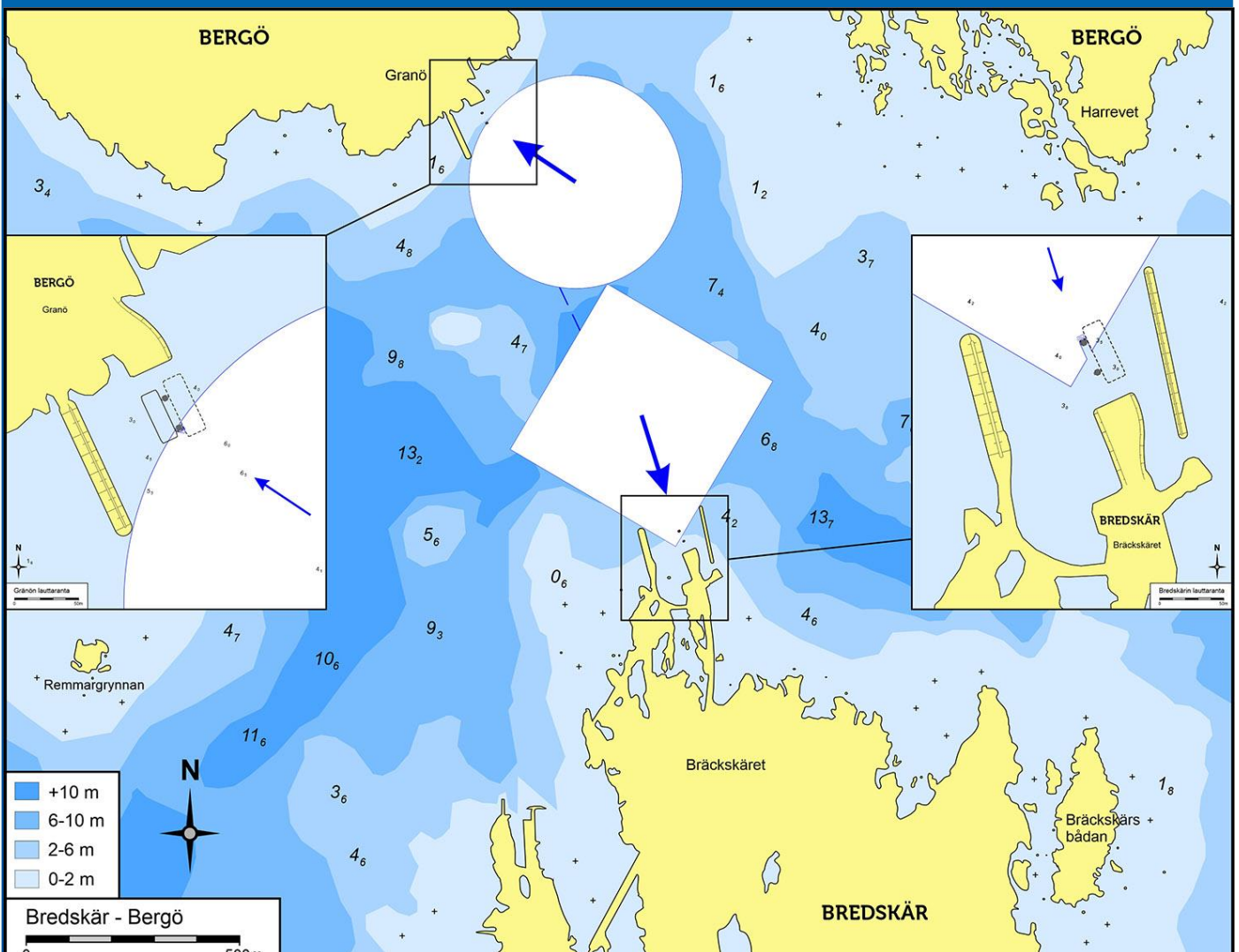




Väylävirasto  
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu  
86/2023

# Sisävesi- ja rannikkorakenteiden jääkuormat





Esa Eranti

# **Sisävesi- ja rannikkorakenteiden jääkuormat**

Väyläviraston julkaisuja 86/2023

Väylävirasto  
Helsinki 2023

*Kannen kuva: Vis Graphics*

Verkkójulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-405-132-3

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

puh. 0295 343 000

**Esa Eranti: Sisävesi- ja rannikkorakenteiden jääkuormat.** Väylävirasto Helsinki 2023. Väyläviraston julkaisuja 86/2023. 80 sivua ja 6 liitettä. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-132-3.

**Avainsanat:** jää, jääkuormitus, jääolosuhteet, ominaisuudet, sillat, rakenteet, skenaariot, vesirakennus

## Tiivistelmä

Siltarakenteiden mitoitusjääkuormia koskevia ohjeita on sovellettu vuosikymmeniä tavanomaisten siltojen sekä myös sisävesi- ja rannikkorakenteiden suunnitteluun. Ohjeissa on kuitenkin paikallisiin olosuhteisiin ja rakenteen muotoiluun liittyvää liikkumavaraa. Tässä selvityksessä pureudutaan siihen, miten tietoa paikallisista olosuhteista voidaan käyttää yhdessä modernin jäämekaniikan periaatteiden kanssa sisävesi- ja rannikkorakenteiden suunnitteluun ja realististen jääkuormien määrittämiseen.

Selvityksen aluksi käydään läpi perusasioita jäästä. Näitä ovat jään ominaisuudet, paikalliset jääolosuhteet ja ne mekanismit, jotka synnyttävät jääkuorman. Myös ilmastonmuutosta ja sen vaikutusta jääolosuhteisiin ja jääkuormiin käsitellään.

Rakennesuunnittelussa ollaan kiinnostuneita ääritilanteista. Jään lujuuteen perustuvia jääkuormia erityyppisiä rakenteita vasten käydään läpi mitoituskaavojen ja käytännön kokemusten valossa. Jään maksimipaksuus ja -lujuus eivät kuitenkaan yleensä määrää sisävesi- tai rannikkorakenteiden mitoitusjääkuormaa. Jään sulamisaste, ajovoima ja/tai liike-energia ovat usein jään lujuuteen perustuvaa mitoitusjääkuormaa rajoittavia tekijä. Modernissa jäämekaniikassa jääkuormia lähestytäänkin erilaisten kuormituskenaarioiden kautta.

Siltojen ja muiden sisävesi- ja rannikkorakenteiden jääkuormamitoitusta käydään läpi lukuisten käytännön esimerkkien valossa, jotka koskevat muun muassa Hailuodon kiinteää yhteyttä ja lounaissaariston yhteysaluslaitureita. Näissä esimerkitapauksissa paneudutaan paikallisiin jääolosuhteisiin ja johdetaan suunnittelukuormia harvinaisten jääkuormituskenaarioiden pohjalta.

Paikalliset olosuhteet huomioiva ja kuormituskenaarioita hyödyntävä lähestymistapa johtaa usein standardilähestymistapaa edullisempiin rakenteisiin. Vaativissa olosuhteissa ei näin kuitenkaan välttämättä ole. Näissä kustannusten hallintamahdollisuudet liittyvät rakenteiden muotoiluun ja eri kuormitusten rationaaliseen yhdistelemiseen.

**Esa Eranti: Islaster på inlandsvatten- och kuststrukturer.** Trafikledsverket. Helsingfors 2023. Trafikledsverkets publikationer 86/2023. 80 sidor och 6 bilagor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-132-3.

## Sammanfattning

Instruktionerna för dimensionering av islaster för brokonstruktioner har tillämpats i decennier för design av konventionella broar samt insjövatten och kustnära strukturer. I instruktionerna finns det dock spelrum som rör lokala förhållanden och konstruktionens utformning. Denna rapport undersöker hur kunskap om lokala förhållanden kan användas tillsammans med den moderna ismekanikens principer för att designa insjö- och kuststrukturer och bestämma realistiska islaster.

I början av undersökningen kommer vi att gå igenom grundläggande frågor om is. Dessa inkluderar isegenskaper, lokala isförhållanden och de mekanismer som genererar isbelastningen. Klimatförändringen och dess effekt på isförhållanden och islaster diskuteras också.

Inom konstruktionsdesign är vi intresserade av extrema situationer. Islaster baserade på isstyrka mot olika typer av konstruktioner ses över mot bakgrund av isbelastningsformler och praktiska erfarenheter. Den maximala istjockleken och -styrkan bestämmer dock vanligtvis inte den dimensionerande islasten för insjövatten- eller kuststrukturer. Graden av issmältning, drivkraft och/eller kinetisk energi är ofta begränsande faktorer för den designade islasten baserad på isstyrkan. Inom modern ismekanik närmar man sig islaster genom olika lastscenarier.

Islastdimensioneringen av broar och andra inlandsvatten- och kuststrukturer ses över mot bakgrund av ett flertal praktiska exempel beträffande till exempel Hailuoto fast förbindelse och förbindelsebryggor i sydvästra skärgården. Dessa fokuserar på lokala isförhållanden och härleder designlaster baserade på sällsynta islastscenarier.

Ett tillvägagångssätt som tar hänsyn till lokala förhållanden och utnyttjar belastningsscenarier leder ofta till mer ekonomiska strukturer än standardmetoden. Under krävande förhållanden är detta dock inte nödvändigtvis fallet. I dessa är kostnadsanvändningsmöjligheterna relaterade till utformningen av strukturer och den rationella kombinationen av olika laster.

**Esa Eranti: Ice loads on inland water and coastal structures.** Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2023. Publications of the FTIA 86/2023. 80 pages and 6 appendices. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-132-3.

## Abstract

Finnish ice loading guidelines for bridges have been used several decades for the design of ordinary bridges but also other coastal and inland water structures. However, the guidelines include consideration for ice local conditions and structural shape. This report explains how information on local conditions and modern ice engineering principles can be used for the design of hydraulic structures and defining realistic design ice loads.

In the beginning of the report some fundamentals of ice are reviewed. These include ice properties, local ice conditions and driving forces behind ice loads. Climate change and its influence on local ice conditions and ice loads are discussed.

In structural design we consider extreme events. Strength based maximum ice loads on different kind of structures are analyzed in context of loading formulas and practical experience. However, maximum ice thickness and ice strength do not generally define design ice load for coastal and inland water structures. The degree of ice melting, limited driving force and/or limited kinetic energy often restrain the design ice load. Ice loading scenarios are used in modern ice mechanics to get a better understanding of realistic ice loads.

Design ice loads on bridge piers and other coastal and inland water structures are derived in a number of practical examples. These include the Hailuoto fixed connection and some access vessel docks in the Finnish southwestern archipelago. Local ice conditions are considered and design ice loads derived based on rare loading scenarios.

The approach considering local ice conditions and loading scenarios generally leads to more economic structures than the standard approach. In difficult conditions this is not necessarily the case. Here cost saving opportunities lie in shaping the structures and combining ice loads with other short-term loads in a rational manner.

## Esipuhe

Silta- ja rantarakenteisiin kohdistuvien jääkuormien määrittäminen on havaittu viime vuosina monessa Väyläviraston hankkeessa haastavaksi tehtäväksi. On tiedostettu, että olemassa oleva ohjeistus soveltuu lähinnä vapaasti virtaavissa joissa oleville rakenteille, joskin hankekohtainen harkinta on ollut sallittua. Sillan tai muun taitorakenteen suunnittelijalla ei monesti ole sellaista osaamista, joka auttaisi tapauskohtaisten jääkuormien määrittelyssä paikalliset olosuhteet huomioiden.

Näistä lähtökohdista päätettiin laatia selvitys, joka sisältää taustatietoa ja teoriaa jääkuormista sekä esimerkkitapauksia jääkuormien määrittämisestä erilaisissa ympäristöissä. Haluttiin myös analysoida nykyisen ohjeistuksen taustoja, jotta voitaisiin paremmin ymmärtää niiden soveltuvuutta erilaisiin ympäristöihin. Tulee kuitenkin huomata, että kyseessä ei ole velvoittava ohje, vaan taustatietoa tarjoava selvitys.

Siltojen ja muiden sisävesi- ja rannikorakenteiden jääkuormamitoitusta käydään läpi lukuisten käytännön esimerkkien valossa, jotka koskevat muun muassa Hailuodon kiinteää yhteyttä ja lounaissaariston yhteysaluslaitureita. Näissä esimerkkitapauksissa paneudutaan paikallisiin jääolosuhteisiin ja johdetaan suunnittelukuormia harvinaisten jääkuormituskenaarioiden pohjalta.

Selvityksen on laatinut TKT Esa Eranti Eranti Engineering Oy:stä, jolla on vuosikymmenten kokemus aiheesta. Selvityksen kuvituksesta on vastannut Pietari Visanti (Vis Graphicsis). Selvityksen laatimista ovat ohjanneet Mikko Peltomaa, Jari Nikki ja Heikki Lilja Väylävirastosta.

Helsingissä joulukuussa 2023

Väylävirasto  
Taitorakenneyksikkö



## Sisältö

1	JOHDANTO.....	8
2	PERUSASIOITA JÄÄSTÄ .....	9
2.1	Jään muodostus, kasvu ja lähtö.....	9
2.2	Jään lujuusominaisuuksia.....	13
2.3	Jään muita ominaisuuksia .....	14
2.4	Paikalliset jääolosuhteet ja kuinka ne ovat muuttumassa ilmaston muutoksen seurauksena .....	15
2.5	Muut hydrometeorologiset olosuhteet .....	16
2.6	Jääkuorman kehittyminen .....	17
2.7	Mitoitusjääkuorma.....	20
3	MAKSIMIJÄÄKUORMAT .....	22
3.1	Jään pystykuormat .....	22
3.2	Jään virumiskuorma .....	22
3.3	Dynaaminen jääkuorma pystysuoraa rakennetta vasten.....	24
3.4	Dynaaminen jääkuorma loivasti kallistettuja rakenteita vasten.....	29
3.5	Dynaaminen jääkuorma voimakkaasti kallistettuja ja kartiomaisia rakenteita vasten .....	30
3.6	Jään murtuminen penkereitä tai aallonmurtajia vasten .....	35
4	SILTAPILARIEN JÄÄKUORMAT .....	38
4.1	Paikallisten olosuhteiden selvittäminen.....	38
4.2	Tornionjoen rautatiesilta .....	38
4.3	Kirjalansalmen silta .....	49
4.4	Hailuodon kiinteä yhteys, Huikun silta .....	55
4.5	Jää ja Suomen siltakuormitusohjeet.....	64
5	MUIDEN VESIRAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT .....	66
5.1	Penkereiden ja aallonmurtajien jääkuormat .....	66
5.2	Laiturien jääkuormat .....	69
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	78
	LÄHDELUETTELO.....	79

## LIITTEET

Liite 1	Liikenneviraston ohjeita 24/2017, Siltojen jääkuormat
Liite 2	Veden korkeuden kuukausijakautuma, mareografi Oulu
Liite 3	Tuuli, Korsnäs Moikipää
Liite 4	Jääkartat lounaissaaristo
Liite 5	Tuulen nopeudet asemilla Hailuto Marjanemi ja Oulun lentoasema
Liite 6	Erilaisten jäätalvien kehitys Hailuodon alueella

# 1 Johdanto

Siltarakenteiden mitoitussääkuormia koskevat ohjeet ovat olleet käytössä suurin piirtein samanlaisina vuosikymmeniä (liite 1). Niissä annetaan tavallisissa olosuhteissa terminen jääkuorma  $P_1$  virran paineesta aiheutuva jääkuorma  $P_2$  sekä liikuvan jään alueella jään murtokuorma  $P_3$ . Ne ovat toimineet kohtalaisen hyvin, koska vakavilta vaurioilta on välttytty. Ohjeita on sovellettu myös muiden sisävesi- ja rannikkorakenteiden suunnitteluun.

Ohjeissa on kuitenkin paikallisiin olosuhteisiin ja rakenteen muotoiluun liittyvää liikkumavaraa.

Tässä selvityksessä pureudutaan siihen, miten tietoa paikallisista olosuhteista voidaan käyttää yhdessä modernin jäämekaniikan periaatteiden kanssa sisävesi- ja rannikkorakenteiden suunnitteluun ja realististen mitoitussääkuormien määrittämiseen. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi siltojen alusrakenteet, kiinteät laiturit, kelluvat rakenteet, penkereet, aallonmurtajat, johteet ja tihtaalit.

Kansikuvassa nähdään yhteysaluslaiturien jääkuormitusskenaarioita. Sisävesillä ja saaristossa liikkuu harvoin vahvoja jäälauttoja, joiden liike-energia tai ajovoima on suuri. On usein vielä harvinaisempaa tai lähes mahdotonta osua tällaisella jäälautalla rantarakenteeseen, koska esteen kohdatessaan pienet jäälautat pysähtyvät nopeasti.

Tämä selvitys ei kata avomerirakenteiden jääkuormamitoitusta.

## 2 Perusasioita jäädästä

### 2.1 Jään muodostus, kasvu ja lähtö

Matalissa lahdissa ja pienissä järvissä jään muodostus alkaa pian ilman lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle. Virtapaikoissa ja avarampien vesimassojen äärellä pintaveden pitää ensin jäähtyä jäätympisteeseen. Sen jälkeen vesimassaan muodostuu ensin jääkiteitä, sohjoa ja pieniä ohuita jäälauttoja. Normaalin pylväskiteisen teräsjään paksuuskasvu lähtee tästä.

Teräsjää kasvaa alaspäin lumipeitteen ja jääkuoren toimiessa paksuuskasvua hidastavana eristeenä. Jään paksuuskasvua voidaan arvioida kaavalla

$$h = \alpha (\sum F)^{0.5} \quad (1)$$

$h$  = jään paksuus (cm)

$\alpha$  = kerroin, jonka suuruus on 2–3 riippuen lähinnä jään päällä olevan lumikerroksen paksuudesta

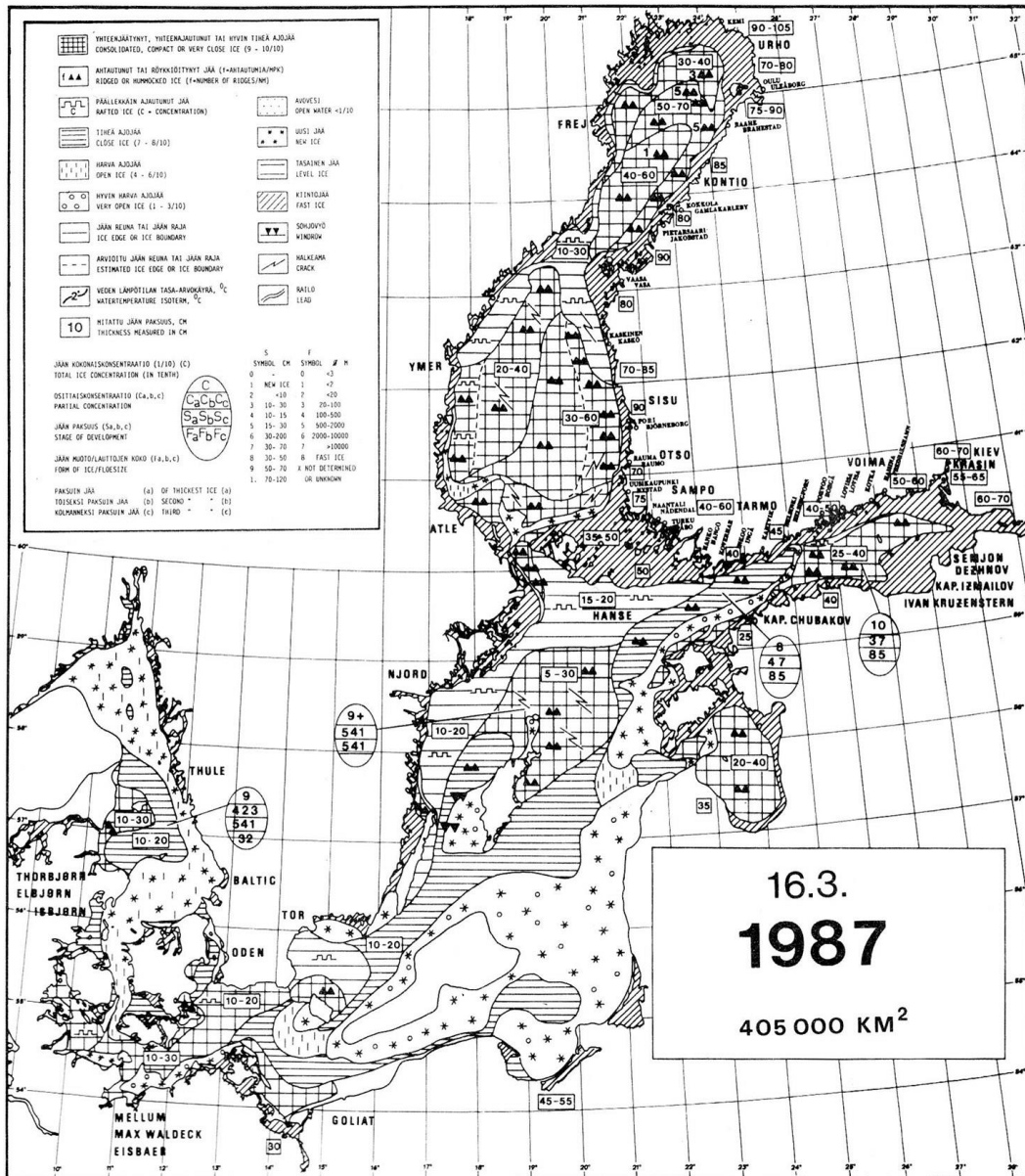
$\sum F$  = jään muodostuksen jälkeen kertynyt pakkasmäärä Celsiusastevuorokausina.

Pakkasmääriä on kartoitettu routatutkimusten yhteydessä, mutta ilmaston viimeaikaiset muutokset on syytä ottaa huomioon.

Staattista teräsjään kasvua nopeampi jäänkasvumekanismi on kohvajään muodostus (sohjon jäätyminen), kun jään päälle on lumen painon vuoksi päässyt vettä. Lumen ja jään tarjoama suojaava eristyskerros on ohut.

Mekanismi voi toimia myös toisin päin etenkin joissa, missä voimakkaasti virtaavilla avovesijaksoilla muodostuu pakkasella suppojäättä (alijäähtyneeseen veteen muodostuneita jääkiteitä), jota kertyy jääkuoren alle hitaammin virtaavilla jaksoilla. Nyt lumen ja jään tarjoama suojaava eristyskerros on paksumpi ja jään alle muodostuneen jo osin jäässä olevan suppokerroksen jäätyminen tapahtuu hitaammin.

Jään maksimipaksuuksista rannikkoalueillamme saa käsityksen kuvasta 1. Paksuusarvot sisältävät myös kohvajäätä. Kohvajään ja teräsjään (normaali pylväskiteinen kylmä jää) kombinaatio ei ole yhtä vahva kuin vastaavan paksu teräsjääkerros. Joissakin tapauksissa kohvajään lujuudeksi on arvioitu puolet teräsjään lujuudesta.

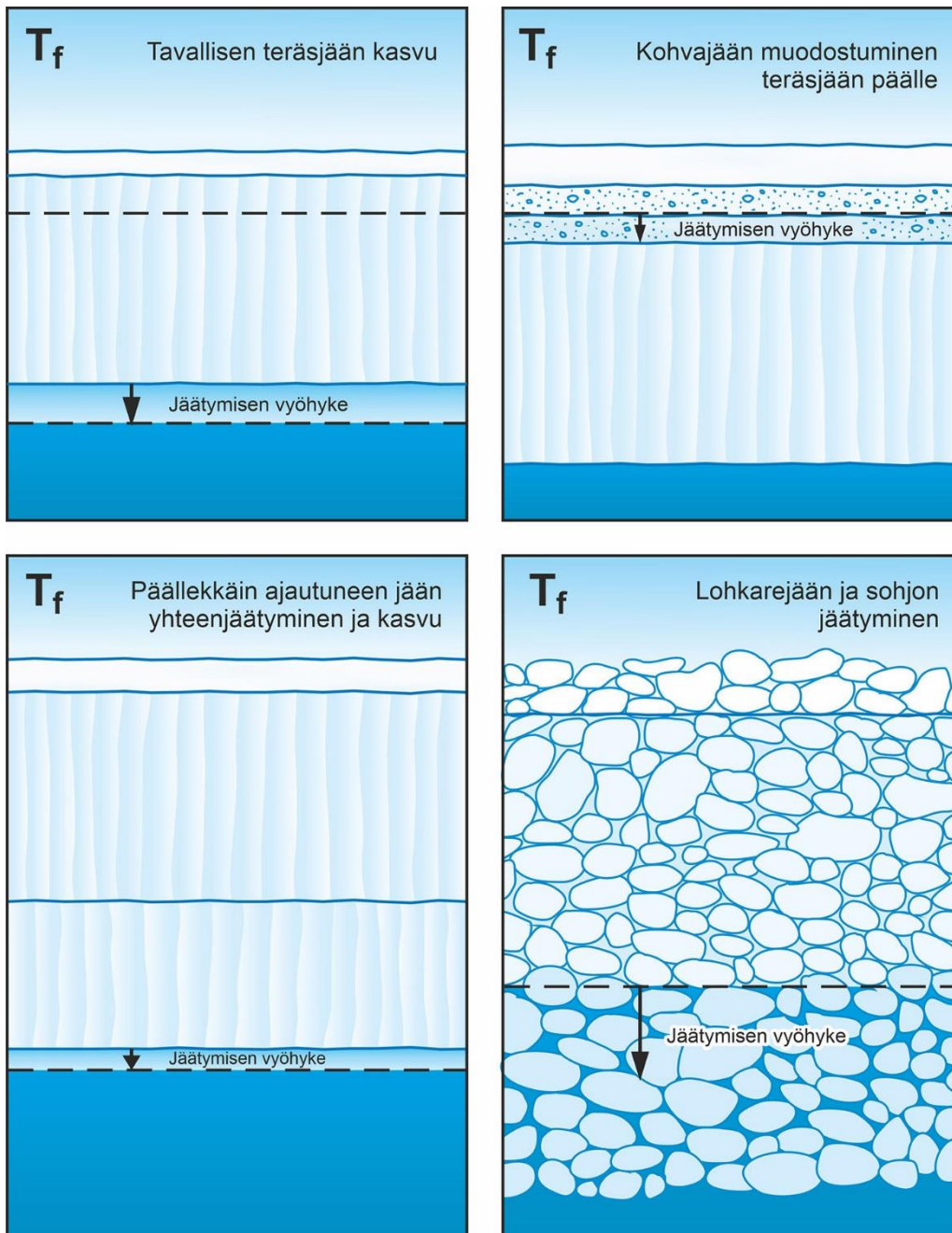


Kuva 1. Jääkartta toistaiseksi viimeiseltä erittäin ankaralta jäätalvelta 1987. Kiintojään paksuusarvot voivat sisältää myös kohvajäätä.

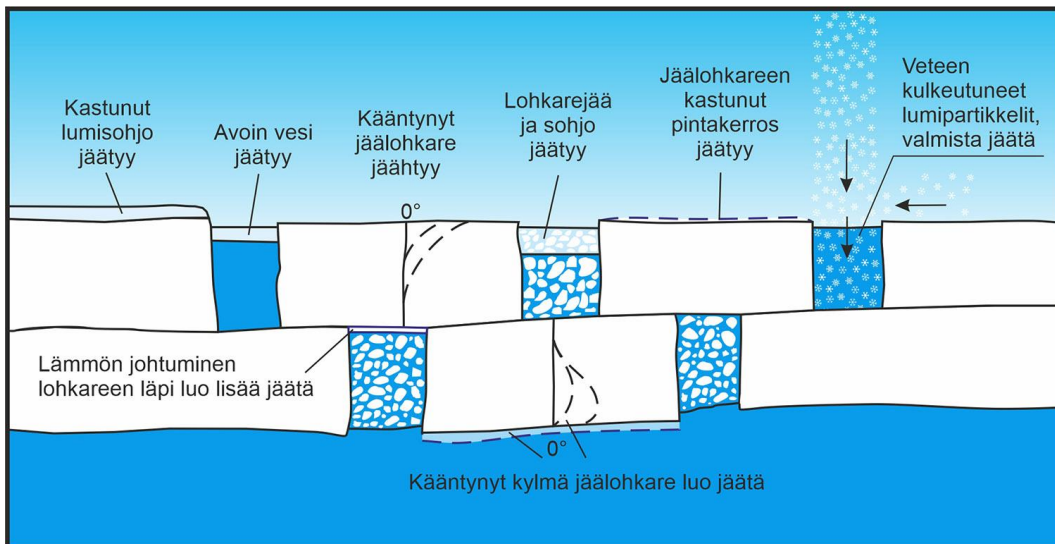
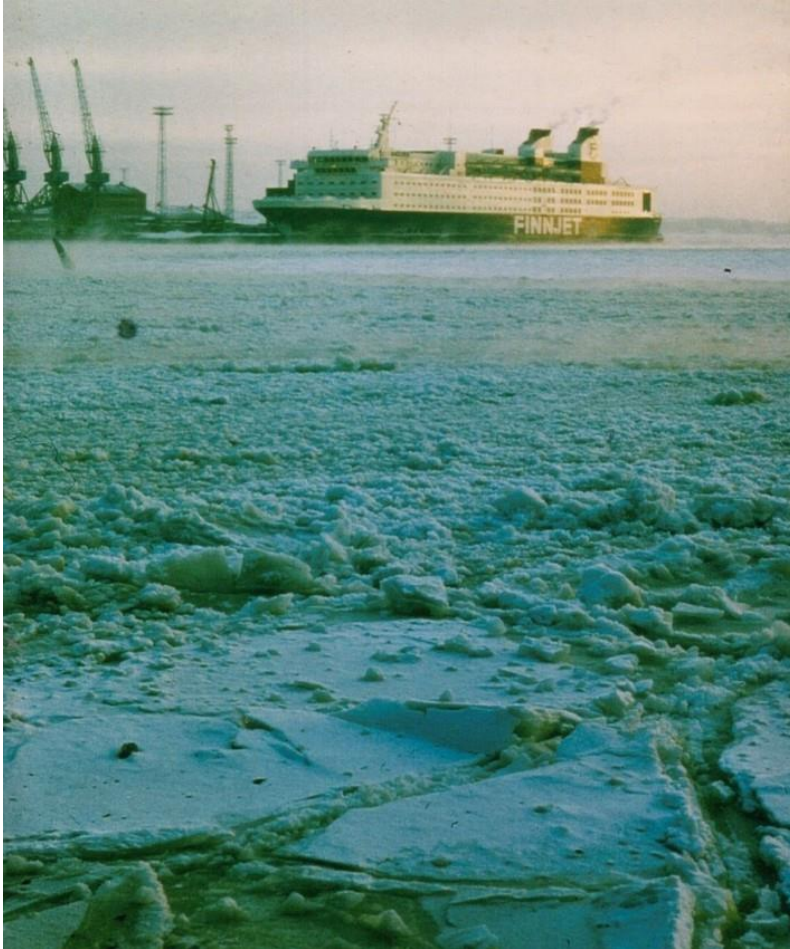
Päällekkäin ajautuneen jään jäätymistä tapahtuu sisävesillä ja rannikolla lähinnä väylillä ja satama-altaissa. Kerrokset jäätyvät nopeasti yhteen, mutta paksuuskasvu alaspäin on hidasta. Mekanismissa on rajallisesti merkitystä sisävesi ja rannikkorakenteiden mitoitusjäakuormiin.

Kun jäätä rikotaan toistuvasti, lohkarejää- ja sohjokerroksen pinnassa on runsaasti vapaata vettä ilman jään ja lumen tarjoamaa suojaa. Jäätä muodostuu pakkasella nopeasti, tiheästi murrettavalla väylällä lähes lineaarisesti pakkasumman funktiona (vertaa kaava 1). Se voi ahtautua väylän tai satama-altaan reunoille ja pakkautua laiturirakenteita vasten osittain konsolidoituneiksi jääkauluksiksi. Alusten operointi ja laituriiin ajo hankaloituu.

Jään muodostumismekanismeja on kuvattu kuvassa 2 ja lohkarajaan muodostumismekanismeja tarkemmin kuvassa 3. Näitä asioita on käsitelty perusteellisemmin lähteessä /1/.



Kuva 2. Jään paksuuskasvun mekanismeja.



*Kuva 3. Kun jäätä murretaan, murretun alueen pinnassa on runsaasti vapaata vettä. Lämpöhukan murretun alueen pinnasta voi helposti aistia kovalla pakkasella. Jään muodostus on nopeaa ja lähes lineaarista etenkin, jos jäätä murretaan tiheästi. Alakuvassa on jään muodostuksen mekanismeja lohkarejäätä. Lohkarejäätä voi pakkautua jääkauluksiksi laiturirakenteita vasten ja työntyä paksuiksi ahtaumiksi murretun alueen reunoille.*

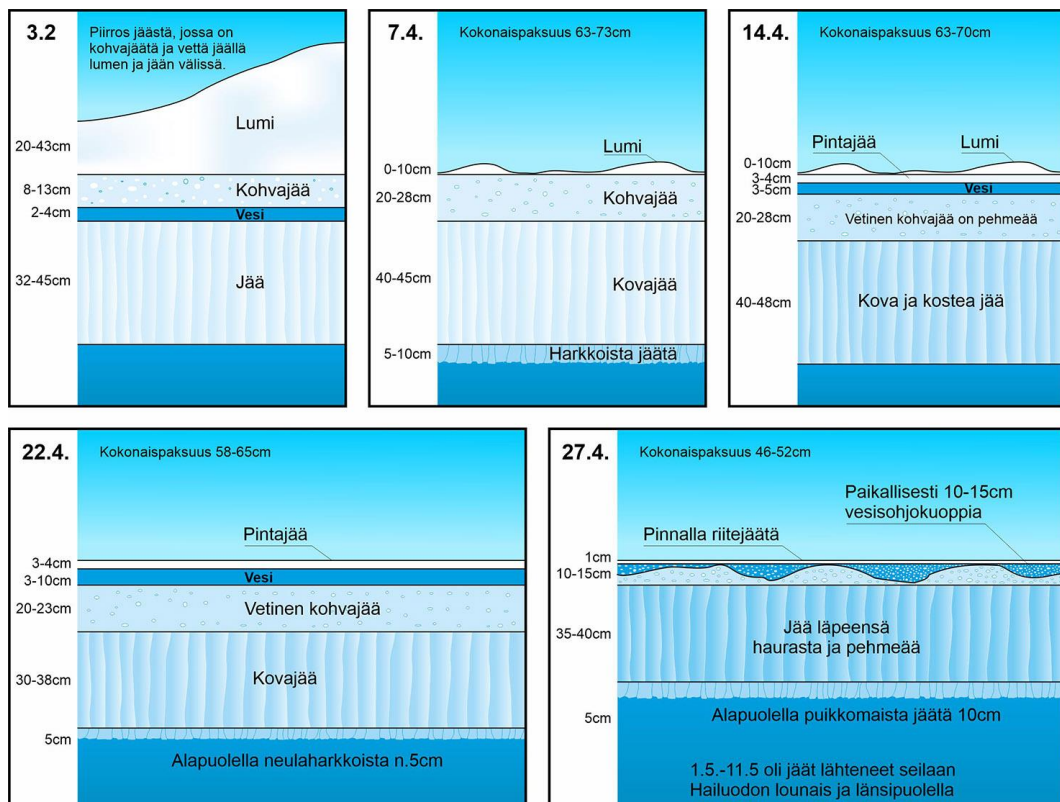
Keväällä auringon alkaessa lämmittää, jään sulaminen alkaa kohvajääkerroksesta ja teräsjään raerajoilta. Jää muuttuu ensin vetiseksi ja sulamisen edistyessä hauraksi.

Kuvassa 4 on esitetty esimerkki kiintojään haurastumisesta.

Koska pohjasedimentteihin varastoitunutta lämpöä on talven aikana vapautunut vesimassaan, veden lämpötila nousee pohjan läheisyydessä jo paljon ennen jäiden lähtöä. Joissa myös sulavedet nostavat veden lämpötilaa samalla kun ne nostavat veden korkeutta.

Jäät sulavat ensin virtapaikoista, väyliltä ja rannoilta. Saaristossa ja pienissä järissä ne sulavat usein lähes paikoilleen. Joissa, ulkosaaristossa ja suurilla järillä haurastuneet jäät voivat liikkua isoina lauttoina tuulen ja virtausten mukana ennen lopullista sulamista.

Myrsky ja siihen liittyvä vedenpinnan voimakas nousu syksyllä tai keväällä voivat edesauttaa jäiden liikkumista merialueilla. Joissa sulavesien aiheuttama vedenkorkeuden nousu irrottaa jäät rannoista edesauttaen jäiden lähtöä.



Kuva 4. Kiintojään rakenteen muuttuminen kevään 2011 edistyessä Hailuotoa ympäröivillä merialueilla Ahti Lepistön paikallishavaintojen mukaan (piirretty uudestaan skissien pohjalta).

## 2.2 Jään lujuusominaisuuksia

Jää on viskoelastinen materiaali. Sen lujuusominaisuudet riippuvat muun muassa kuormitusnopeudesta, kuormitussuunasta ja lämpötilasta. Täysmittakaavakoheet

antavat paremman kuvan jään lujuusominaisuuksista kuin pienimittakaavaiset laboratoriokeet.

Kun jää murtuu pystysuoraa rakennetta vasten, pitäisi puhua jään puristuslujuuden sijaan jään nimellisestä murtumislujudesta. Tämä johtuu siitä, että jääkapaleen yksidimensionaalinen puristusmurto ei vastaa todellista murtotapahtumaa.

Talvella tehdyissä kenttämittauskokeissa /2, 3/ jään nimelliseksi murtolujuudeksi on saatu 3–5 MPa, kun kontakti rakenteen ja jään välillä on ollut hyvä ja rakenteen halkaisija D on ollut samaa luokkaa kuin jään paksuus h.

Jatkuvassa murtotilanteessa jää murtuu vyöhykkeittäin pystysuoraa rakennetta vasten ja vyöhykkeet ovat eri vaiheessa. Tilannetta on käsitelty kontaktikertoimen avulla. Myös murtovyöhykkeen ahtaus vaikuttaa nimelliseen murtolujuuteen. Tätä kokonaisuutta on klassisessa jäämekaniikassa käsitelty sivusuhteen h/D avulla.

Jään leikkauslujuus on talvella luokkaa 0.4 MPa. Jään tartuntalujuus teräkseen tai betoniin on talvella samaa suuruusluokkaa. Myös jään leikkausmurto rakennetta vasten tapahtuu vyöhykkeittäin ja vyöhykkeet ovat eri vaiheissa.

Kun rakenteeseen kiinnijäätynyt jääkenttä lähtee liikkeelle, jään tartuntalujuuden pettäminen voi olla hetkellinen tapahtuma hyvällä kontaktilla rakenteeseen. Toki sitä edeltää halkeilu silloinkin, kun vedenkorkeuden muutos ei murra jääkentän kontaktia rakenteeseen ennen liikkeellelähtöä.

Suomalaisen merijään taivutuslujuudeksi on mitattu ulokepalkkikokeilla talvella 0.5 MPa tai vähemmän /4/.

Keväällä jäät heikentyvät jo ennen varsinaista jäiden lähtöä. Tämä vaikuttaa merkittävästi erityyppisten rakenteiden jääkuormatasoon. Myös jään liikenopeudella on merkitystä kuormatasoon.

## 2.3 Jään muita ominaisuuksia

Jääkuormalaskelmissa esiintyviä muita tekijöitä ovat jään tiheys, kimmomoduuli, kitkakerroin, lämpölaajenemiskerroin ja virumisominaisuudet. Luonnonjään tiheys on noin 900 kg/m<sup>3</sup>.

Ulokepalkkikokeissa suomalaisen luonnonjään kimmomoduuli on ollut luokkaa 5 000 MPa tai alhaisempi /4/. Nimellinen kimmomoduuli riippuu paljon paitsi jään lämpötilasta, myös kuormitusnopeudesta ja jännitysamplitudista.

Jään ja teräksen välinen kitkakerroin on murtumistilanteissa luokkaa 0.15 tai alhaisempi. Betonille kitkakerroin on luokkaa 0.2 tai alhaisempi. Jos teräs on vesirajan ympäristössä kuopparuostunut tai betoni on pakkasrasituksen rapauttamaa, hiukan korkeampi kitkakerroin voi olla perusteltu.

Kristallikirkkaan teräsjään lämpölaajenemiskerroin on  $5 - 6 \times 10^{-5} 1/C$ . Jäätymisen yhteydessä tapahtuu 9 % laajeneminen. Tällä laajenemisella on rakenteellista merkitystä silloin, kun jäätyvä vesi on suljetussa tilassa. Esimerkiksi teräspaaluja on haljennut, kun niiden sisälle jäänyt vesipussi on jäänyt.



Jään virumisominaisuudet paineen alaisena riippuvat voimakkaasti lämpötilasta. Jään keskilämpötila on talvellakin meidän olosuhteissamme yleensä vain muutama asteen pakkasen puolella, jos jään päällä on lunta. Parhaan käsityksen luonnon jään virumisesta saa ekstrapoloimalla erittäin hitaalla nopeudella suoritetuista täysmittakaavavirumiskokeista. Jään virumismalleja on esitetty lähteessä /5/.

## 2.4 Paikalliset jääolosuhteet ja kuinka ne ovat muuttumassa ilmaston muutoksen seurauksena

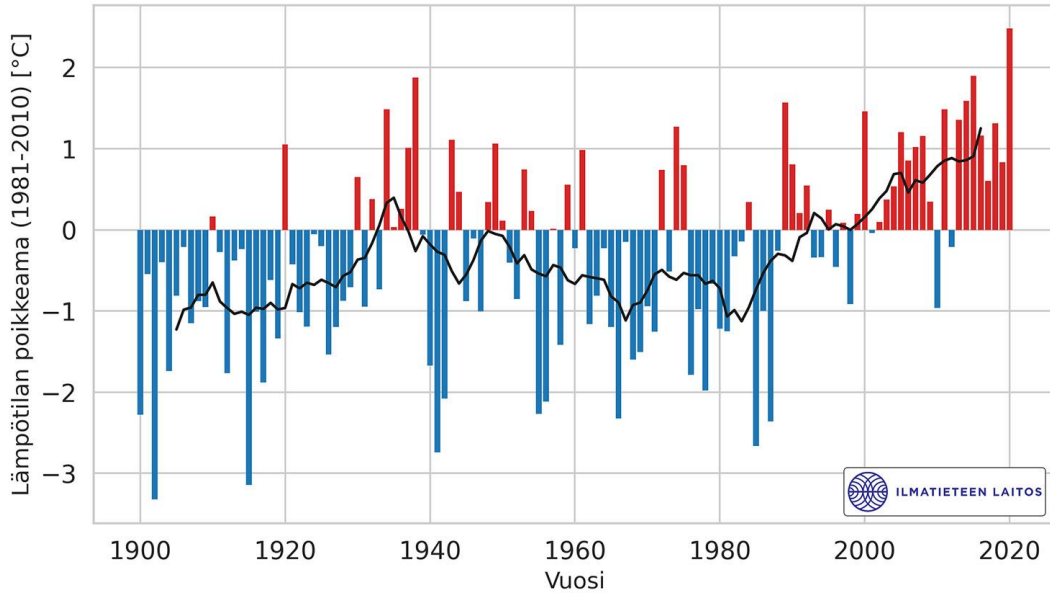
Ilmatieteen laitos (aiemmin Merentutkimuslaitos) on julkaissut Itämeren jääkarttoja, joista on näkynyt jäätilanteen kehitys rannikkoalueillamme varsin tarkasti jo 1970-luvulta lähtien. Näiden täydennykseksi Ilmatieteen laitoksen arkistossa on laaja materiaali paikallishavainnoista, joista saa käsityksen harvoin toistuvista, mutta rakenteiden mitoituksen kannalta relevanteista ääritilanteista.

VTT on julkaissut Suomen manner- ja rannikkoalueiden pakkasmäärien toistuvuuskartat /6/ perustuen vuosien 1961–1990 pakkasmääriin. Näitä voi käyttää jään maksimipaksuuksien arviointiin yhdessä paikallishavaintojen kanssa.

Suomen ilmasto on kuitenkin tästä lämmennyt (kuva 5). Lämpenemistrendi tulee todennäköisesti jatkumaan. Tämä ei ole kuitenkaan varmaa. Muutokset Golfvirrassa tai napapyyrteessä voivat pysäyttää tai jopa kääntää trendin. Myös lämpötilojen pitkän aikavälin vaihteluilla voi olla samansuuntainen vaikutus.

Jos tilastollisen tarkastelun lähtökohdaksi otetaan vuosien 1997–2022 pakkasmäärät, ollaan riittävän konservatiivisia. Käytännössä tämä tarkoittaa karkeasti sitä, että kerran 10 tai 20 vuodessa vuosina 1961–1990 esiintyneestä pakkasmäärästä onkin tullut nyt kerran sadassa vuodessa esiintynyt pakkasmäärä. Edelleen on syytä huomata, että pakkasmäärien toistuvuuskartat eivät ole olleet erityisen tarkkoja meren rannikkovyöhykkeessä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että jään esiintymisjaksosta on tullut lyhyempi, maksimijäänpaksuus on jäänyt pienemmäksi ja jäästä on tullut jonkin verran liikuvampaa kuin aiemmin.

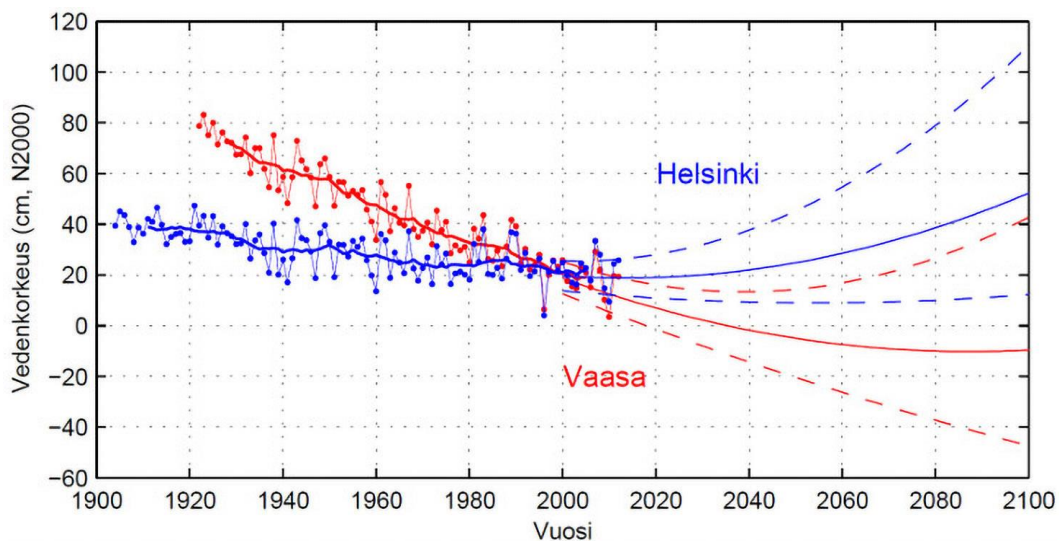


Kuva 5. Suomen keskilämpötila on noussut vuosien 1961–1990 tasosta.

## 2.5 Muut hydrometeorologiset olosuhteet

Ilmatieteen laitos ylläpitää mareografeja, joista on tuotettu vedenkorkeustaulukoita eri kuukausille (liite 2). Nähdään, että rannikkoalueilla vedenkorkeuden vaihtelut ovat suurimpia syksyllä ja alkutalvella. Keväällä jäiden lähdön aikaan vaihtelut eivät ole yhtä suuria.

Vesirakenteita suunnitellaan viideksikymmeneksi tai sadaksi vuodeksi. On syytä huomioida, että meriveden korkeus on nousussa ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, joskin maan nousu kompensoi muutosta. Kuvassa 6 on Ilmatieteen laitoksen näkemys vedenkorkeuden tulevasta verhoikäyristä Helsingissä ja Vaasassa. Paikka-kohtaisia verhoikäyriä voi laatia kuvan 7 maan nousukartan avulla.



Kuva 6. Ilmatieteen laitoksen näkemys vedenkorkeuden muutosten verhoikäyristä ilmastonmuutoksen ja maan nousun seurauksena.



Kuva 7. Maanmittauslaitoksen laatima postglasiaalinen maan nousukartta.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa monella tavalla vedenkorkeuksiin myös sisävesillä. Yhtenä tekijänä voi olla sydäntalven erittäin voimakas lämpö- ja vesisadeaalto, joka käynnistää jäiden lähdön.

Sisävesillä vesi voi olla korkealla jäiden lähdön aikaan, vaikka jäät lähtisivätkin ennen tulvahuippua. Tältä osin on turvaututtava paikallistietoon.

Virtaus on yksi tekijä jääkuormien arvioinnissa. Tässä voi turvautua paikallistunteemukseen, mallilaskelmiin ja rationaaliseen päättelyyn. Joissa mitoitusjääkuormat esiintyvät tyypillisesti virtauksen ääritilanteissa.

Toinen vaikuttava tekijä on tuuli. Jäälautta ei juuri tunne tuulenpuuskaa. Kymmenen minuutin keskituuli kymmenen metrin korkeudella on relevantimpi tekijä. Maastotyyppi vaikuttaa erittäin paljon tuulen nopeuteen [7]. Ero merituulen ja rannikotuulen välillä on dramaattinen. Syksy ja alkutalvi ovat tavallisesti tuulisempia, kuin jäiden lähdön aika keväällä (liite 3).

Mitään silmiinpistävää muutosta Suomen tuulioloissa ei ole havaittavissa, mutta muutos on mahdollinen ja siten pieni konservatiivisuus paikallaan.

## 2.6 Jääkuorman kehittyminen

Rakenteisiin voi kohdistua jääkuormia, kun jää liikkuu. Jään liikkeet voivat olla hitaita tai nopeita. Jos jään liikkeet ovat pieniä, rakenteen joustoa vastaava voima voi määrätä kuorman maksimi-arvon.

Jään murtomekanismi ja tätä vastaava jään lujuus määräävät liikkuvan jään aiheuttaman jääkuorman, edellyttäen että jään ajovoima ja/tai liike-energia ovat riittävän suuria. Pienessä jäälautassa ei ole juuri ajovoimaa eikä yleensä myöskään riittävästi liike-energiaa täysmittakaavaisen murtomekanismin aikaan saamiseksi.

Jään hitaita vaakaliikkeitä ovat lämpöliikkeet, vedenkorkeuden vaihtelun aiheuttamasta rantahalkeilumekanismista johtuva työntö (crack-jacking) sekä tuulen ja virtauksen aiheuttamat muodonmuutokset jääkentässä.

Jään lämpöliikkeet voivat olla merkittäviä jään ollessa paljasta ja ohutta. Lumipeitteen eristysvaikutus ja jään halkeilu rajoittavat termisiä jääkuormia. Merkittävien kuormien syntyminen edellyttää, että jäällä on tilaa laajeta ja jäälevy saa toiselta puolelta tukea rannasta.

Vedenkorkeuden muutoksen aiheuttama halkeamamekanismi ja siitä aiheutuva työntö on Suomessa vaurioittanut ainakin kahta laituria, joista toinen on Oulussa (kuva 8) ja toinen kivilaituri, jota ei alun perin ollut ankkuroitu. Se on erittäin tärkeä kuormitustapa arktisilla alueilla vuorovesivaikutuksen piirissä. Halkeamissa tapahtuu myötöä, mutta myös jäätymistä, jolloin syntyy jatkuva työntö.

Suomessa jäät ovat ohuita ja vedenkorkeuden muutokset tapahtuvat yleensä hitaasti. Työntösyklien määrä on pieni. Heikkojenkin rakenteiden vaurioituminen ottaa vuosikymmeniä.

Vedenkorkeuden vaihdellessa jääkanteen kiinni jäätyneisiin rakenteisiin kohdistuu myös pystykuormia. Nämä ovat nostaneet paaluja erityisesti vuorovesialuilla, mutta myös Suomen olosuhteissa.

Kuormiin pätee sama kuin jään kantokykyyn. Hidas kuormitus ja lämmin jää pienentävät maksimikuormaa. Yksittäiseen rakenteeseen kohdistuu suhteessa suurempi kuorma kuin jatkuvaan rakenteeseen.

Tuulen kitkavoimaa  $T_a$  jääkenttään tai jäälauttaan voi arvioida kaavalla

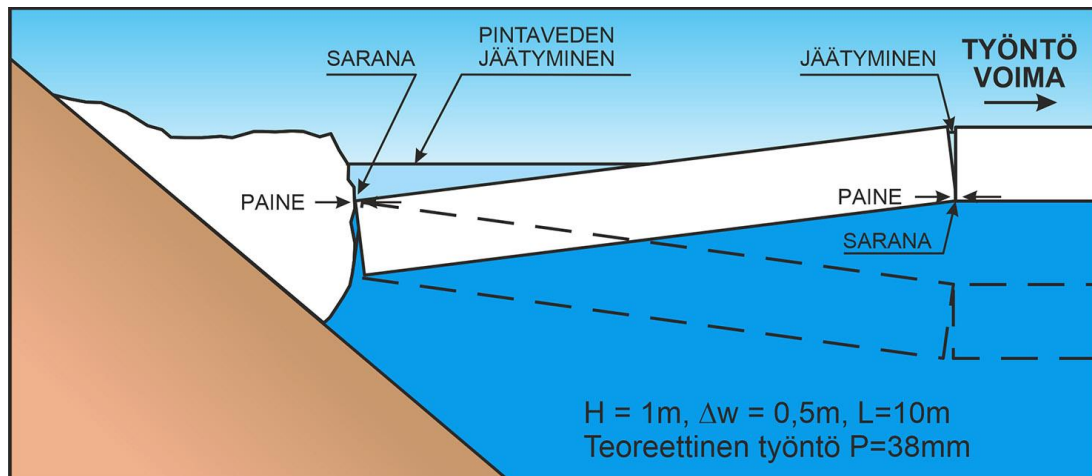
$$\tau_a = \rho_a C_a [v_a]^2 \quad (2)$$

$\rho_a$  = ilman tiheys, 1.3 kg/m<sup>3</sup>

$C_a$  = tuulen kitkakerroin

$v_a$  = tuulen nopeus [m/s] 10m jään pinnan yläpuolella suhteessa jään nopeuteen

Jos tuulen nopeus on 20 m/s ja tasaisen lumipeitteisen jään kitkakerroin  $2 \times 10^{-3}$ , kitkavoimaksi saadaan 1 N/m<sup>2</sup>. Ajatellaan, että pusku kertyy tuulen suunnassa 5 kilometrin matkalta. Puskuvoimaksi tulee rantaa tai esimerkiksi pengertä vasten keskimäärin 5 kN/m.





*Kuva 8. Vedenkorkeuden muutoksien synnyttämä halkeilumekanismi on vaurioittanut paaluille perustettua öljylaituria Oulun Vihreäsaarella. Kun jää laivapaikoissa murretaan, vastavoimaa ei synny.*

Virtauksen kitkavoimaa  $\tau_w$  jääkenttään tai jäälauttaan voidaan arvioida kaavalla

$$\tau_w = \rho_w C_w [v_w]^2 \quad (3)$$

$\rho_w$  = veden tiheys, 1 000 kg/m<sup>3</sup>

$C_w$  = virtauksen kitkakerroin

$v_w$  = virtauksen nopeus [m/s] jään pinnan alapuolella suhteessa jään nopeuteen

Jos virtaavan veden kitkakerroin tasaisen jään alapintaan on  $4 \times 10^{-3}$  ja alueellinen virtausnopeus 0.2 m/s, kitkavoimaksi tulee 0.16 N/m<sup>2</sup> (tuulen ja virtaavan veden kitka, kts. /1/).

Tuulen kitkavoima on erityisen tärkeä erillisten avomerirakenteiden jääkuormien aiheuttajana. Virtauksen kitka voi olla tärkeä erityisesti jääpatojen yhteydessä joissa. Kun vesialueet ovat rajallisia, kitkasta aiheutuvat jäävoimat ovat rajallisia.

Tuulen ja virtauksen kitkan merkitys tulee erityisesti siitä, että ne antavat jäälautalle liike-energian, joka kuluu jään murtotapahtumassa. Toki ne ovat mukana myös ajovoimina törmäyksessä.

Jos liikkuvan jään liike-energia ja/tai ajovoima on riittävä, jää murtuu rakennetta vasten. Liike-energia  $E$  lasketaan kaavalla

$$E = 0.5 M v^2 \quad (4)$$

missä  $M$  on jäälautan massa mukaan lukien hydrodynaaminen massa (massaker-toimena on käytetty arvoa 1.2) ja  $v$  on lautan liikenopeus.

Jäälautan liike-energia kuluu törmäystapahtumassa kaavan  $\sum F \times ds$  mukaan, missä  $ds$  on jään etenemä ja  $F$  on voima, jossa jääkuormasta on vähennetty ajo-voima etenemän aikana.

Myös alusliikenne voi aiheuttaa jään välityksellä rakenteisiin jääkuormia. Jos alus kulkee etäämpänä, kuorma kohdistuu yleensä laajemmalle alalle. Kuorma riippuu toki aluksen koosta ja käytettävästä konevoimasta.

## 2.7 Mitoitusjätkuorma

Suomessa rakenteiden mitoitus perustuu ominaiskuormiin, joita voi pitää konser-vatiivisina estimaatteina rakenteen käyttöaikana esiintyvistä maksimikuormista. Jätkuormien osalta lähtökohta on esitetty liitteessä 1.

Arktisten merirakenteiden suunnittelussa otetaan huomioon rakennetyyppi ja vau-rion seuraukset /8/. Kun tuotantotasanteen tai muun merirakenteen vaurioitumi-sen seuraukset voivat olla suuria, Rakenne kuuluu luokkaan L1. Alhaisten seuraus-ten tasanteet ja rakenteet kuuluvat luokkaan L3. Muut rakenteet kuuluvat luokkaan L2.

Voidaan ajatella, että sillat kuuluvat luokkaan L2, kun taas laiturit, tihtaalit, penke-reet, kelluvat rakenteet, ja johderakenteet kuuluvat tässä luokittelussa luokkaan 3.

Suomen rakennusmääräyskokoelmassakin mainitun ISO standardin /8/ mukaan mitoitettaessa luokan L3 rakenteet suunnitellaan normaalein kuormakertoimin jää-kuormille, joiden vuosittainen ylitystodennäköisyys ei ole suurempi kuin  $10^{-2}$ . Luo-kan L2 rakenteet suunnitellaan tämän lisäksi pienemmällä kuormakertoimella poik-keuksellisille jääkuormille, joiden vuosittainen ylitystodennäköisyys ei ole suurempi kuin  $10^{-3}$ .

Nykyaikaisessa jäämekaniikkasuunnittelussa ja myös ISO standardissa /8/ tarkas-tellaan erilaisia jääkuormituskenaarioita. Tällaisen lähestymistavan tuloksena on usein se, että jääkuormat ovat samankaltaisia kuin Kalifornian maanjäristykset; Silloin tällöin esiintyy pientä tärinää, mutta joskus harvoin tapahtuu kunnan järis-tys. Jätkuormien osalta ison kuorman esiintyminen edellyttää usein poikkeuksel-lista olosuhteiden ketjua tai yhdistelmää.

On usein vaikea hahmottaa, mikä on kerran rakenteen elinaikana esiintyvä jää-kuorma. Konservatiivisessa suunnittelussa oletetaan lähes maksimipaksuisen jään murtuvan rakennetta vasten. Tämä voi johtaa turhan kalliiseen ratkaisuun.

Tämän selvityksen laatija on soveltanut sisävesi- ja rannikkorakenteiden suunnittelussa menettelyä, jossa hahmotellaan melko äärimmäinen jääkuormituskenario ja sen vuosittainen ylitystodennäköisyys (esimerkiksi  $10^{-4}$ ). Sen jälkeen lasetaan, minkälaiseen rasitustasoon tai vaurioon jään liike-energialla ja/tai ajovoimalla ylletään. Sisävesi- ja rannikkorakenteiden osalta jään ajovoima ja/tai liike-energia riittää harvoin aiheuttamaan mittavia rakennevaurioita.

Rakenteiden suunnittelussa joudutaan miettimään usein myös kuormakombinaatioita. Tässä yhteydessä on syytä tarkastella maalaisjärjellä, voiko harvinainen jääkuormitustilanne esiintyä osana tavanomaista kuormakombinaatiota, vai onko järkevämpää käsitellä tilanne onnettomuuskuormana.

Edelleen on syytä pitää mielessä, että käytännössä kokonaisvarmuus rakenteen murtumista vastaan on ominaiskuormille normaalimitoituksessa luokkaa 2 tai suurempi.

## 3 Maksimijääkuormat

Seuraavassa oletetaan, että jäällä on tarpeeksi ajovoimaa ja/tai kineettistä energiaa. Jään murtolujuus asettaa jääkuorman ylärajan.

### 3.1 Jään pystykuormat

Vedenkorkeuden vaihdellessa rakenteisiin kohdistuu jään välityksellä ylös tai alas päin suuntautuvia kuormia. Niiden yläraja määräytyy jään taivutus- tai leikkauslujuuden perusteella.

Vuorovesialueilla jäät saattavat nyttyttää paaluja ylös pikkuhiljaa. Suomessa vedenkorkeuden vaihtelut ovat yleensä hitaita ja kuormat pienempiä. Kuormilla on rakenteiden oman painon ja pohjan kantokyvyn takia harvoin merkitystä mitoituksessa.

Suuruusluokka-arvio erillisen paalun, paalukon tai halkaisijaltaan pienen kasuunin pystysuuntaisesta jääkuormasta on Suomen olosuhteissa  $P = h^2$  (MN), missä  $h$  on jään paksuus metreissä.

Suuruusluokka-arvio suoran seinän pystysuuntaisesta jääkuormasta on  $p = 0.01 h^2$  (MN/m). Normaalin paalulaiturin paalujen pystyjääkuorman voi laskea olettamalla paalurivi seinäksi. Yksittäisen paalun vertikaalijääkuorma on seinän jääkuorma kerrottuna paalujen etäisyydellä (olettaen, että paalurivejä on vähintään kaksi). Kulmapaalun näin laskettuun vertikaalikuormaan voi lisätä neljänneksen erillisen paalu kuormasta.

Kuorman täysi mobilisoituminen vaatii suuruusluokkaa 0.2–0.3 metrin vedenkorkeuden muutoksen.

Tarkemmin asiaa voi arvioida lähteen /1/ kaavoilla ottaen huomioon, että kun vedenkorkeuden muutos on hidas, jään taivutuslujuus on alle 0.2 MPa ja kimmomoduuli alle 2 000 MPa.

### 3.2 Jään virumiskuorma

Jään lämpöliikkeet, vedenkorkeuden muutoksiin liittyvä halkeilumekanismi ja ulkoiset kuormat aiheuttavat jäälevyissä pieniä ja hitaita siirtymiä. Jos jääkentässä on rakenne, jää murtuu virumalla rakennetta vasten. Virumiskuorma riippuu muun muassa jään liikenopeudesta suhteessa rakenteeseen ja jään lämpötilasta.

Jään virumiskuormalla on merkitystä siltojen alusrakenteiden suunnittelussa ja myös jääkentässä olevien erillISRakenteiden suunnittelussa.

Todettakoon, että jos jään keskilämpötila kohoaa vuorokauden aikana 5 astetta, mikä on käytännössä jo melko suuri lämpötilamuutos, jään siirtymä on 25 cm/km kohti vapaata reunaa. Tuulen ja virtauksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat ehjässä jäälevyissä ainakin kertaluokkaa pienempiä. Vapaa reuna voi olla esimerkiksi murrettu väylä, sula tai jään reuna.



Jos jääkansi tukeutuu molemmilta reunoilta rantoihin, jään liike estyy ainakin osittain rantojen välissä.

Kuvassa 9 on esitetty tuloksia hitaista jääkuormituskokeista laboratoriossa ja täysmittakaavassa. Pienimittakaavaisissa laboratoriossa tehdyissä yksidimensionaalisissa puristuskokeissa jään lämpötila on ollut  $-10\text{ C}$ .

Rantamäen /9/ kokeet on tehty Pohjanlahdella jään paksuuden ollessa 0.67–0.94 metriä. Puristussylinterin halkaisija on ollut 0.4 tai 0.8 metriä.

Croasdalen mittaukset /10, 11/ oli tehty hyytävässä olosuhteissa yli metrin paksuiselle arktiselle merijäälle Mackenzie joen suistossa.

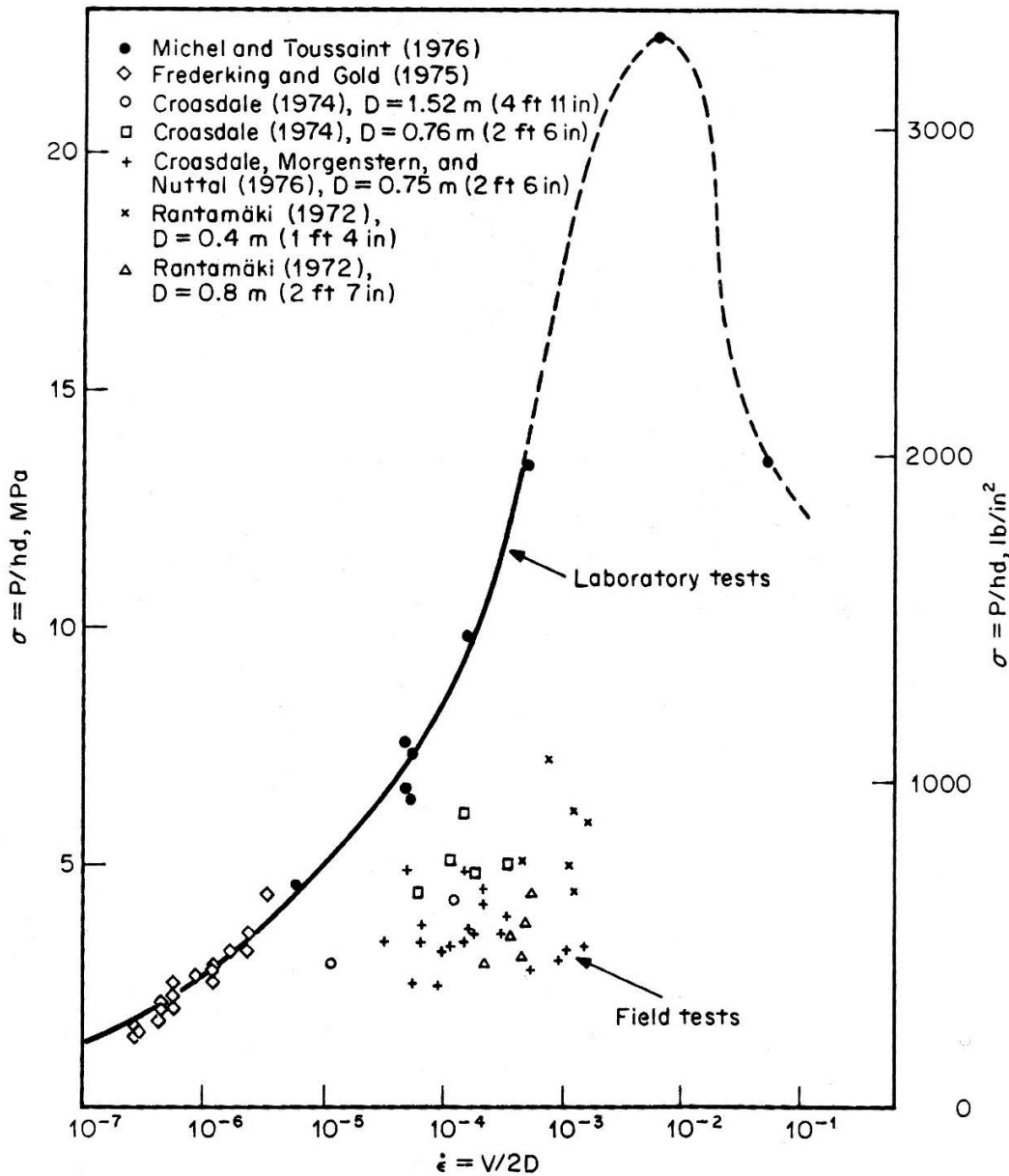
Kuvan 9 kenttäkokeisiin liittyi jään halkeilua, joten puhtaasta virumiskuormasta ei ollut kysymys näillä kuormitusnopeuksilla, pikemminkin maksimikuormasta hyvällä kontaktilla jään ja rakenteen välillä. Tulokset kuvaavat jääkuormaa, joka kehittyy jääkenttään kiinnijäätyneseen rakenteeseen jäiden lähtiessä liikkeelle. Rantamäen kokeilla haettiin merimerkkien maksimijääkuormaa Oulun väylällä, missä tällainen kuormitustapaus on paikoin mahdollinen.

Jos jää siirtyy 25 cm vuorokaudessa vasten jäykkää rakennetta, jonka halkaisija on 1 m, kuvan 9 nimellinen virumisnopeus on  $0.25\text{ m} / (2 \times 1\text{ m} \times 86400\text{ s}) = 1.4 \times 10^{-6}\text{ 1/s}$ . Nähdään, että täysmittakaavatuloksia ei ole näin pienille kuormitusnopeuksille.

Joka tapauksessa lämmin jää viruu paljon pienemmällä paineella kuin kylmä jää liikenopeuden ollessa sama. Virumisnopeus samalla jään liikenopeudella on leveää rakennetta vasten pienempi kuin kapeaa rakennetta vasten, koska viruminen tapahtuu edellisessä tapauksessa pidemmällä matkalla (kuva 9).

Useissa sisävesien ja rannikkoalueiden käytännön tapauksissa jään liike on niin pieni, että rakenteen muodonmuutos asettaa ylärajan jään paineelle.

Jääkenttään kiinnijäätynen rakenteen muodolla on merkitystä jään jännitystilaan, halkeiluun ja jään liikkeellelähtökuormaan niissä harvoissa tapauksissa, joissa tämä tilanne on relevantti.



Kuva 9. Jään paine laboratoriossa tehdyissä yksidimensionaalisissa puristuskokeissa sekä kenttäkokeissa virumisnopeuden funktiona /2, 3, 9, 10, 11/.

### 3.3 Dynaaminen jääkuorma pystysuoraa rakennetta vasten

Jään murtuessa jäykkää pystysuoraa rakennetta vasten jääkuormaa  $F$  arvioidaan usein kaavalla

$$F = I \times h \times D \times \sigma \quad (5)$$

$$I = (5 \times h/D + 1)^{0.5}$$

$h$  = jään paksuus [m]

$D$  = rakenteen leveys [m]

$\sigma$  = jään nimellislujuus [ $\text{MN/m}^2$ ]

Kerroyn I ottaa huomioon jään kontaktin rakenteeseen ja murtovyöhykkeen ahtauden vaikutukset. Kaavaa soveltuu parhaiten tapauksiin, joissa sivusuuhdekerroyn  $D/h$  on 1–6 ja rakenne on jäykkä.

Täysmittakaavakokeissa, joissa kuormitussylinteri on ollut kiinnitettynä jäänmurtajan keulaan, suomalaisen merijään maksimimurtokuormaksi on saatu 0.5 MN jään paksuudelle  $h = 0.55$  m ja kuormitussylinterin halkaisijalle  $D = 0.35$  m, Toisessa kokeessa saatiin 0.25 MN, jään paksuudelle  $h = 0.2$  m ja kuormitussylinterin halkaisijalle  $D = 0.35$  m (VTT/BET, 1987).

Toisessa koesarjassa saatiin merijään maksimimurtokuormaksi 0.8 MN, kun  $h = 0.35$  m ja  $D = 2.5$  m (WARC, 1987) /12, 13, 14/.

Tällä perusteella sopiva jään nimellislujuus olisi 1–2 MPa.

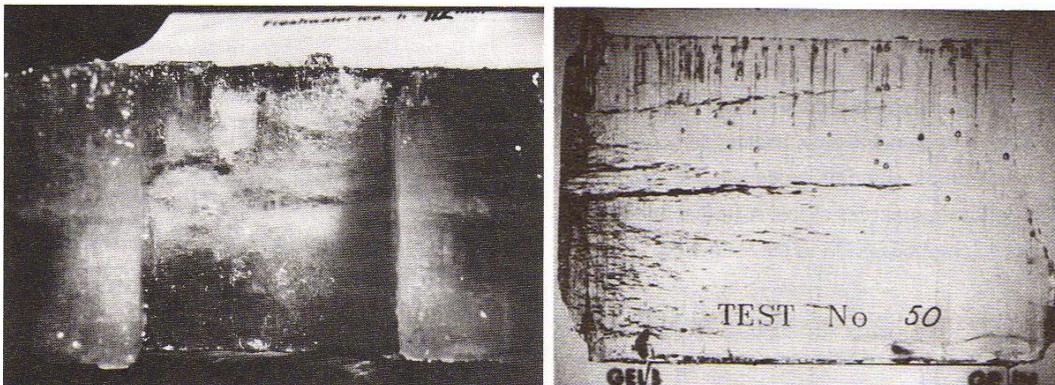
Kuvassa 10 on esitetty normaalin pylväskiteisen teräsjään puristusmurto tunkeutujarakennetta vasten. Keskellä jäälevy on kapea korkean paineen vyöhyke. Murtohetkellä tämä paine työntää kapeat jääkiilat ylös ja alaspäin. Huomaa myös murtovyöhykkeestä lähtevä vaakahalkeilu.

Murtotapahtuma voidaan jakaa tunkeutumavaiheeseen, jolloin ehjä jää myötää lähinnä plastisesti kuorman kasvaessa murtohetkeen asti sekä murtuman jälkeiseen vaiheeseen, jolloin kontaktivyöhykkeestä työntyy jäämurskaa pienellä paineella, kunnes uusi kontakti syntyy ehjään jäähän.

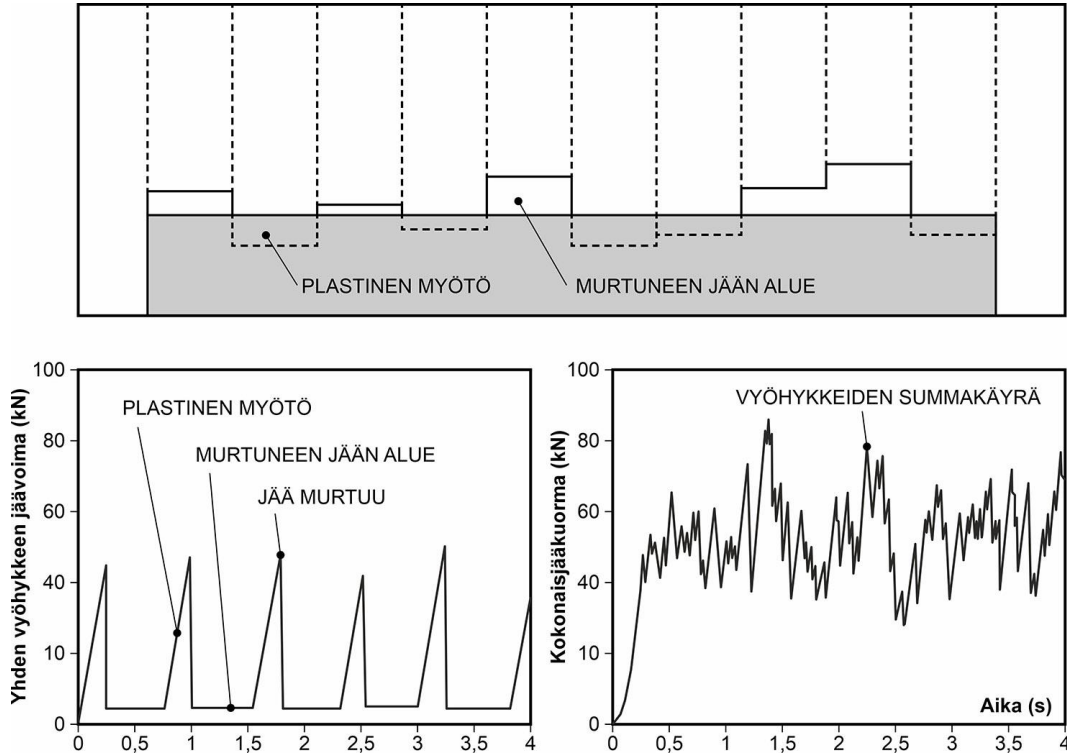
Jään murtuminen tapahtuu vyöhykkeittäin (kuva 11). Vyöhykkeet ovat eri vaiheissa. Tämä selittää osittain kertoimen I voimakkaan riippuvuuden sivusuhteesta  $D/h$ . Maksimijääkuorma kasvaa maltillisesti, kun rakenteen leveys ja murtovyöhykkeiden määrä kasvavat.

Toinen selittävä tekijä on se, että jään murtuminen leveää rakennetta vasten tapahtuu pääosin kaksidimensionaalisesti, kun murtumiskiilan mobilisoitumista kapeaa rannetta vasten hankaloittaa kolmidimensionaalinen jännitystila (poikittaispuristus).

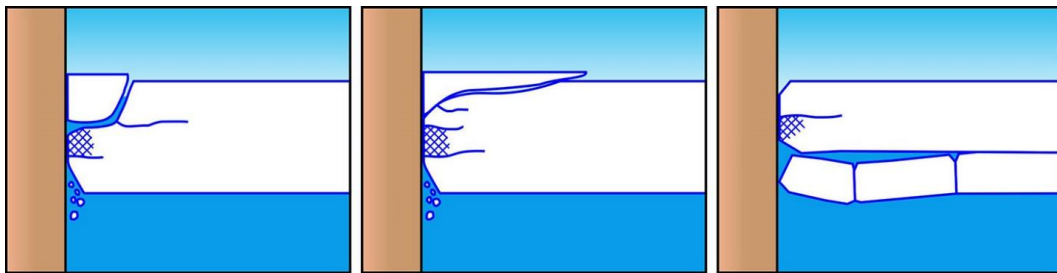
Kolmas tekijä erityisesti leveän rakenteen tapauksessa on murtovyöhykkeestä lähtevä vaakahalkeilu, joka aiheuttaa jäälevyn lohkeilua pienentäen murtovyöhykkeen tehollista paksuutta. Suurimmat jään paineet esiintyvät usein leveän rakenteen reunaosissa (kuva 12).



Kuva 10. Pylväskiteisen teräsjään murtuminen pystysuoraan rakennetta vasten. Huomaa jäälevyn keskellä oleva korkean paineen vyöhyke, siitä ylös- ja alaspäin työntyvät jääkiilat sekä kovan kontaktin vyöhykkeeltä lähtevä vaakahalkeilu /14/.



Kuva 11. Idealisoitu kuva jään murtumisesta vyöhykkeittäin leveää ja jäykkää rakennetta vasten. Kun eri vaiheissa olevien vyöhykkeiden jäävoimat lasketaan yhteen, kokonaisjääkuorma kasvaa maltillisesti.



Kuva 12. Pystyleikkauksia jään murtumisesta leveää rakennetta vasten. Rakenteen leveyden kasvaessa jään lohkeilun todennäköisyys kasvaa.

Kun rakenteen sivusuuhdekerroin  $D/h$  kasvaa yli kuuden, nimellinen jään maksimipaine pienenee edelleen. Jäälautta törmätessä riittävällä energialla esimerkiksi laiturimuuriin, maksimijääkuorman kehitystä voi arvioida lähteen /8/ kaavalla  $F = p_G \times A$ , missä  $A$  on kontaktiala ja

$$p_G = C_R \left(\frac{h}{h_1}\right)^n \left(\frac{w}{h}\right)^m \quad (6)$$

$p_G$  globaalipaine (MPa);  
 $w$  kontaktileveys (m);  
 $h$  jään paksuus (m);

- $h_1$  jään referenssipaksuus 1 m;  
 $m$  empiirinen eksponentti, -0,16;  
 $n$  empiirinen eksponentti  $-0.50 + h/5$ , kun  $h < 1.0$  m, ja -0,30 kun  $h \geq 1,0$  m;  
 $C_R$  jään lujuuskerroin 1.8 MPa Suomen olosuhteissa.

Kaava pätee, kunnes ehjä jää menettää kontaktin rakenteeseen jääahtauman muodostuksen alkuvaiheessa.

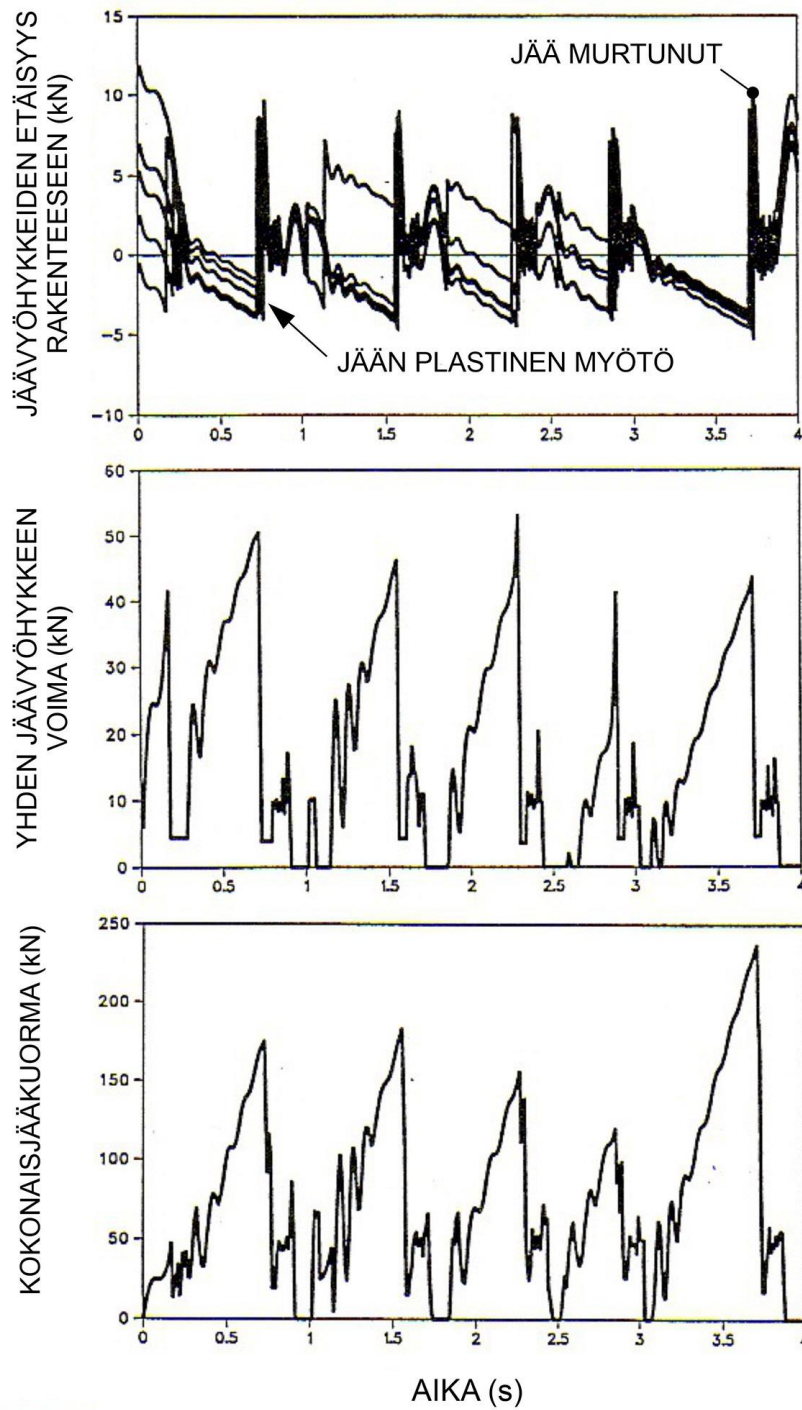
Rakenteen leveyden kasvaessa lisääntyvän lohkeilun lisäksi murtotapahtumaan liittyy erilaisia stabiiliuden menetyksiä ja murtotapahtuman monimuotoistumista jo ennen kuin rakenne menettää kokonaan kontaktin liikkuvaan jäälauttaan. Tämä selittää osaltaan globaalipaineen pienenemistä.

Mainittakoon, että tämä kaava samoin kuin lähteen /8/ kaava (kaavat ovat itse asiassa standardin lisäohjeliitteessä) pienemmän sivusuhteen rakenteille antaa ainakin jäykille rakenteille varsin konservatiivisia kuorma-arvoja verrattuna mitattuihin arvoihin.

Yhtenä selityksenä voi olla, että jääkuormiin liittyy merkittävä komplikaatio, jos rakenne on joustava. Tässä tapauksessa rakenteella on taipumus värähdellä. Rakennetta voi pitää joustavana, jos sen staattinen siirtymä jääkuormasta on prosentin luokkaa tai enemmän jään paksuudesta /8/.

Värähtelyn seurauksena jään murtovyöhykkeiden vaihe-erot pienenevät ja maksimijääkuormat kasvavat (kuva 13). Maksimijääkuorma ei kuitenkaan ylitä hyvän kontaktin mukaista jääkuormaa (kuva 9). Ilmiötä voi analysoida tietokonelaskelmin /14/.

Toisena selityksenä voi olla ero lämpimän ja raerajoiltaan osittain sulaneen kevätyään töytäisyllä ja kylmän teräsjään jatkuvalla murtumalla.



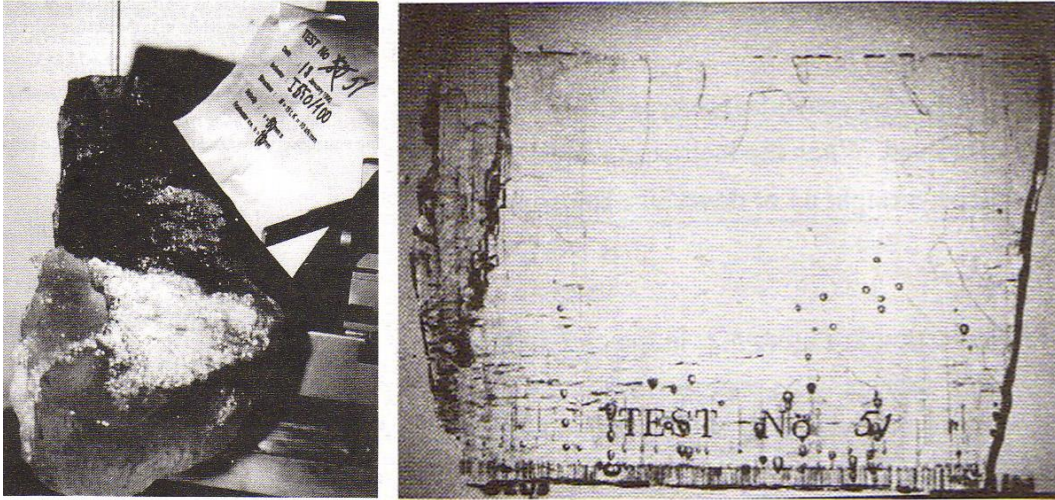
$$\sigma_{\max} = 12 \text{ MPa}, c_0 = 0.4, c_1 = 0.03, c_2 = 0.005, c_3 = 0.010, c_4 = 0.0, n = 5,$$

$$B = 0.3 \text{ m}, h = 0.10 \text{ m}, v = 0.05 \text{ m/s}, m = 15\,000 \text{ kg}, k_a = 8 \text{ kN/mm}, \xi = 15\%, \beta = 0^\circ$$

Kuva 13. Kun rakenne värähtelee, jään murtovyöhykkeiden vaihe-erot pienenevät. Maksimijääkuorma ja kuormaheilahtelut kasvavat jäykkään rakenteeseen verrattuna /14/.

### 3.4 Dynaaminen jääkuorma loivasti kallistettuja rakenteita vasten

Kuvassa 14 on esitetty normaalin pylväskiteisen jään murtuminen 10 astetta kallistettua rakennetta vasten. Nähdään, että jään murtuminen on edelleen vyöhykkeistä. Murtokiila lähtee kuitenkin jääkuoren alaosasta, eikä siihen kohdistu samalla tavalla puristusta kuin pystysuoran rakenteen tapauksessa. Tällä on vaikutusta jäävyöhykkeen lujuuteen ja murtopituuteen. Jo kymmenen asteen kallistus voi pudottaa jääkuorman jopa puoleen vertikaalirakenteeseen verrattuna.



Kuva 14. Jään murtuminen 10 astetta kallistettua rakennetta vasten /14/.

Kontaktivyöhykkeestä loivasti kaltevan massiivirakenteen jääkuorma voidaan laskea Korzhavinin kaavalla /13, 5/

$$H_{\max} = (1.1 k b h \tau_0 \tan \beta) \div \sin \alpha \quad (7)$$

k = kontaktikerroin

b = rakenteen leveys

h = jään paksuus

$\tau_0$  = jään leikkauslujuus

$\beta$  = rakenteen kallistuskulma horisontaalitasosta

$\alpha$  = kiilamaisen rakenteen kärkikulman puolikas

Etureunastaan pyöreälle rakenteelle

$$H_{\max} = 1.73 k b h \tau_0 \tan \beta \quad (8)$$

Kaavat perustuvat Venäjän jokien jäidenlähtöjen yhteydessä tehtyihin havaintoihin koskien jään murtumista virtapilareita vasten. Kerroin 1.1 tulee kitkan vaikutuksesta. Jos virtapilari on jään kontaktivyöhykkeessä verhoiltu epätasaisesti kivellä, kitkatekijä voi olla tätä isompi.

Avaintekijä kaavaa käytettäessä on jään leikkauslujuuden arvo. Koska pylväskiteisen jään sulaminen alkaa raerajoilta, tämä arvo pienenee sulamisprosessin alkuvaiheessa muita lujuusarvoja nopeammin. Korzhavin suosittelee leikkauslujuuden laskenta-arvoiksi Pohjoisen ja Siperian joissa 0.4–0.6 MPa ja entisen Neuvostoliiton Euroopan puoleisissa joissa 0.2–0.3 MPa. Kontaktikertoimeksi Korzhavin suosittelee rakenteen leveydestä ja jään liikenopeudesta riippuen arvoja 0.4–0.7.

Athabasca joesta Albertasta vuosina 1967–1974 vitapilarista (leveys 2.3 metriä, etuseinän kaltevuus 23 astetta vertikaalisesta) suoraan mitatut jääkuormat ovat suurin piirtein sopusoinnussa Korzhavinin kaavan suositusarvoilla laskettujen jääkuormien kanssa. Tulokset demonstroivat myös jään sulamisasteen ja jäidenlähden luonteen merkitystä /16/.

Kun rakenteen kallistuskulma jään vaikutusvyöhykkeessä on loiva, joustaviin rakenteisiin liittyy samankaltainen, joskaan ei yhä voimakas värähtelytaipumus ja kuorma-amplifikaatio kuin pystysuoriin rakenteisiin. Syynä on tässäkin tapauksessa jään murtovyöhykkeiden vaihe-erojen tasoittuminen värähtelyn seurauksena /14/.

Kun rakenteen leveys suhteessa jään paksuuteen kasvaa, massiivilohkeilu, jään taivutusmurto ahtauman painosta ja muut murtomuodot tulevat todennäköisemmiksi.

### 3.5 Dynaaminen jääkuorma voimakkaasti kallistettuja ja kartiomaisia rakenteita vasten

Rakenteen merkittävä kallistaminen kiintojään vaikutusvyöhykkeessä (yli 20 astetta vertikaalitasosta) on tehokas tapa pienentää jääkuormia ja eliminoida rakenteen mahdollinen värähtelyriski. Jää murtuu voimakkaasti kallistettua tai kartiomaista rakennetta vasten joko taipumalla tai leikkautumalla (kuva 15). Kun jää on paksua ja lämmintä, leikkausmurto on todennäköisempi. Lämpimän jään leikkauslujuuden arviointi on kuitenkin hankalaa.

Joka tapauksessa maksimikuorma koostuu jään murtamisesta ja murtuneen jään siirtämisestä. Taivutusmurtokuorman arviointiin on olemassa luotettava Ralstonin menetelmä /17/. Jos jää murtuu leikkautumalla, taivutusmurtoteorialla laskettu kuorma on konservatiivisella puolella.

Kuorman horisontaalikomponentti  $H$  ja vertikaalikomponentti  $V$  lasketaan kaavoilla

$$H = (A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_w g h D^2 + A_3 \rho_w g h_r (D^2 - D_T^2)) A_4 \quad (9)$$

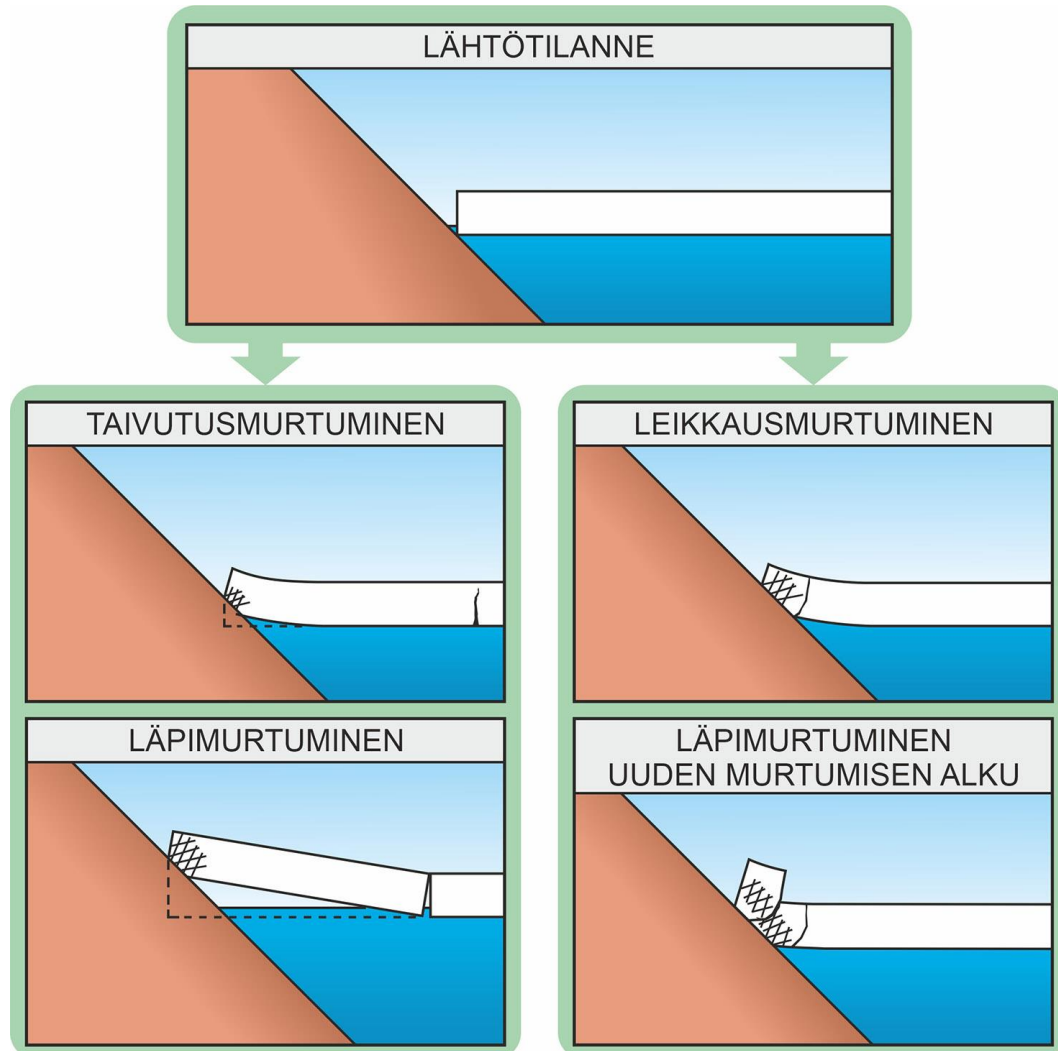
$$V = B_1 H + B_2 \rho_w g h_r (D^2 - D_T^2) \quad (10)$$

Parametrit voidaan arvioida karkeasti kuvasta 16 ja tarkemmin lähteen /8/ kaavoilla.

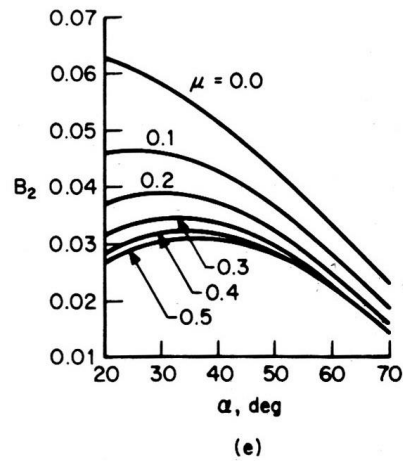
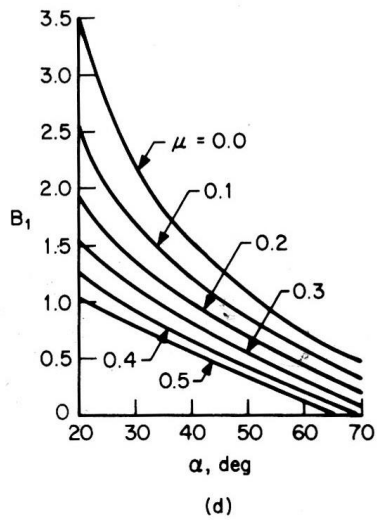
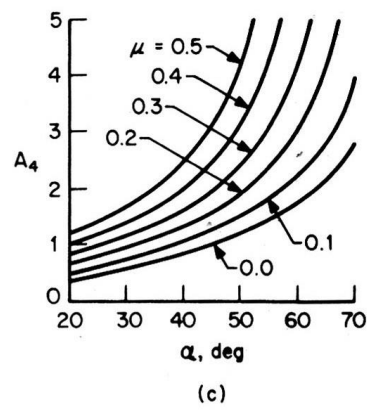
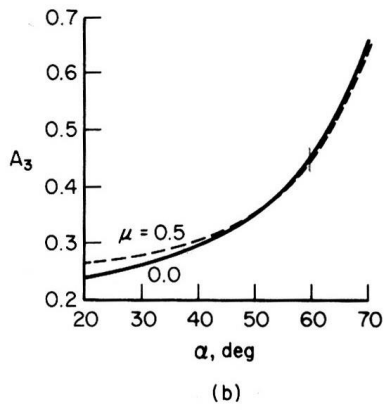
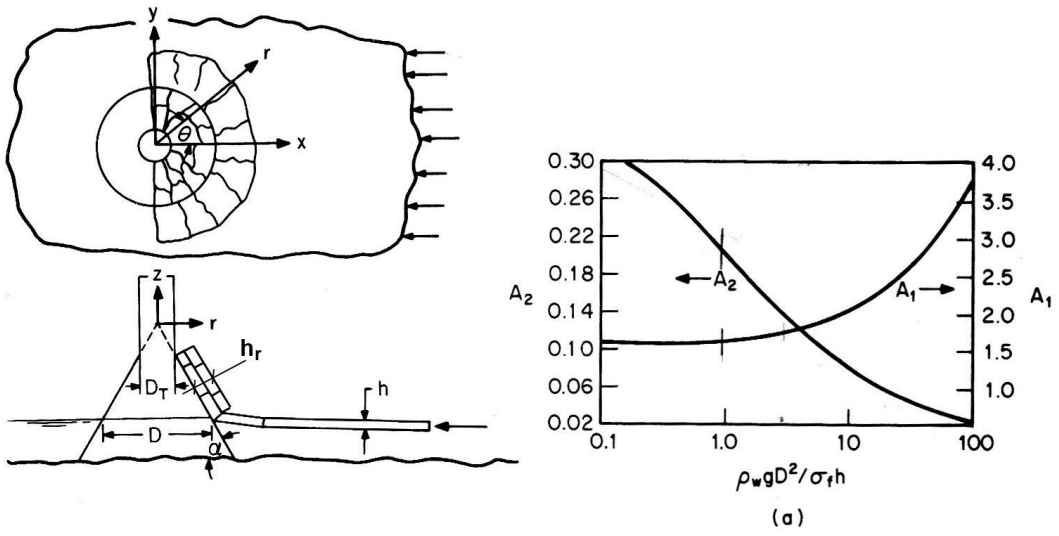
Oletetaan jään taivutuslujuudeksi  $\sigma_f = 0.5$  MPa, rakenteen halkaisijaksi jään vaikutustasossa  $D = 10$  m, kartion ylähalkaisijaksi  $D_t = 3.9$  m, jään paksuudeksi  $h = 0.8$  m, rakenteen eteen muodostuvan jääkasan paksuudeksi  $h_r = 1.6$  m, kartiokulmaksi  $\alpha = 56$  astetta horisontaalitasosta ja kitkakertoimeksi jään ja teräksen välillä  $\mu = 0.15$ . Jääkuorman komponenteiksi saadaan  $H = 2.7$  MN ja  $V = 1.6$  MN.



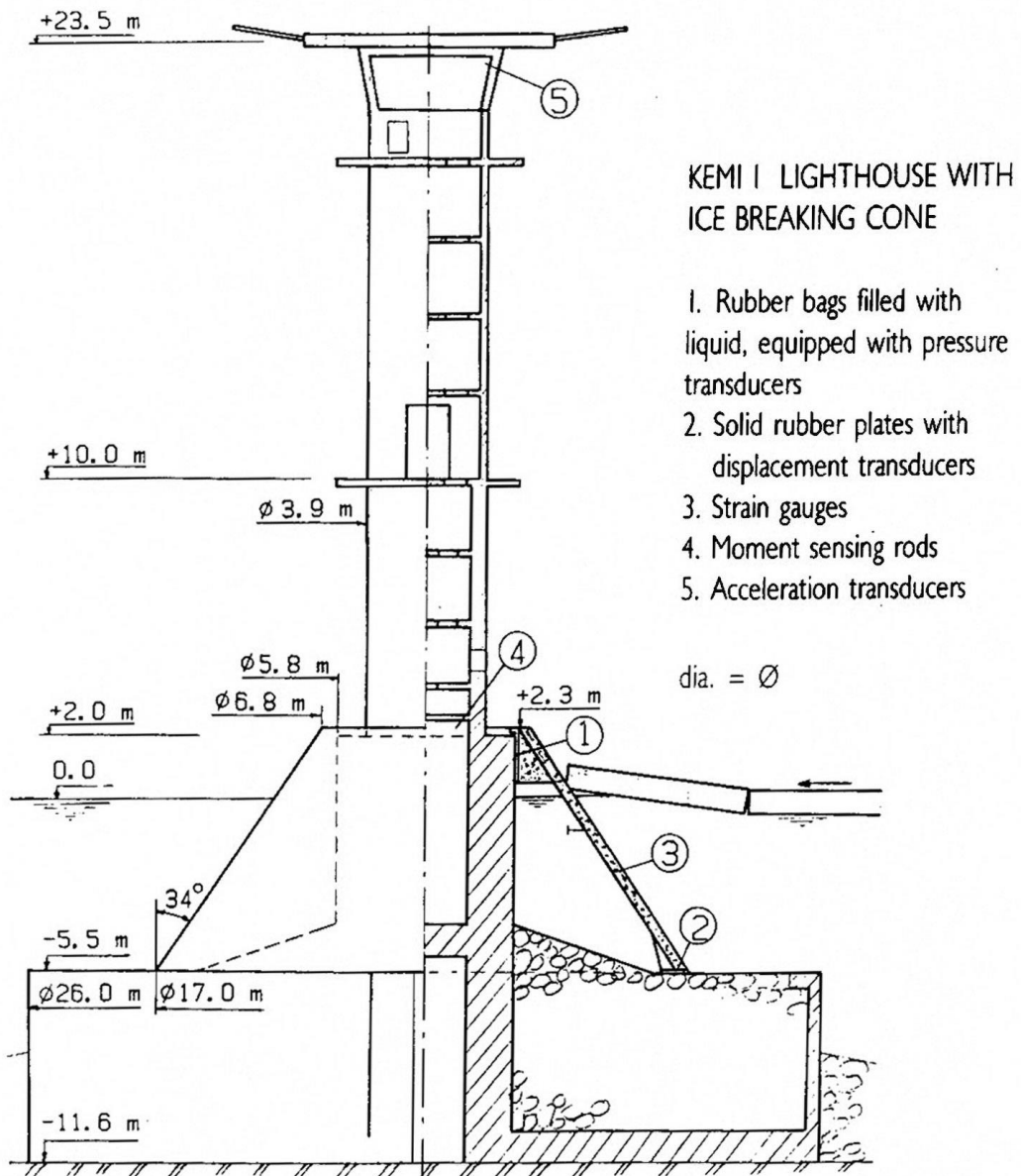
Noin 0.8 m paksu jää murtui Kemi 1 majakan ympärille rakennettua jääkuormien mittauskartiota vasten 21.3.1986 (kuvat 17, 18 ja 19). Jääkuorman mittausperiodi kesti yli tunnin. Jääkuorman vaakakomponentti vaihteli välillä 1.2 MN – 2.9 MN /18/.



*Kuva 15. Jään murtuminen kaltevaa rakennetta vasten taivutusmurtomekanismilla ja leikkausmurtomekanismilla.*



Kuva 16. Parametrit Ralstonin kaavoissa graafisessa muodossa /17/.



Kuva 17. Kemi 1 majakka ja sen ympärille rakennettu jääkuormien mittauskartio /18/.



*Kuva 18. Jään taivutusmurtuminen Kemi 1 kartiota vasten /18/.*



*Kuva 19. Jää murtuu pääosin leikkautumalla Kemi 1 kartiota vasten /18/.*

### 3.6 Jään murtuminen penkereitä tai aallonmurtajia vasten

Penkereiden ja aallonmurtajien luiskat ovat loivia, käytännössä 1:1.5 tai loivempia. Ne on suojattu kiviheitokkeella, avoimilla paikoilla lohkarerokkeilla.

Loivan luiskan jääkuormaa on usein arvioitu kaksidimensionaalisen taivutusmurto-teorian avulla. Käytännössä luiskat ovat kuitenkin erittäin karkeita kohteissa, joissa jäällä voi olla edes alkutalvesta tai keväällä merkittävästi ajovoimaa tai liike-energiaa. Jää murtuu tällaista lohkarerintausta vasten vyöhykkeittäin ja murtotapahtumat ovat erittäin monimuotoisia (taivutus, leikkaus, paikallinen puristus sekä erilaiset halkeamat ja stabiliteetin menetykset).

Paikalliset kuormat voivat olla korkeitakin, mutta pengeri on tyypillisesti ainakin osittain jässä. Paikallinen kuormahuippu jakautuu laajemmalle alueelle.

Mikäli jään ajovoima ja/tai liike-energia ovat riittävän suuria, jää tunkeutuu ensin ahtauman läpi paikalliseen kontaktiin rakenteen kanssa. Sen jälkeen ahtauma kasvaa rakenteesta ulos päin.

Pitkän rakenteen tapauksessa kontaktileveys kasvaa interaktioproessin aikana, kunnes jäälautta pysähtyy. Matalassa vedessä ahtauma pohjautuu ja osa kuormasta menee kitkan välityksellä pohjaan.

Ahtautumisprosessi on erittäin monimuotoinen ja vyöhykkeinen. Siihen liittyy kitkakomponentteja ja passiivipainekomponentteja jään tunkeutuessa ahtauman läpi, voimia kasan potentiaalienergian kasvattamiseen ja voimia jään rasittamiseen paikallisesti murtoon asti (kuvat 20, 21 ja 22).

Jääkuorman ylärajaa voi arvioida lähteen /8/ vallittumiskaavalla

$$p_D = R h^{1.25} D^{-0.54} \quad (11)$$

missä

$p_D$  on jään vallittumiskuorma (MN/m)

$h$  on jäälautan paksuus (m)

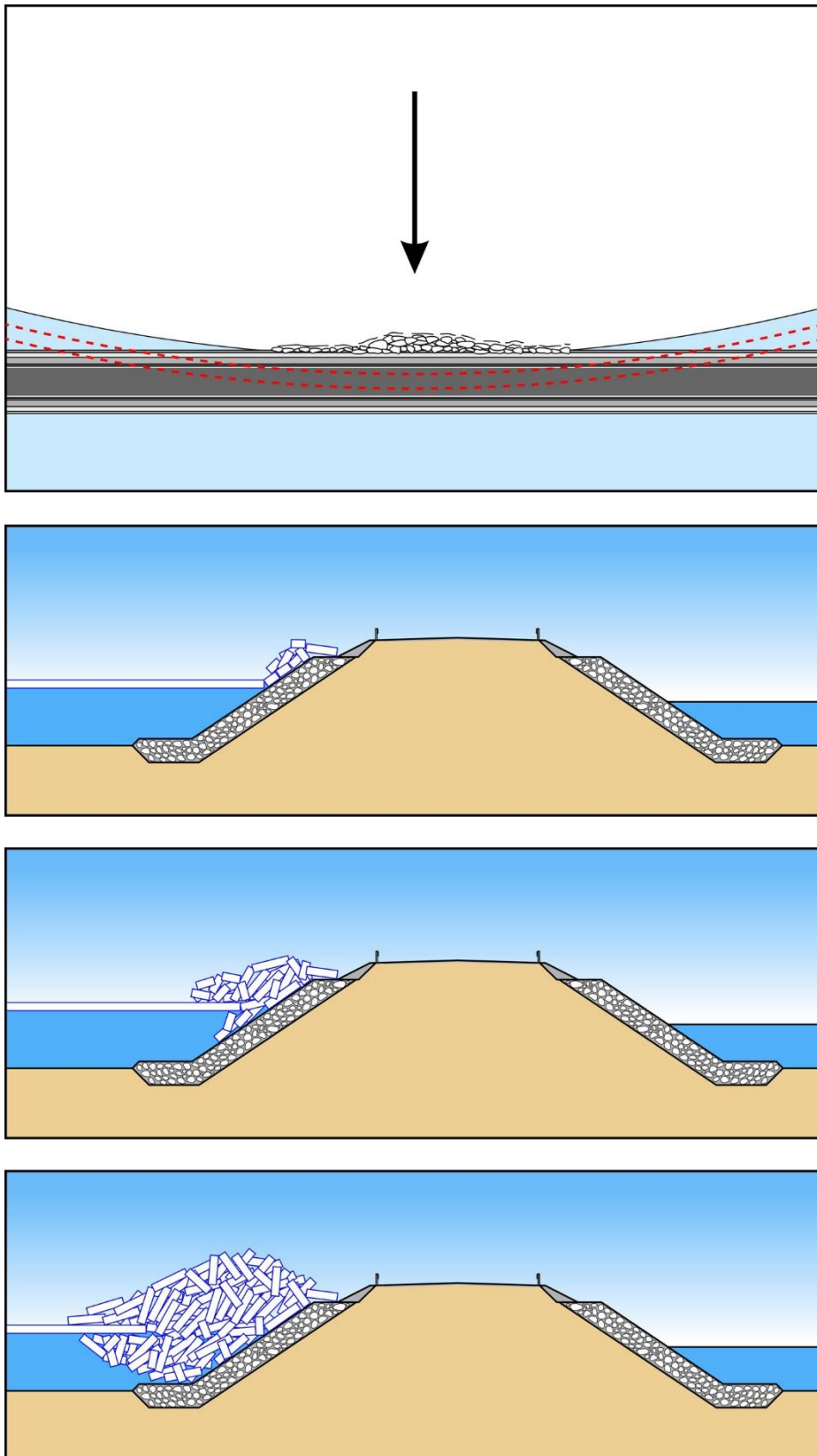
$D$  on vallittumisleveys (m)

$R$  on kerroin, jolle suositellaan arvoa 2–10

Suomen olosuhteissa kertoimen  $R$  arvo lienee lähellä suositeltua alarajaa.

Suomen olosuhteissa jääkuormat pengertä vasten ovat harvoin kriittisiä. Monissa paikoissa jäällä ei ole riittävästi ajovoimaa ja tai/liike-energiaa kunnon ahtauman muodostamiseen. Tästä on jäljempänä esimerkki.

Jos jäälautta törmää esimerkiksi tiepenkereeseen myrskyllä, kun vesi on poikkeuksellisen korkealla, jää voi tuki nousta tielle, vaurioittaa kaiteita ja varusteita ja häiritä tai estää liikennettä, kunnes jäät on raivattu.



*Kuva 20. Jääröykkiön muodostuminen pengertien eteen.*



*Kuva 21. Jään ahtautumista rakenteen edessä /19/.*



*Kuva 22. Kevätjää on kasautunut kovassa tuulessa aallonmurtajaa vasten Hailuodon Marjaniemessä (kuvakaappaus YLE:n arkistofilmistä).*

## 4 Siltapilarien jääkuormat

### 4.1 Paikallisten olosuhteiden selvittäminen

Sisävesillä ja rannikkovyöhykkeessä jääpeitteen liikemahdollisuudet ovat rajallisia. Rannat asettavat rajoja jäälauttojen maksimikoolle. Kymmenen minuutin keskituulen nopeus yltää näillä alueilla maaston karkeudesta johtuen harvoin arvoon 20 m/s.

Vesistöisillä ja jokisilla on jääkuormitusten kannalta merkittäviä eroja. Vesistöissä jään maksimiliikeliikkeenopeudet jäävät yleensä pieniksi, tyypillisesti selvästi alle 0.5 m/s. Merkittävää hydraulista gradienttia (vesiviivan kaltevuutta) ei yleensä ole. Joissa jäälauttojen nopeus voi yltää useisiin metreihin sekunneissa. Hydraulinen gradientti ja tähän liittyvä jäämassojen gravitaatiokomponentti voi olla merkittävä erityisesti, jos jäät patoutuvat sillan virtapilareita vasten.

Peruskartta ja satelliittikuvat antavat hyvän käsityksen siitä, minkä kokoiset jäälautat voivat törmätä siltapilariin. Tässä yhteydessä kannattaa kiinnittää huomiota jäälauttojen liikeitä rajoittaviin kareihin ja matalikkoihin. Paikallistieto jäidenlähdistä ja tähän liittyvistä seikoista kuten vedenkorkeuksista ja virtaamista on arvokasta.

On kuitenkin syytä pitää mielessä, että rakenteiden suunnittelussa ollaan tekemisissä ääritilanteiden kanssa. Tällaisia tilanteita voi syntyä rannikkovyöhykkeessä esimerkiksi vedenkorkeuden noustessa myrskyn seurauksena, jolloin jäät voivat irrota rannoilta ja päästä liikkumaan.

Joissa sään poikkeuksellinen lämpeneminen ja lumen nopea sulaminen voi nostaa vedenpintaa ja virtausnopeuksia. Jää voi irrota rannoista ja lähteä liikkeelle jopa sydäntalvella.

Ilmatieteen laitokselta ja ympäristökeskuksista saa tietoa jäänpaksuuksista, tuulista, vedenkorkeuksista ja virtaamista. On hyödyllistä tutkia säätietojen, vedenkorkeuksien ja virtaamien kehitystä yli ääritilanteiden historiatarkasteluissa ja referenssitapausten tarkasteluissa.

Seuraavassa tarkastellaan siltapilareiden jääkuormia esimerkkien valossa.

### 4.2 Tornionjoen rautatiesilta

Rautatiesillan sijainti Tornionjoen eteläjuoksulla on esitetty kuvassa 23. Silta valmistui vuonna 1919. Vuonna 1939 valmistui 2 kilometriä sen yläpuolelle Hannulan silta, ja sen jälkeen vielä uusi E4 maantiesilta 1979 sekä kevyen liikenteen silta 1995.

Rautatiesillan perustukset ovat massiivisia gravitaatioperustuksia, joiden alaosaa on antura. Perustukset on varustettu jäänsärkijöillä. Niiden etureuna on kallistettu jäiden lähden aikaisten jääkuormien hallitsemiseksi ja vahvistettu vielä jään vaikutusalueelta betonikaulukselta. Rakenteet on esitetty kuvissa 24 ja 25.

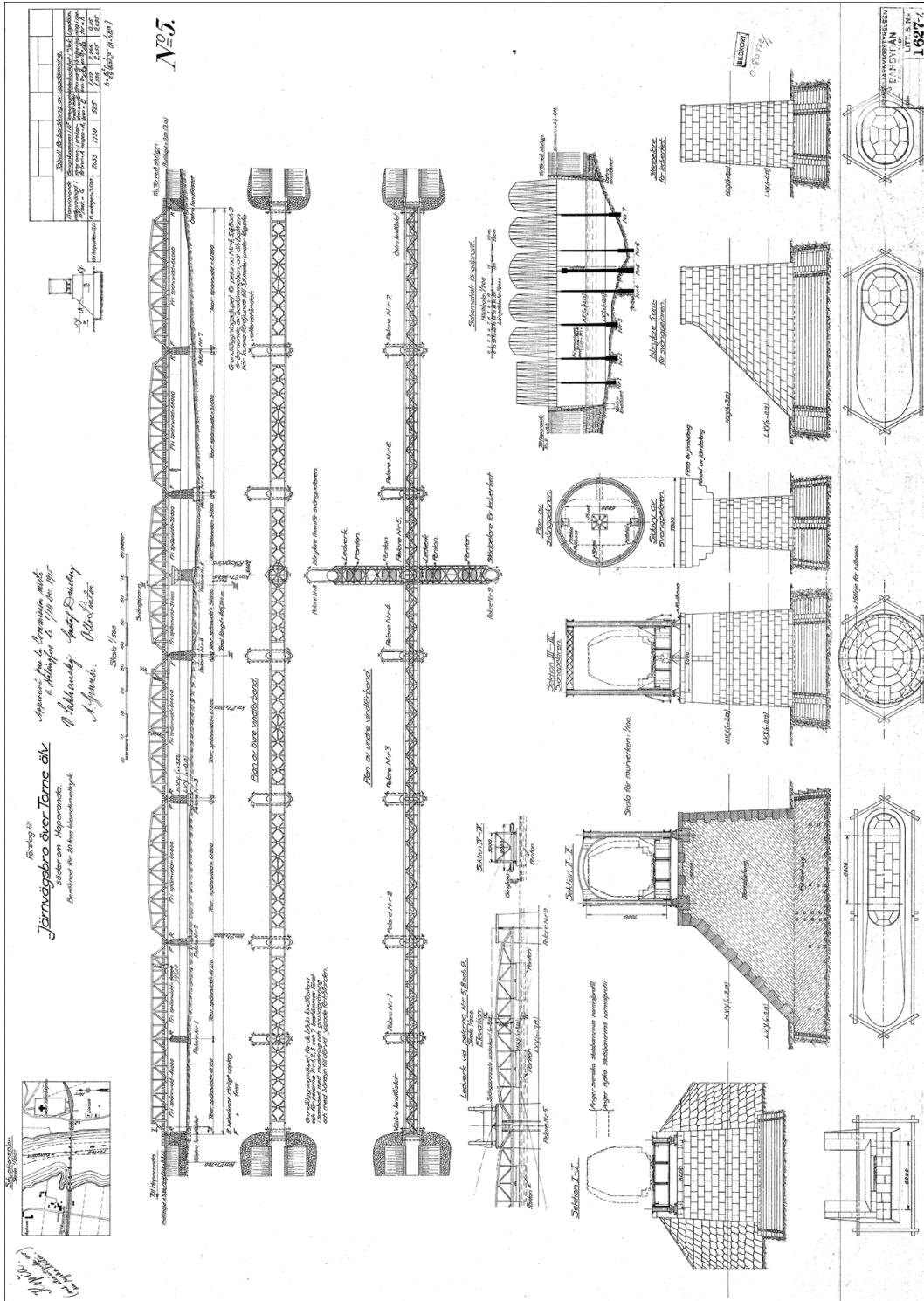


Viime vuosisadan alussa jäät saattoivat tulla keväällä voimalla alas koko Tornionjoen leveydeltä aina rautatiesillalle asti. Nykyään isot jäälautat murtuvat jäiden lähdössä pienemmiksi lautoiksi Rautatiesillan pohjoispuolella olevien siltojen virtapilareita vasten. Suuria jäälauttoja voi lähteä liikkeelle vain vajaan kahden kilometrin matkalta rautatiesillan pohjoispuolelta.

Rautatiesillan virtapilarien kuormitusten kannalta jääolosuhteet ovat helpottuneet ilmaston lämpenemisen ja jäidenlähdön luonteen muuttumisen takia viime vuosisadan alkuun verrattuna. Sillan virtapilarien jääkuormat eivät ole osoittautuneet ongelmallisiksi sen sadan vuoden käyttöaikana.



Kuva 23. Rautatiesillan sijainti Tornionjoen alajuoksulla.



Kuva 24. Arkistopiirustus Tornion rautatiesillan rakenteista.



*Kuva 25. Tornionjoen rautatiesilta Ruotsin puolelta kuvattuna.*

### **Hydrometeorologiset olosuhteet**

Vuosien 1961–1990 säätilastojen perusteella kerran viidessä vuodessa esiintynyt pakkasmäärä oli Tornion alueella noin 1750 astevuorokautta ja kerran 50 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä noin 2500 astevuorokautta. Sittemmin ilmasto on lämmennyt. Kovien talvien pakkasmäärälukemat ovat pienentyneet ehkä 500 astevuorokautta.

Lämpenemistrendi tulee todennäköisesti jatkumaan, mutta tämä ei ole varmaa. Tornionjoen yläjuoksulla pakkasmäärät ovat korkeampia kuin Torniossa.

Jäiden muodostumisen aikoihin marras–joulukuussa Tornion veden korkeus on suuruusluokkaa 1 metri N 2000 ja virtaama luokkaa 200 m<sup>3</sup>/s. Talven kuluessa veden korkeus laskee puolisen metriä ja virtaama tyypillisesti alle arvon 100 m<sup>3</sup>/s. Ennen jäiden lähtöä virtaama kasvaa voimakkaasti huhti–toukokuun vaihteessa. Veden pinta nousee. Tulvahuippu koetaan usein jäiden lähdön jälkeen. Veden korkeus nousee yleensä 1–3 m talven tasosta ja virtaama haarukkaan 2 000 – 3 500 m<sup>3</sup>/s.

Lumipeite hidastaa jään paksuskasvua. Se voi olla kohvajää mukaan lukien nykyään kovana pakkastalvena suuruusluokkaa 100 cm. Jäiden lähdön aikaan jää on jo haurastunutta ja ohentunutta. Tehollinen jään paksuus voi olla korkeintaan 80 cm:n luokkaa, tyypillisesti puolet tästä.

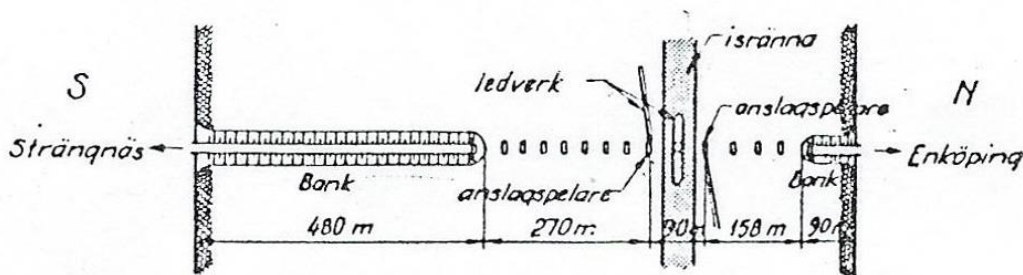
### **Terminen jääkuorma**

Pohjoismaiden silloista on dokumentoitu ainakin yksi tilanne, jonka aiheuttajaksi arvellaan termistä jääkuormaa (kuva 26). Tammikuussa 1958 Mälaren yli

Hjulstassa menevän sillan avatun väylän eteläpuolella ollut virtapilari siirtyi 4–5 cm. Jään paksuus oli 22 cm ja ilman lämpötila oli noussut – 20 asteesta – 6 asteeseen kahdessa tunnissa. Kuormaksi arvioitiin 3 MN, 270 kN/m /20/.

Jos jään keskilämpötila nousi 5 astetta (jään lämpenemisessä on hitautta), 750 metrin matkalta tulee teoriassa työntöä noin 20 cm kohti avattua väylää. Penger ja muut etelärannan puoleiset virtapilarit rajoittivat merkittävästi työntöä virtapilarin kohdalla.

Joka tapauksessa siirtymä palautui lähes kokonaan, kun jää murrettiin myös virtapilarin eteläpuolelta!



*Situationsskiss av bron över Mälaren vid Hjulsta.*

*Kuva 26. Tilanne, jossa termisten jääkuormien on arvioitu siirtäneen sillan virtapilaria.*

Tornion joessa rautatiesillan kohdalla on kohtalainen virtaus jää muodostuksen aikoihin. Jään muodostus alkaa rannoilta. Jää voi olla rantavyöhykkeessä hyvinkin 20–30 cm paksua ja joskus lähes lumetonta keskimmäisten silta-aukkojen ollessa vielä auki.

Pohjaprofiilista päätellen suurimman termisen kuormituksen kohteeksi voivat tässä tilanteessa joutua virtapilarit 3, 4, 6 ja 7 sulan sijainnista ja vedenkorkeudesta riippuen. Jää voi puskea virtapilareita vasten maksimissaan noin sadan metrin matkalta kohti sulaa. Jos jään keskilämpötila nousee vuorokaudessa poikkeukselliset 8 astetta, reunan teoreettinen siirtymä kohti sulaa on 4 cm.

Tässä tapauksessa jään reunan siirtymä ei kuitenkaan laukea nopeasti väylän avaamisen yhteydessä. Jään siirtymämatkakin on merkittävästi lyhyempi kuin Hjulstassa. Paine kehittyy lämpötilan noustessa hitaasti ja jää viruu virtapilaria vasten.

Virtapilareissa tapahtuu myös siirtymää paineen alla. Perustuksen elastisen kiertymän ja vaakasiirtymän summa voi olla sillan pituussuunnassa jään vaikutustasossa suuruusluokkaa 1–2 cm/MN pohjaolosuhteista riippuen. Termiset jäänpaineet jäävät tässä tapauksessa arvoon 100 kN/m tai sen alle riippuen pohjan jäykkyydestä.

Kuormia yhdisteltäessä on huomattava, että jos joku toinen kuorma vaikuttaa samaan suuntaan kuin terminen jään paine, lisäsiirtymä pienentää voimakkaasti jään painetta jäälevyn vastatessa uuteen kuormaan elastisesti.

Talven edetessä keskimmäisetkin silta-aukot jäätyvät. Jää peittyy lumeen nostaen jään lämpötilaa ja vaimentaen sen lämpötilavaihteluita. Jäähän syntyvät halkeamat

puskuroivat jään paineita. Virtapilarit saavat jäätä tukea molemmilta puolilta. Rannat ovat talven vedenkorkeuksilla loivat. Rakenteisiin kohdistuvat termiset jään nettopaineet eivät nouse alkutalven arvoihin.

### **Jään taivutushalkeilun aiheuttama työntö**

Tornionjoen sillan tapauksessa vedenkorkeuden muutokset ovat normaalisti talvella vähäisiä. Tyypillisesti vesi laskee hitaasti talven mittaan.

Syksyllä vesi voi nousta Perämeren perukassa etelän puoleisessa myrskyssä niin korkealle, että se nousee myös sillan kohdalla. Jää on kuitenkin ohutta ja työntö jää vähäiseksi. Sydäntalvella tämä on epätodennäköistä, koska Perämeri on jäässä. Keväällä veden korkeuden lähdettyä uuteen nousuun paksu jää on lämmintä, eikä jään muodostusta tapahdu halkeamissa.

Joka tapauksessa rantavyöhykkeessä ja virtapilarien kohdalla tapahtuu talven mittaan vain muutama kunnon jään halkeamatapahtuma (kuva 8). Jatkuvaa työntöä ei synny. Vastavoimaa löytyy rannoista ja viereisistä virtapilareista. Kuormitustaus ei ole määräävä rakennesuunnittelussa.

### **Jäiden lähtö**

Paikallistiedon mukaan jäät sulavat usein lähes paikoilleen rautatiesillan kohdalla ja pohjoispuolella ennen kuin jäät tulevat pohjoisesta Tornion jokea alas. Jääpatoja on syntynyt erityisesti Hällälän alueella, missä jäät purkautuvat mereen ja Hannulan sillan alueella. Näillä alueilla on joskus sahattu jäitä jäiden lähdön helpottamiseksi.

Jäiden lähtötilanteessa Tornionjoen vesi on tyypillisesti lämmennyt muutaman asteen edistään sulamista. Virtaama on kasvanut huomattavasti ja vesi on noussut. Jää on irronnut rannoista.

Jäiden lähdön luonne vaihtelee eri vuosina. Joinain vuosina jäät sulavat pitkälle ennen jäiden lähtöä ja liikkuvat pieninä lauttoina. Toisina vuosina taas liikkeelle lähtevässä jäämassassa voi olla suuria vahvoja jäälauttoja, jotka murtuvat pieniksi lautoiksi Hannulan sillan, maantiesillan ja kevyen liikenteen sillan virtapilareita vasten.

Siltasuunnittelussa ollaan kuitenkin kiinnostuneita ääritilanteista. Tällainen voi syntyä, jos talvi on kylmä ja luminen. Kevättalvella Tornionjokilaaksoon saapuu poikkeuksellisen voimakas lämpöaalto. Lumi sulaa, vesi nousee Tornionjoessa, vahvat jäät irtoavat rannoista ja lähtevät voimalla liikkeelle kohti merta. Tällaisia jäiden lähtöjä on nähty muun muassa Pohjois-Amerikassa.

Kuvassa 27 on esitetty kuvakaappauksia jäiden lähdöstä Simojoesta jääpadon laukeamisen yhteydessä. Ylimmästä kuvasta nähdään, että päävirran jäämassassa on ahtaumia ja suuria jäälauttoja. Rannan tuntumassa on väljempää. Keskimmaisessä kuvassa nähdään jäälautan taivutusmurto virtapilarin jäänsärkijää vasten ja alimassa kuvassa lohkarejään käyttäytymistä virtapilarin edessä.



*Kuva 27. Kuvakaappauksia jäiden lähdöstä Simojoesta jääpadon laukeamisen yhteydessä vuonna 2014 (lähde Ylen arkistofilmi).*

Kun iso jäälautta murtuu virtapilaria vasten, sitä ajaa kineettinen energia, virtaavan veden kitka ja lohkarejään paine takaa. Jos kyse on liikkuvasta jäestä, kineettinen energia on ensin pääroolissa. Virtaavan veden kitkan ja takaa tulevan jään paineen merkitys kasvaa jäälautan vauhdin hidastuessa. Jos on kyse virtapilarien eteen muodostuneen jääpadon murtumisesta, jälkimmäiset tekijät ovat pääroolissa.

Jää voi murtua kaltevaa virtapilaria vasten taivutusmurto- tai leikkausmurtomekanismilla (kuva 14). Lämpimän jään leikkauslujuus vaihtelee paljon sulamisasteen funktiona. Taivutusmurtomekanismiin liittyvä kuorma tunnetaan paremmin. Jos kuorma lasketaan taivutusmurtomekanismille, ollaan mahdollisen leikkausmurron suhteen varmallalla puolella.

Kuvassa 28 on esitetty jään murron perusskenaariot taivutus- ja leikkausmurtomekanismeille, kun jäälautta on suuri ja sen tulosunta on kohtisuoraan sillan pituussuuntaan nähden. Tornion rautatiesillan jäänsärkijöiden etureuna on kallistettu 45 astetta. Oletetaan poikkeustilanteen jään teholliseksi paksuudeksi  $h = 0.8$  m. Kaavalla 9 laskettu horisontaalikuorma virtapilarin etureunaa vasten on 1.0 MN ( $\sigma_f = 0.5$  MPa,  $D = 5$  m,  $D_t = 3$  m,  $h_R = 1.6$  m,  $\mu = 0.2$ ). Yleensä tehollinen jään paksuus on huomattavasti tätä pienempi ja kuorma alle puolet edellä mainitusta.

Jäälautat voivat kuitenkin halkeilla ja joka tapauksessa kuorma on pyöreää jäänsärkijää vasten jossain määrin epäkeskinen (kuva 28). Jäänmurtajarakenteeseen kohdistuu siis hetkittäin myös sillan pituussuuntainen jääkuormakomponentti, joka jää ääritapauksessakin alle arvon 0.5 MN.

Kun osin murtunut jäämassa puristuu virtapilarien väliin, tästäkin aiheutuu sillan pituussuuntaisia kuormia, joskin molemmilta puolilta. Oletetaan lohkarejäämässän kitkakulmaksi 25 astetta ja koheesioksi 1 kPa. Passiivipainemurtuman aiheuttaminen (siis lohkarejäakerroksen puristaminen kasaan) metrin paksuun jääkerrokseen vaatii voiman 4 kN/m, kaksi metriä paksuun jääkerrokseen 9 kN/m ja kolme metriä paksuun jääkerrokseen 16 kN/m.

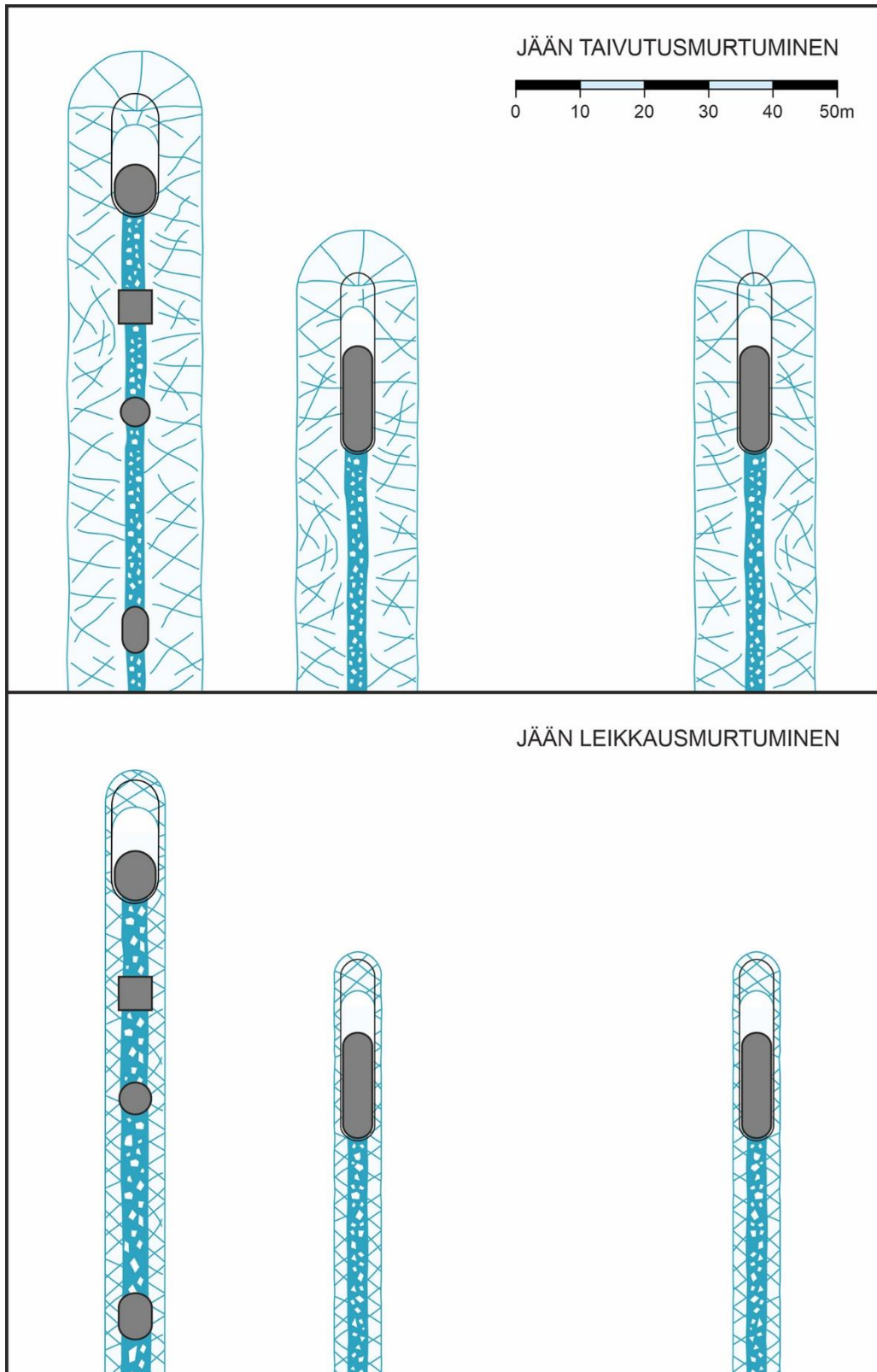
Perusskenaarioihin (iso jäälautta liikkuu virtapilarien pituussuunnassa) liittyvä sillan pituussuuntainen kuormakomponentti jää ääritilanteissakin alle arvon 0.5 MN.

Jäälautta ei kuitenkaan törmää virtapilariin välttämättä kohtisuoraan rautatiesillan pituussuuntaan nähden. Rantamatalikot, jääahtautumat ja virtaukset voivat ohjata jäälauttaa siten, että sen liikesuunta on loivassa kulmassa virtapilarien suuntaan nähden. Nämä tekijät voivat myös kierrättää lauttaa. Myös virtapilarit voivat kierrättää jäälauttaa epäkeskisessä törmäyksessä.

Kuvassa 30 on esitetty kaksi monista tähän liittyvistä skenaarioista. Sillan pyöreään keskitukeen on ylipäättänsä vaikeaa osua. Sen sijaa iso loivasti vauhdilla tuleva jäälautta voi murtua paitsi jäänsärkijää, myös tavallisen virtapilarin jyrkkää sivua vasten, jos jää murtuu jäänsärkijää vasten leikkausmurtomekanismilla (ränni on ahdas).

Jään kontakti jyrkkään sivuun on tässä tilanteessa huono. Rakenne pyrkii ohjaamaan jäälauttaa, mutta iso lautta on liikkeissään hidas.

Jään murtuminen virtapilarin jyrkkää sivua vasten voi tapahtua myös jäälautan ollessa kiertoliikkeessä.



*Kuva 28. Perusskenaariot suuren jäälautan murtuessa virtapilareiden jäänsärkijäitä vasten taivutusmurtomekanismilla ja leikkausmurtomekanismilla jään liikesuunnan ollessa kohtisuoraan sillan pituussuuntaan nähden. Jälkimmäisessä tapauksessa murrettu ränni jää ahtaaksi.*

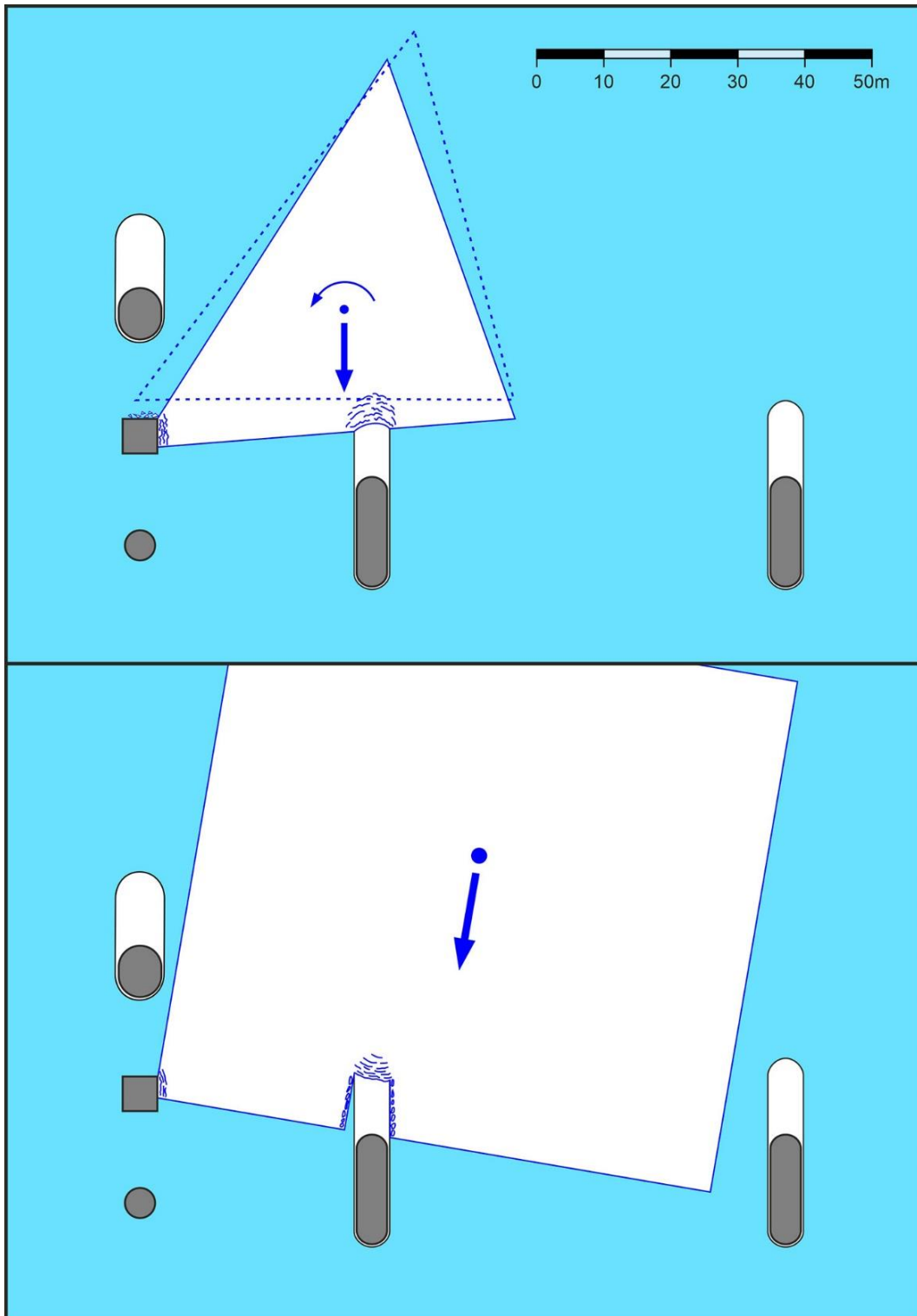




*Kuva 29. Pienehkön jäälautan murtuminen sillan virtapilaria vasten. Huomaa jääkuorman epäkeskisyys poikittaiskomponentteineen sekä pienen jäälautan halkeaminen (valokuva F.D. Haynes).*

Tässä kerran sadassa vuodessa tai harvemmin toistuvassa paksun jään ja poikkeuksellisen lämpöaallon synnyttämässä jäidenlähtötilanteessa on syytä varautua 1.5 MN:n suuruusluokkaa olevaan hetkelliseen sillan pituussuuntaiseen jääkuormaan.

Kuormia yhdisteltäessä on syytä ottaa huomioon, että kyseessä on harvinainen muutamia sekunteja kestävä kuormitustapausta. On epätodennäköistä, että sillalla olisi juuri silloin juna ja vielä paljon epätodennäköisempää, että se juuri silloin jarruttaisi voimakkaasti. Kyseistä kuormitustapausta voi käsitellä kuin onnettomuuskuormaa.



*Kuva 30. Idealisoituja jään murtumisskenaarioita rautatiesillan virtapilareita vasten, kun jää iskee epäkeskeisesti ja vinosti sillan virtapilareita vasten.*

Yhteenvetona edellisestä voidaan todeta, että Tornionjoen rautatiesilta on ollut käytössä jo yli sata vuotta ilman virtapilareiden stabiliteettiin liittyviä ongelmia. Jääolosuhteet ovat rautatiesillan kohdalla nykyään helpommat kuin viime vuosisadan alkupuolella. Toisaalta voimakkaan lämpöaallon synnyttämän sydäntalven jäidenlähdön todennäköisyys on kasvanut ilmastonmuutoksen seurauksena.

Alkutilvella terminen jääkuorma on sillan pituussuunnassa merkittävin jääkuormitustapaus. Tornionjoki voi olla tässä tilanteessa päävirran kohdalta vielä sula. Jää pystyy työntymään kohti keskimmäisten silta-aukkojen kohdalla olevaa sulaa. Arvio tämän tilanteen jääkuormasta on korkeintaan 100 kN/m vaikutustason ollessa tyyppillinen alkutilven vedentaso (+ 1 m N2000).

On huomattava, että jos virtapilariin vaikuttaa terminen jääkuorman ohella toinen samansuuntainen ja lyhytkestoinen kuorma, jääkansi vastaa jälkimmäiseen elastisesti. Jääkannen elastista siirtymää  $dx$  keskellä kuorman alla voidaan kimmoteoriaa soveltamalla arvioida kaavalla

$$dx = F (2 \ln (D/B) - (2 - \nu)) / (n E h) \quad (12)$$

missä

$F$  = kokonaisjääkuorma  
 $D$  = etäisyys referenssipisteeseen jääkuorman alla  
 $B$  = kuormitusleveys  
 $\nu$  = jään suppeusluku  
 $E$  = jään kimmokerroin  
 $h$  = jään paksuus

Jos kokonaisjääkuorma  $F$  on 1.6 MN,  $D = 60$  m,  $B = 16$  m,  $\nu = 0.33$ ,  $E = 5\,000$  MPa (ohut teräsjää, alhainen jännitystaso) ja  $h = 0.3$  m, jääkannen elastinen siirtymä  $dx = 0.33$  mm. Toisin sanoen, kun lyhytkestoinen kuorma on aiheuttanut tämän suuruisen lisäsiirtymän, terminen jääkuorma on pudonnut nolnaan.

Tästä syystä terminen jääkuorma ja esimerkiksi virtapilariin kohdistuva jarrukuorma voidaan käsitellä erillisinä kuormitustapauksina. Niitä ei tarvitse yhdistellä.

Sydäntalvella koko joki on jäässä. Virtapilarit saavat tukea toisistaan ja rannoista. Terminen jääkuorma ja jään taivutushalkeilun aiheuttama kuorma jäävät alle edellä mainitun terminen jääkuorman.

Poikkeuksellisen jäidenlähden yhteydessä sillan virtapilarin pituussuuntainen (sillan poikkisuuntainen) horisontaalijääkuorma on perustapauksessa 1 MN ja poikkisuuntainen alle 0.5 MN. On olemassa kuitenkin mahdollisuus, että iso vahva jäälautta ajautuu vauhdilla loivassa kulmassa virtapilaria vasten ja että jään leikkausmurron takia murrettu ränni on ahdas. Tässä tapauksessa on syytä varautua 1.5 MN:n suuruisen sillan pituussuuntaiseen jääkuormaan. Vaikutustasoksi voi olettaa molemmissa tapauksissa + 2.5 m N2000.

Dynaaminen kuormitustapaus on harvinainen ja lyhytkestoinen. Tässäkään tapauksessa sitä ei tule yhdistää esimerkiksi junan jarrutuskuorman kanssa.

### 4.3 Kirjalansalmen silta

Kirjalansalmen vanhaa siltaa ollaan korvaamassa uudella sillalla. Sillan sijainti Turun sisäsaaristossa on esitetty kuvassa 31 ja uuden sillan rakenteet kuvassa 32. Vanhan sillan rakenteet tullaan purkamaan uuden valmistuttua.

Historiatiedon (1961–1990) perusteella kerran kahdessa vuodessa toistuva pakasmäärä alueella on noin 500 astevuorokautta ja kerran viidessäkymmenessä

vuodessa toistuva pakkasmäärä noin 1450 astevuorokautta. Kuukauden keskilämpötila on ollut tammi-helmikuussa noin  $-6\text{ C}$  ja joulukuussa sekä maaliskuussa noin  $-3\text{ C}$ . Lämpenemisen seurauksena kerran sadassa vuodessa esiintyvä pakkasmäärä voidaan nyt olettaa olevan luokkaa 1000 astevuorokautta.

Tuulet ovat kohteessa huomattavasti heikompia kuin avomerellä. Kun avomerellä raivooa kunnan myrsky (10 minuutin keskituulennopeus  $24\text{ m/s}$  korkeudella  $10\text{ m}$ ), kohteessa tuulen nopeus on luokkaa  $16\text{ m/s}$  (kts. /7/). Tämä tapahtuu arviolta kerran vuodessa tai harvemmin.

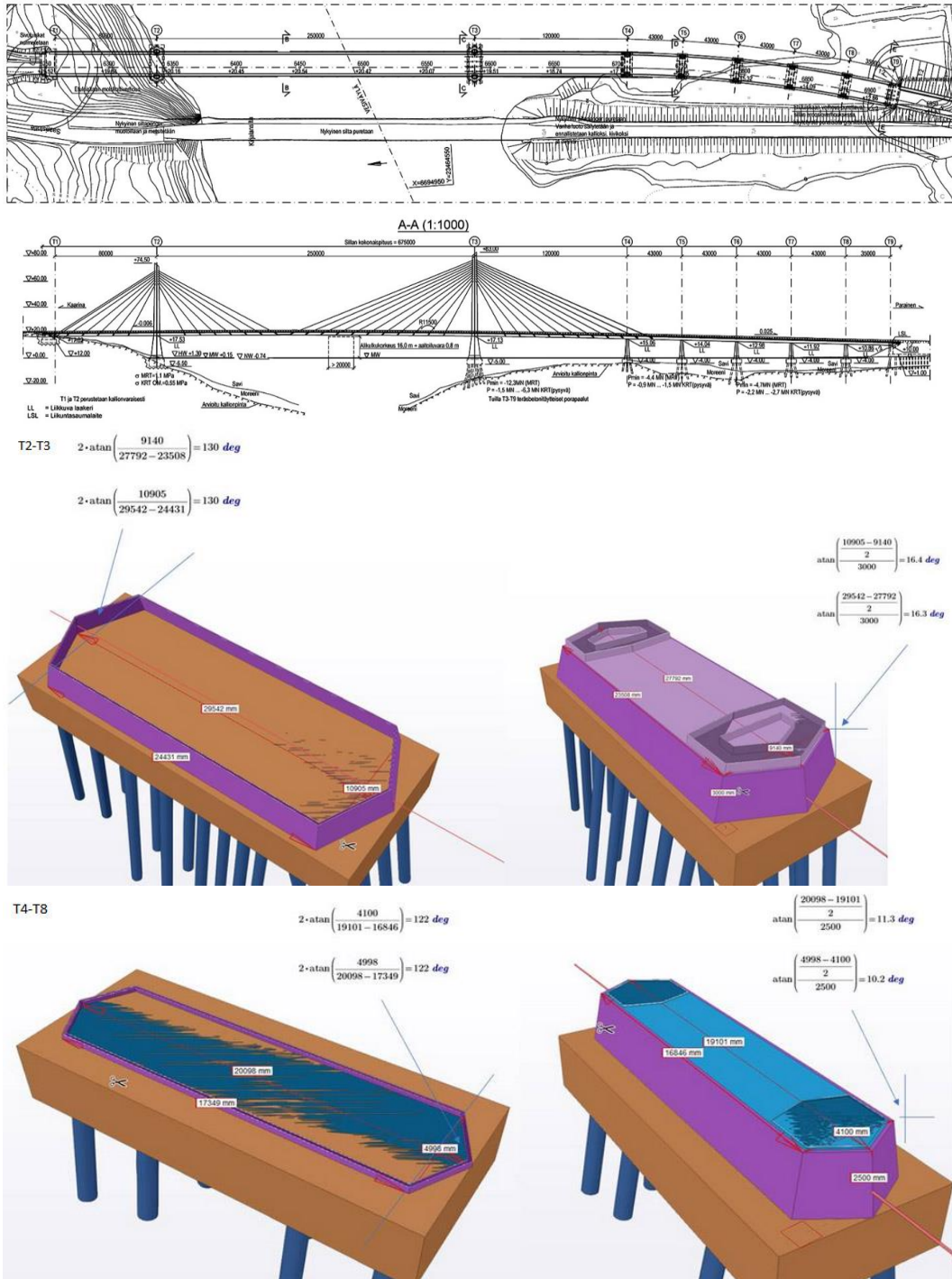
Virtaukset Kirjalansalmessa ovat heikohkoja lähteen /21/ perusteella ja karttaa katsoamalla (ei suuria vesialueita salmen takana).

Vedenkorkeuden vaihtelurajat kohdealueella ovat historiatiedon perusteella noin  $+1.3\text{ m}$  ...  $-0.8\text{ m}$  MW. Maalis-huhtikuussa vedenkorkeuden vaihtelu on kuitenkin tilastollisesti pienempää. sadan vuoden perspektiivillä keskiveden korkeuteen liittyy epävarmuutta, joka kuvien 5 ja 6 perusteella on luokkaa  $\pm 0.6\text{ m}$ .

Kirjalansalmessa kulkee sillan ali meriväylä, jonka tuleva käyttö ei ole tiedossa.



Kuva 31. Kirjalansalmen sillan sijainti Turun saaristossa.



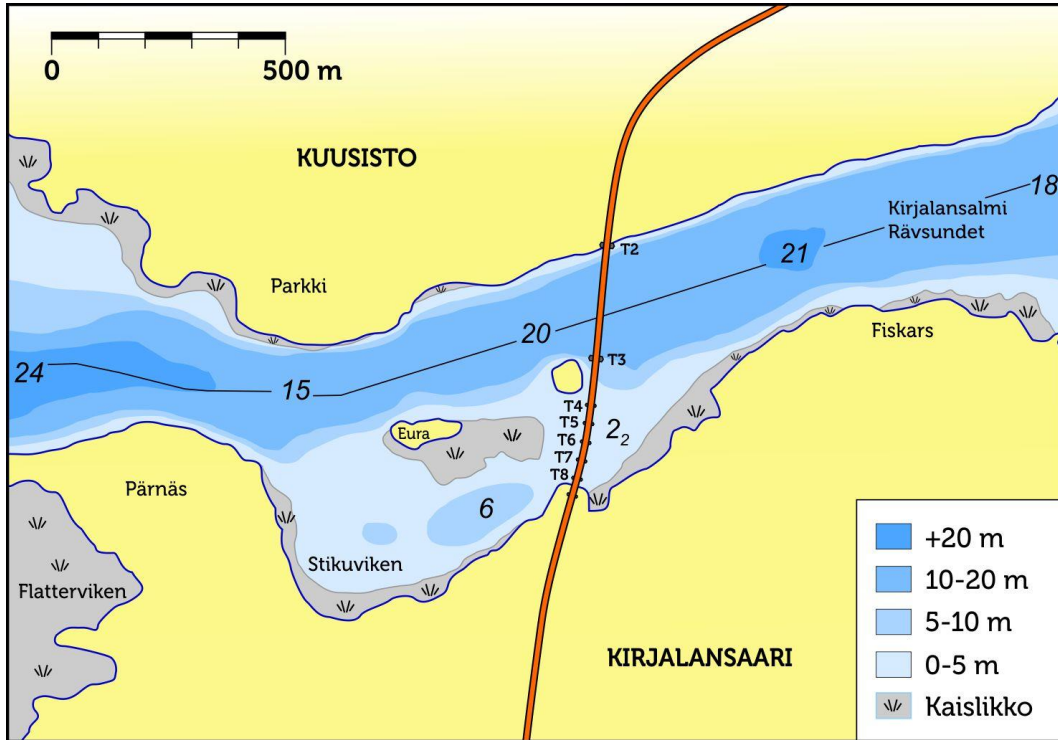
Kuva 32. Kirjalansalmen uuden sillan rakenteet.

### Jääolosuhteet Kirjalan salmessa

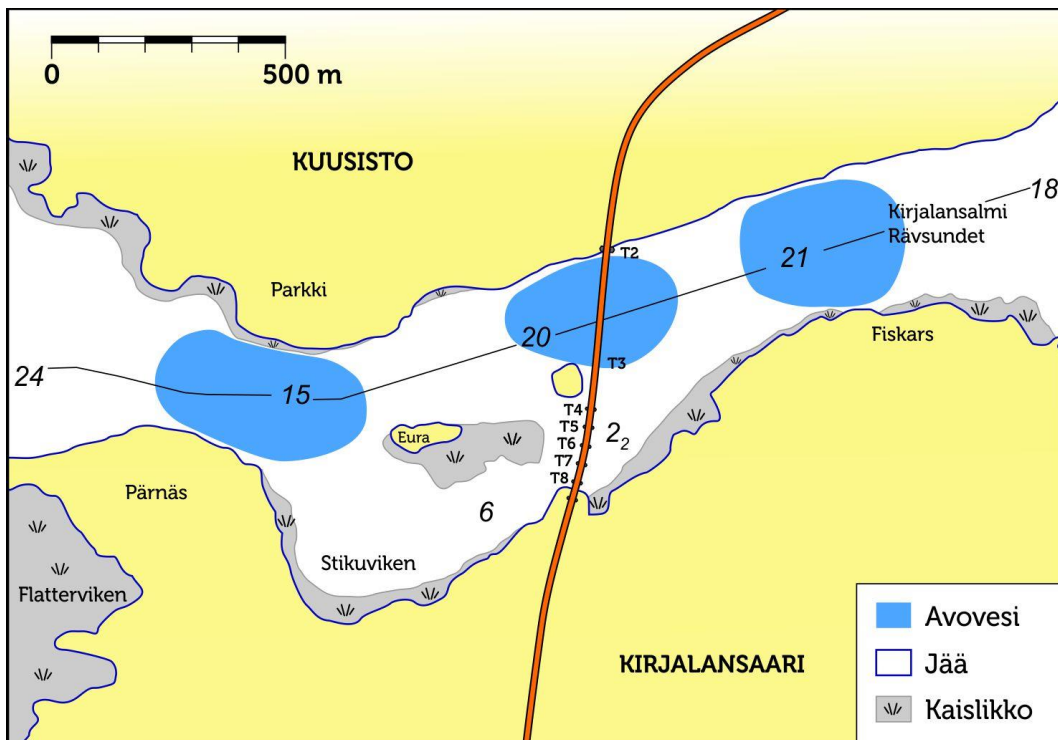
Kohde sijaitsee sisäsaaristossa. Tilanne salmessa vanhan sillan purkamisen jälkeen on esitetty kuvassa 33. Jää stabiloituu nopeasti sisäsaaristossa alkutalvesta. Jäätalven pituus kohteessa on nykyään keskimäärin luokkaa 3 kuukautta.

Kaikkina talvina, esimerkiksi talvena 2020, ei kohteessa ole juuri lainkaan jäätä. Kovina jäätalvina jään maksimipaksuus voi ylittää 0.6–0.7 metriin, josta osa voi olla kohvajäätä. Viime vuosikymmenten ankarimpien jäätalvien 2003 ja 2011 sekä erityisen ankaran jäätalven 1987 kehitys alueella on esitetty liitteessä 4.

Kuvassa 34 on esitetty mahdollinen jäiden lähtöä edeltävä tilanne Kirjalan salmessä. Jäät ovat jo pitkälti haurastuneet ja sulia alueita on ilmaantunut salmeen. Jäät sulavat lähes paikoilleen. Vain pienehköt pitkälti haurastuneet ja ohentuneet lautat liikkuvat salmessa ennen jäiden lopullista sulamista.



Kuva 33. Kirjalan salmi ja meriväylä sen jälkeen, kun uusi silta on rakennettu ja vanha silta purettu.



Kuva 34. Tyypillinen jäiden lähtöä edeltävä tilanne Kirjalan salmessa.

## Dynaamiset jääkuormat

Merkittävien dynaamisten jääkuormien esiintyminen tällaisessa ahtaassa salmessa on kyseenalaista. Tuulen ja virtausten ajovoimat jääkanteen jäävät väkisinkin pieniksi. Liikkuvien jäälautojen koko, lujuus ja liike-energia jäävät pieniksi.

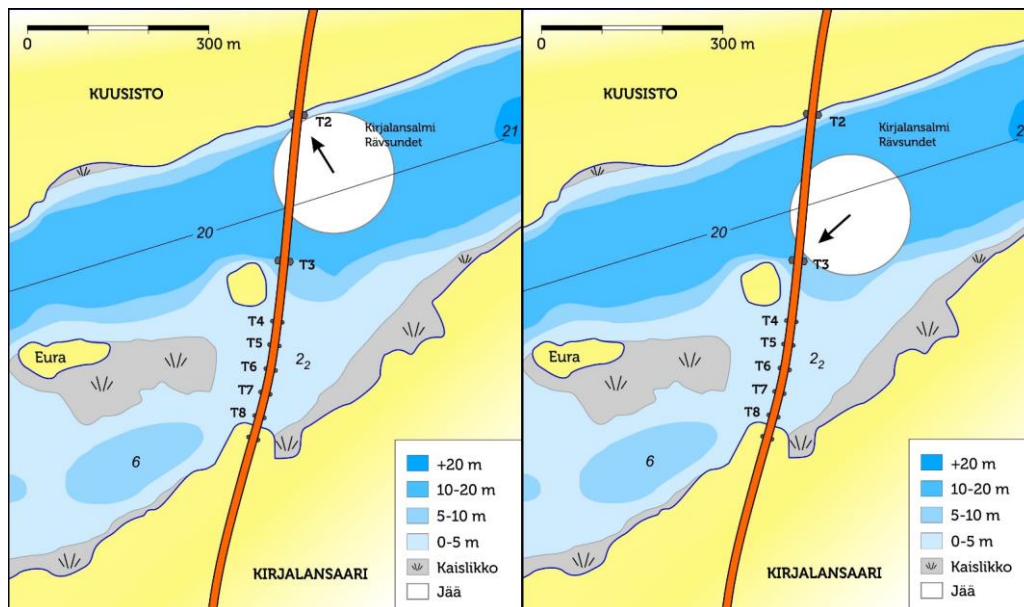
Oletetaan kuitenkin ensiksi, että 0.5 metriä paksu jäälautta voisi törmätä riittävällä kineettisellä energialla tukeen T2 tai T3. Kaavan 7 ja kuvan mukaan jääkuormaksi tulisi

$$H_{\max} = (1.1 \times 0.6 \times 10.2 \times 0.5 \times 0.25 \times \tan 73.7) / \sin 65 = 3.2 \text{ MN}$$

Edellä kontaktikertoimeksi on oletettu 0.6 ja jään leikkauslujuudeksi 0.25 MPa.

Oletetaan seuraavaksi, että jonkun ennakoimattoman tapahtumaketjun seurauksena sillan virtapilaria T2 tai T3 vasten ajautuisi tuulen ja virtauksen vaikutuksesta 0.3 m/s nopeudella 0.5 m paksu jäälautta, jonka halkaisija on 200 metriä (kuva 35). Lautan liike-energia on hydraulinen lisämassa mukaan lukien

$$E = 0.5 \text{ m} \cdot v^2 = 0.5 \times 31400 \text{ m}^2 \times 600 \text{ kg/m}^2 \times (0.3 \text{ m/s})^2 = 850\,000 \text{ Nm} = 0.85 \text{ MNm}$$



Kuva 35. Tuulen ja virtausten ajamien jäälautojen törmäysskenaarioita tuliin T2 ja T3.

Täysi kuorma kehittyi vähitellen. Lautan etureuna on ohuempi ja hauraampi kuin keskiosa ja kontaktiala kasvaa tunkeutuman funktiona. Oletetaan, että kuorma saavuttaa maksimiarvon 3.4 MN tunkeutumalla 3 m ja että kuorma kasvaa lineaarisesti tunkeutuman funktiona. Jäälautan kineettinen energia on syöty, kun tunkeutuma on 1.2 m ja voima 1.5 MN.

Tässä tilanteessa on syytä varautua 2 MN:n jääiskuun, joka kohdistuu tuen nurkkaan 30 asteen kulmassa suhteessa tuen pitkään sivuun (katso kuva 29).

On hyödyllistä tarkastella näitä suuruusluokkia olevien dynaamisten jääkuormien edellytyksiä:

- Kyseessä on korkeintaan kerran kymmenessä vuodessa toistuva kova jäätalvi, jolloin kohdealueella on paksua jäätä;
- Virtapilarien ympäristö on vapaa jäistä;
- Kirjalansalmesta tai sen läheisyydestä irtoaa iso jäälautta vedenkorkeuden muutoksen, navigoinnin ja/tai muun prosessin seurauksena;
- Jäälautta on tapahtumahetkellä edelleen paksu ja vahva;
- Voimakas tuuli ja virtaus ajavat lautan vauhdilla päin tukirakennetta.

Näiden ehtojen samanaikainen toteutuminen kerran sadassa vuodessa on vähintään epävarmaa. Kyseessä on joka tapauksessa hetkellinen kuormitustapaus. Sen toteutuminen samanaikaisesti jonkun muun lyhytaikaisen kuormituksen kanssa on epätodennäköistä. Tällaista jääkuormaa voi käsitellä kuin onnettomuuskuormaa.

### **Muut jääkuormitukset**

Rakenteen vertikaalisen kuorman suuruusluokka voidaan arvioida luvun 3.1 perusteella. Ajatellaan rakenteen muodostuvan neljästä suorasta sivusta ja neljästä nurkasta. Nostovoima-arvioksi tulee 0.7 metrin jään paksuudelle

$$P = 0.01 \text{ MN/m}^3 \times (2 \times 20 \text{ m} + 2 \times 10 \text{ m}) \times (0.7 \text{ m})^2 + 4 \times 0.25 \times 1 \text{ MN/m}^2 \times (0.7 \text{ m})^2 = 0.8 \text{ MN}$$

Tällaisella harvoin esiintyvällä ja lyhytaikaisella vertikaalikuormalla ei ole merkitystä sillan suunnittelussa, vaikutti se sitten ylös tai alaspäin.

Termiset jäänpaineet liittyvät lähinnä uuteen ohueen teräsjäähän, jolla ei ole lumilumipeitettä eikä halkeamia. Salmen pohjoisranta on jyrkkä, joten jää voi puskea etelään. Ruovikon ja loivien rantojen takia etelän puolella ei synny merkittävää vastapainetta. Liike on kuitenkin rajallinen, jäässä tapahtuu hitaan lämpölaajenemisen yhteydessä rakenteen ympärillä virumista ja rakenteen siirtymä kuorman alla pienentää painetta.

Jään lämpölaajenemiskerroin on  $5 \times 10^{-5} \text{ 1/C}$  ja sillan vapaa aukko tukien T2 ja T3 välissä 240 metriä. Jos jäälevy lämpenee keskimäärin 5 astetta (pinnasta enemmän) siihen hetkeen mennessä, jolloin maksimipaine saavutetaan, teoreettinen jään reunan siirtymä on 6 cm tuen T3 kohdalla.

Jäässä tapahtuu kuitenkin tuen kohdalla virumista ja elastista muodonmuutosta. Salmen etelärannalta ja perustuksen vieressä olevalta karilta tulee tukea. Jään liike perustuksen kohdalla jää hyvin rajalliseksi.

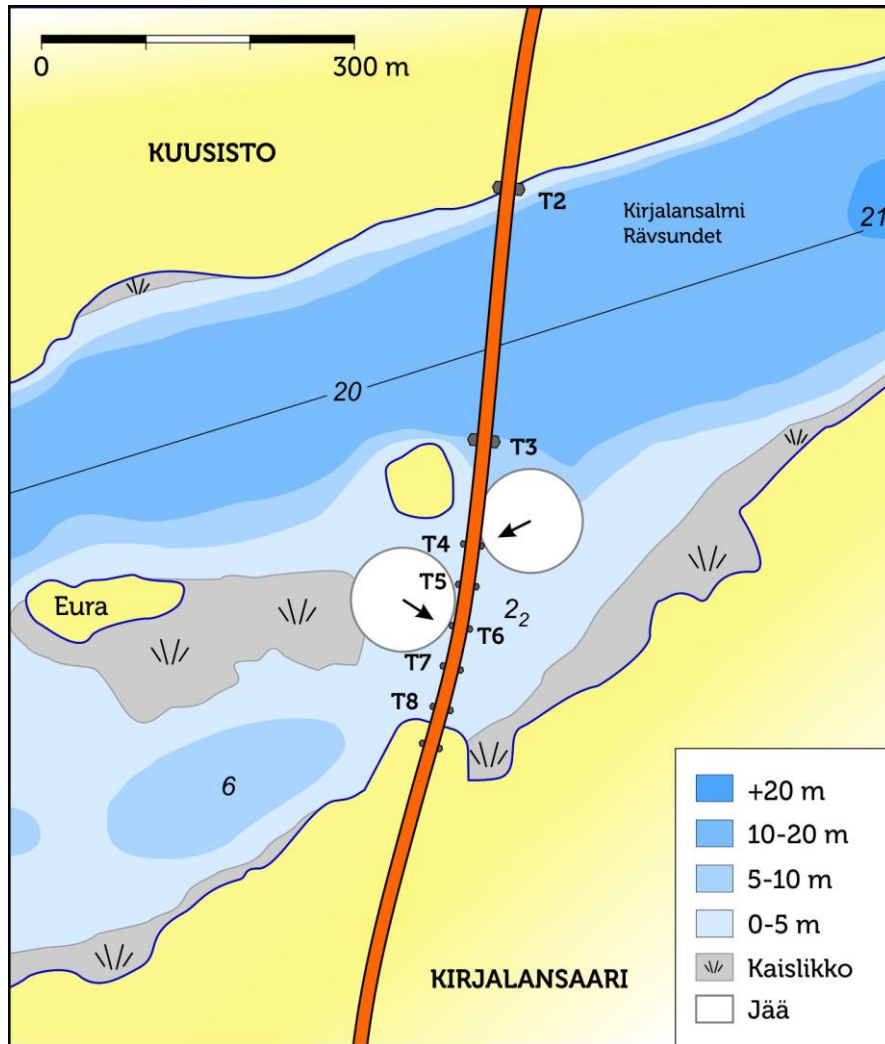
Perustuksen T3 perustusten suunnittelussa voi soveltaa sillan suunnassa kuormitusohjeen (liite 1) mukaista kuormaa 100 kN/m. Muiden perustusten kohdalla voidaan käyttää puolta tästä arvosta, siis 50 kN/m.

On huomattava, että kuorma voi vaikuttaa molempiin suuntiin. Toisin sanoen ilman lämpötilan lasku aiheuttaa jäälevyn supistumista etenkin, jos jää on paljas ja halkeamaton. Toisaalta jään kokonaisliike on rajallinen, joten rakenteen kapasiteetti ei ole kriittinen.

Kuormia yhdisteltäessä on merkille pantavaa, että jos perustukseen vaikuttaa toinen termisen jääkuorman suuntainen lyhytaikainen kuorma, terminen jääkuorma pienenee jäälevyn kimmoisen vasteen mukaisesti kohti nollaa. Termisen jääkuorman yhdistäminen muihin vaakakuormiin ei siten ole tarpeen.



Periaatteessa on mahdollista, että tuuli ajaa pieniä haurastuneita jäälauttoja tukia T4–T8 vasten sen jälkeen, kun tukia suojaava jääkuori on sulanut pois (kuva 36). Jäälauttojen liike-energia on kuitenkin pieni tuulen kitkan dominoidessa. Tässä tapauksessa voisi varautua 0.5 MN:n jääiskuun 30 asteen kulmassa perustuksen pitkän sivun kanssa. Tällaisella harvinaisella iskulla on tuskin merkitystä sillan suunnittelussa. Muut kuormitukset dominoivat.



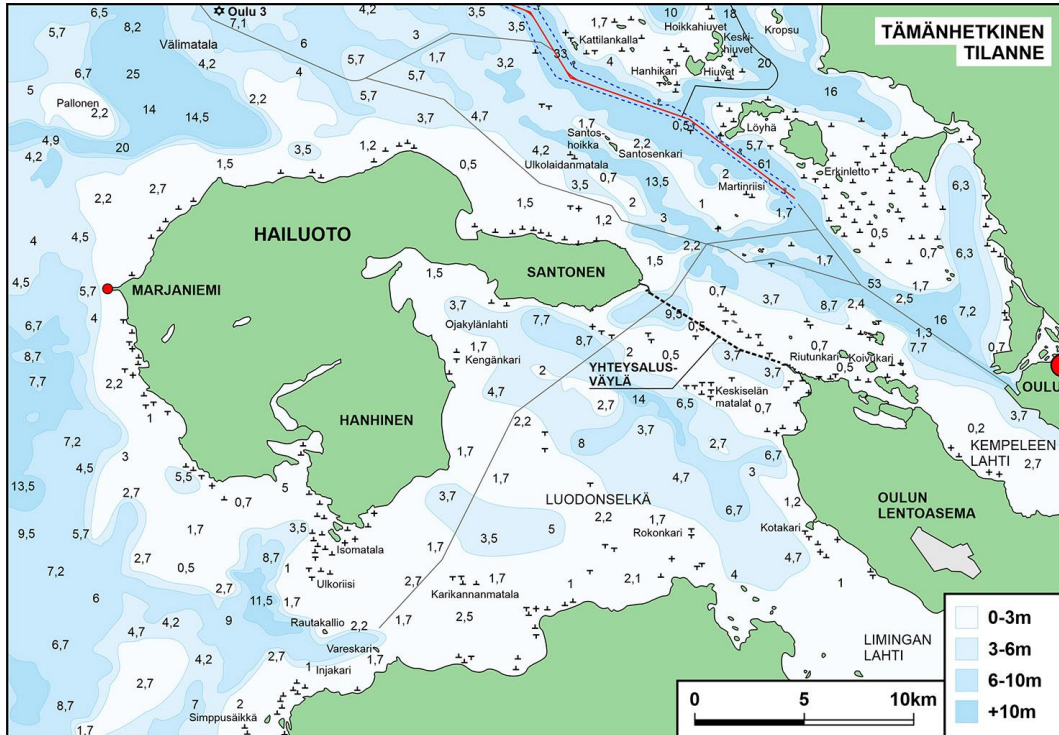
Kuva 36. Jäälauttojen törmäysskenaarioita sillan etelän puoleisiin perustuksiin.

#### 4.4 Hailuodon kiinteä yhteys, Huikun silta

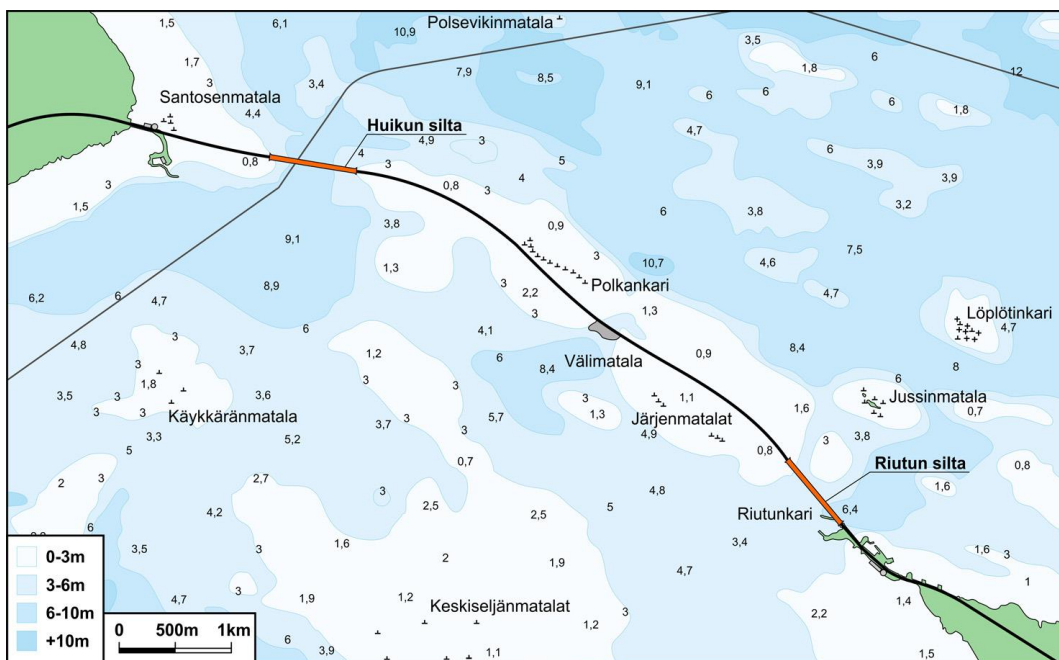
Hailuodon kiinteä yhteys mantereelle on pitkälti suunniteltu ja lupaprosessissa. Matalassa vedessä se on pengertietä. Siihen liittyy kaksi siltaa, Huikun silta ja Riutun silta. Nykytilanne alueellisessa kokonaisuudessa meri ja yhteysalusväylälineen on esitetty kuvassa 37. Suunniteltu kiinteä yhteys näkyy kuvassa 38.

Keskimääräinen pakkasmäärä kohdealueella on ollut historiatiedon perusteella noin 1 000 astevuorokautta ja kerran 50 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä noin 2 000 astevuorokautta. Ilmasto on kuitenkin lämmennyt kuten luvussa 2.4 on selvitetty.

Kohdealuetta ympäröivä maasto on melko tasaista. Tuulen kannalta aluetta voisi karakterisoida ulkosaaristoksi. Tuulen nopeuksien jakaumat ovat Hailuodon Marjaniemen ja Oulun lentoaseman nopeuksien välimaastossa (liite 5). Nähdään, että tuulen nopeudet pienenevät huomattavasti rannikkovyöhykkeessä Marjaniemestä Oulun lentoasemalle siirryttäessä.



Kuva 37. Hailuodon alue meri- ja yhteysalusväylälineen vallitsevassa tilanteessa.



Kuva 38. Hailuodon suunniteltu kiinteä yhteys lähialueineen.

Alueen vedenkorkeuden vaihtelut Oulun mareografin pitkäaikaisten mittausten perusteella maksimissaan + 1.8 m ja minimissään - 1.3 m keskivedestä. Suurimmat

vaihtelut ovat tapahtuneet tammikuussa. Keväällä vaihtelut ovat pienempiä, jäidenlähdön aikaan maksimivedenkorkeus on ollut + 0.9 m keskivedestä. Kovina pakkastalvina Perämeri on pitkään kokonaan jään peitossa. Tämä hillitsee vedenkorkeuden vaihteluja (kts. liite 2 jäätalviluonnehdintoineen).

Virtaukset ovat kohdealueella jään massiiviliikkeiden kannalta (suuressa skaalassa) heikkoja /22/.

### **Jääolosuhteet**

Pysyvä jääpeite on muodostunut kohdealueelle historiatiedon perusteella yleensä marraskuussa. Jäiden lähtö on tapahtunut huhti-toukokuussa sulan ilmestyessä ensin meriväylille, jäätä murtavan yhteysaluksen väylän kohdalle, rantavyöhykkeille ja virtapaikkoihin. Alueen kiintojää hajoaa usein ajojääautoiksi ennen lopullista jäidenlähtöä.

Jään paksuus kohdealueella saavuttaa puoli metriä tyypillisesti tammi-helmikuun vaihteessa. Maksimipaksuus saavutetaan huhtikuussa ja on nykyään tyypillisesti 0.5 – 0.7 m. Historiatiedon valossa maksimijäänpaksuus on ollut 1.1 m. Kohvajään osuus tästä voi olla 10 – 30 cm. Keväällä jäiden lähdön aikoihin jään paksuus on yleensä jo pienentynyt ja jään lujuus heikentynyt.

Erialaisten jäätalvien kehityksestä alueella saa käsityksen liitteen 6 jääkartoista. Tarkemman käsityksen saa Ilmatieteen laitoksen arkistossa olevista paikallishavainnoista.

Rakennesuunnittelussa ollaan erityisen kiinnostuneita ääritilanteista.

Alkupalvesta tällaisia on syntynyt, kun Perämeri on vielä pääosin sula, mutta Luodonselän alueella on jo teräsjäätä. Voimakas etelän puoleinen myrsky nostaa vedenpinnan yli metrin keskiveden yläpuolelle ja irrottaa jääkannen rannoilta Luodonselän alueella. Raportoiduista tapauksista näyttävin tapahtui joulukuussa 1992.

Joulukuun 19 päivä 1992 jää nousi voimakkaan etelätuulen ajamana Santosen rantavyöhykkeeseen tuhoten useita rakennuksia. Lähteen /23/ siteeraaman paikallishavainnoitsijan mukaan veden korkeus oli noussut 150 cm keskivedestä irrottaen jään rannoista. Tuulen nopeus oli ollut havainnoitsijan mukaan 28 m/s. Jään paksuudeksi on mainittu 40 cm Hailuodon ja mantereen välisellä alueella.

Kuusi päivää myöhemmin länsituuli ajoi jäät mannerta vasten länsituulella, jonka nopeudeksi on mainittu 25 m/s.

Tilanteen kehitys näkyy jääkartoilla kuvassa 29. Kiintojää, jonka paksuudeksi on kartoilla merkitty 20–30 cm, on tosiaan menettänyt stabiliteettinsa kohdealueen ympäristössä ja muuttunut ajojääksi. Marjaniemessä kymmenen minuutin maksimikeskituulen nopeudeksi mitattiin 19.12.1992 21 m/s (mittausväli 3 tuntia) ja Oulun lentoasemalla 10 m/s.

Edellä esitetty kuvaa hyvin ongelmaa epävirallisten tuulihavaintojen suhteen. Aina pitäisi olla selvää, missä tarkkaan ottaen on mitattu sekä mittarin sijaintia koskevat yksityiskohdat kuten varjostavat elementit. Vielä tärkeämpää on selvittää, onko kyse puuskatuulesta vai kymmenen minuutin keskituulesta.

Vaikka otetaan huomioon virallisten mittauksen havainnointiväli, kymmenen minuutin keskituulennopeus kohdealueella on tuskin saavuttanut arvoa 20 m/s 19.12.1992.

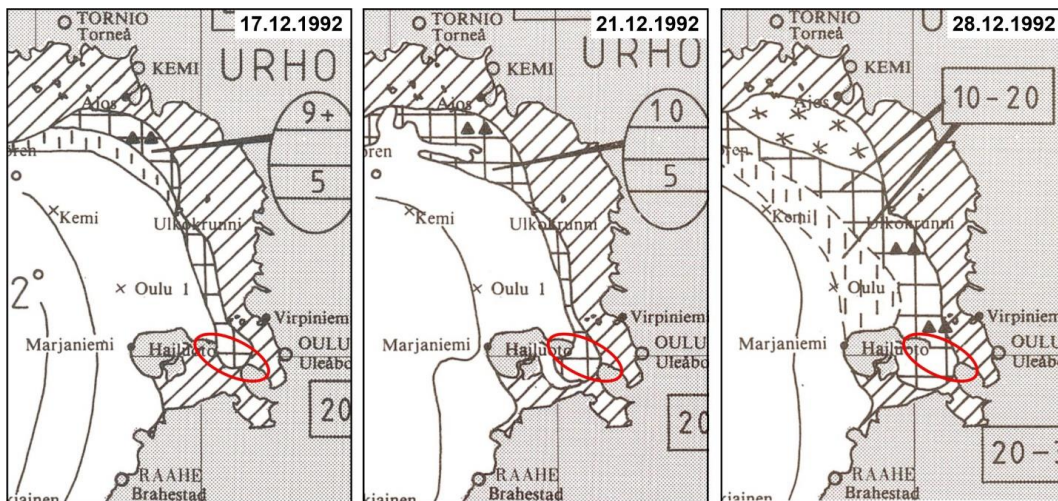
Ahti Lepistön Merentutkimuslaitokselle tekemät paikallishavainnot antavat tarkemman kuvan tilanteen kehityksestä. Jäänmuodostus kohdealueen ympäristössä alkoi jo lokakuun puolivälissä. Marraskuun alkuun mennessä kohdealue ympäristöineen oli kiintojäässä.

Marras-joulukuun vaihteessa alkoi lauha erittäin tuulinen jakso, joka nosti veden korkeutta. Kohdealueella oli aivan rantavyöhykettä lukuun ottamatta avovettä ja ajojäättä. Sen eteläpuolella oli kiintojäättä, jonka paksuudeksi oli 15.12. mitattu 30–33 cm ja pohjoispuolella tiheää ajojäättä. Myrskytilanne huipentui 17–19.12., jolloin kiintojää kohdealueen eteläpuolella lohkesi lisää ja jää nousi rannoille rantametsiin asti.

21.12. kohdealueella ja sen ympäristössä oli ajojäättä.

24.12. puhalsivat myrskyisät lounaistuulet, jotka voimistuivat ja kääntyivät luoteis-myrskyiksi 25.12. ja ajoivat jäät korkeiksi kasoiksi mantereen puoleiselle rannikolle. Oulunsalon rannalle ja pengertielle kasautuneiden jäiden paksuudeksi Lepistö oli kirjannut 35–50 cm ja murtuneiden lauttojen kooksi muutamasta neliömetristä saataan neliometriin.

Tilanteen kehitykseen vaikutti olennaisesti se, että jäät pääsivät liikkumaan kohdealueen yli pohjois-etelä suunnassa. Tätä edesauttoi jään murtaminen Oulun väylällä ja lauttaväylällä.



Kuva 39. Jäätilanteen kehitys kohdealueen ympäristössä jääkarttojen mukaan.

Paikallishavaintojen mukaan yhteysalusliikennettä haittaavia merkittäviä jään liikkeitä on esiintynyt myös jäiden lähden aikoihin.

### Sillan rakennusaikainen tilanne

Huikun sillan rakennusaikaisessa tilanteessa talvella työpenkeret on jo rakennettu. Siltojen kohdalla on paalutettu työsilta siltarakenteiden rakentamista varten. Yhteysalus on edelleen toiminnassa ja sen väylä on murrettu (kuva 30).

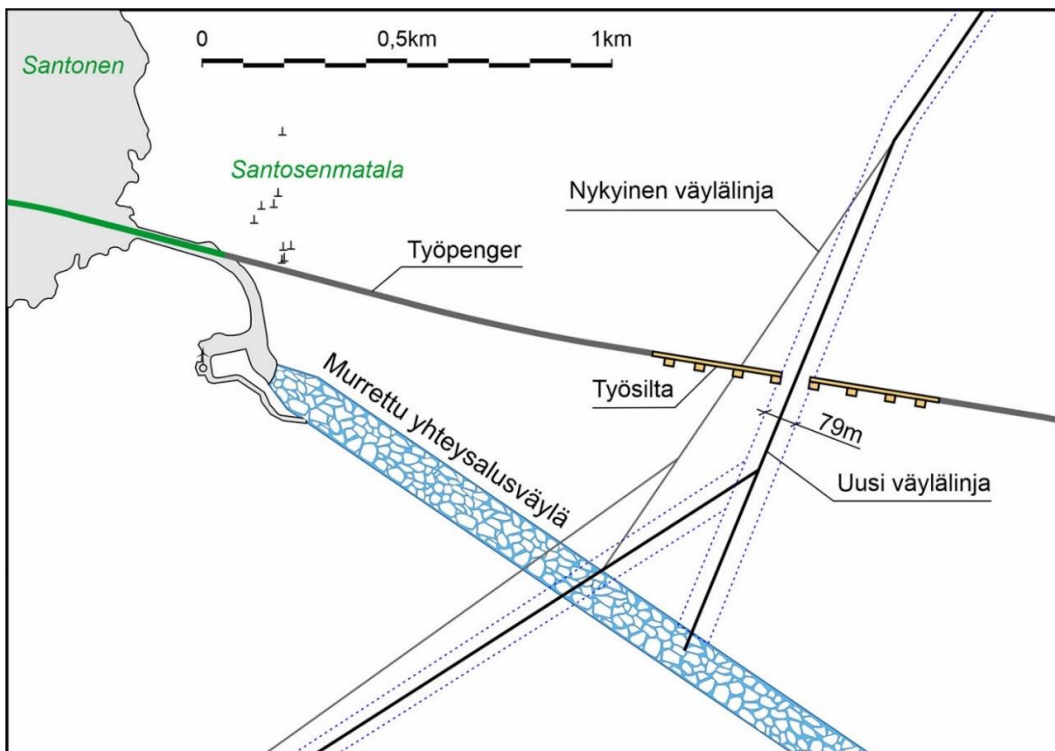
Työpenkereet stabiloivat jääkenttää kohdealueella merkittävästi. Jos kuitenkin vesi nousee poikkeuksellisen ankaran myrskyn seurauksena ja irtoaa rannoista, penkereestä ja rakenteista, jää saattaa työntyä kohti penkereitä ja työsiltaa. Tässä tapauksessa murrettu väylä toimii puskurina.

Väylällä jää ahtautuisi ja sen reunoilla esiintyisi myös jään päällekkäin ajautumista. Väylän umpeutumiseen tarvittava voima riippuu siinä olevan lohkarajakerroksen paksuudesta ja sen ominaisuuksista, jotka taas riippuvat muun muassa lämpötilasta ja sohjon määrästä. Seuraavassa on haarukoitu väylän lisäpuristamiseen tarvittavaa ajovoimaa lohkarajakerroksen paksuuden funktiona:

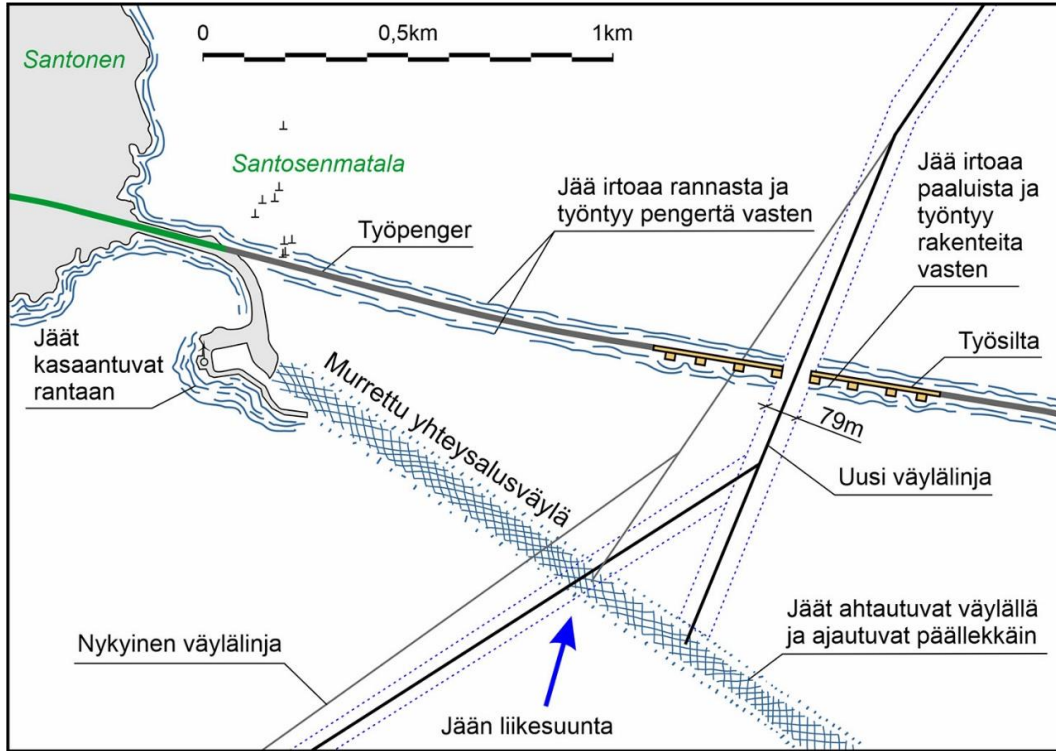
*Taulukko 1. Hailuodon yhteysaluväylän umpeutumiseen tarvittava jään ajovoima.*

Lohkarajakerroksen paksuus	Karkea lohkarajaa, korkea lämpötila, Kitkakulma 14 astetta, koheesio 0 kPa	Sohjoinen jäätyvä lohkarajaa, Kitkakulma 25 astetta, $c = 1$ kPa
1 m	0.5 kN/m	4 kN/m
2 m	2 kN/m	9 kN/m
3 m	4 kN/m	16 kN/m

Kun vapaa selkä on rajallinen ja rannatkin vastustavat tuulen ajaman jääkentän liikettä, keskimääräinen paine työsiltaa vasten jää ääritilanteessakin suuruusluokkaan 5 kN/m (kuva 31).

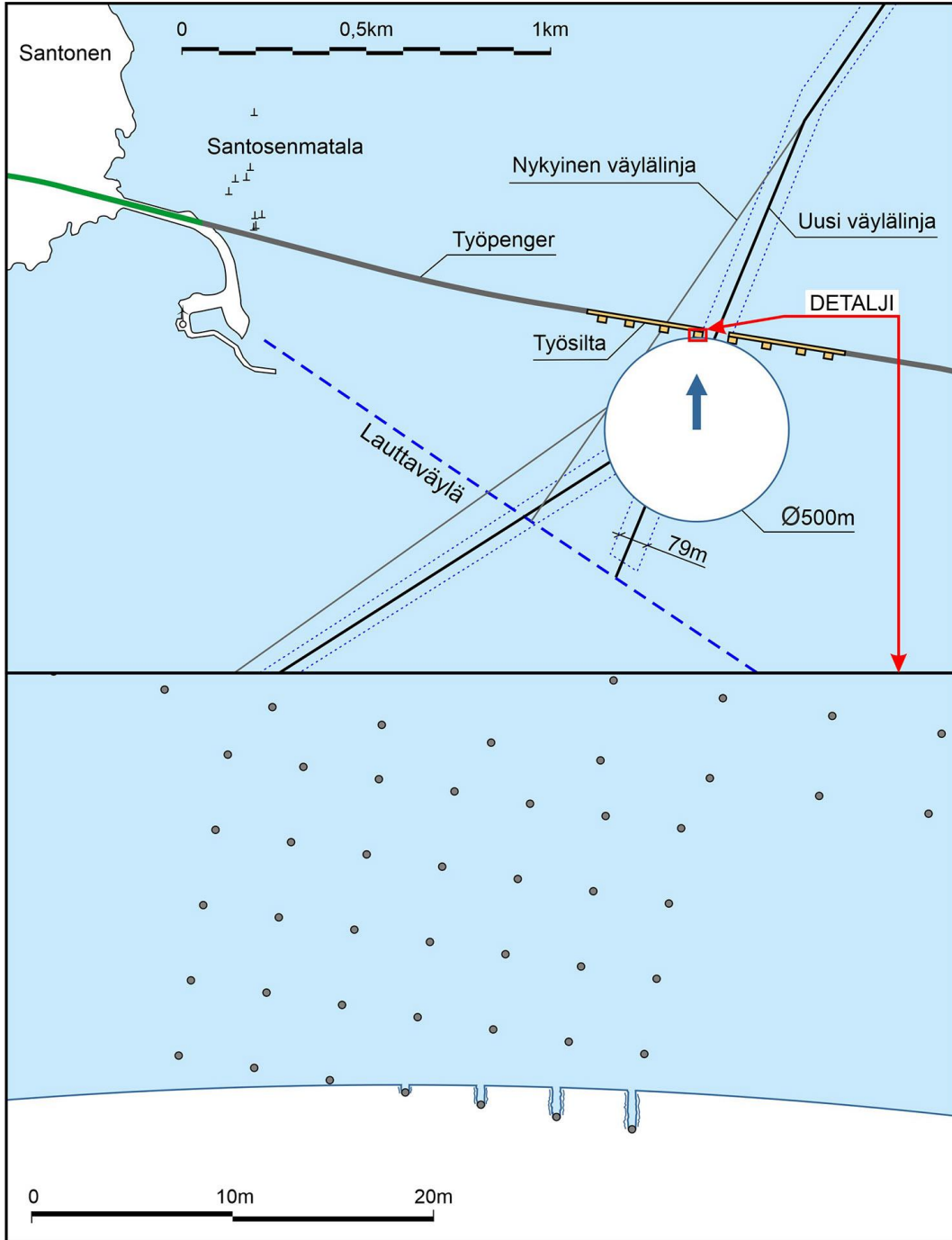


*Kuva 40. Työnaikainen tilanne Huikun sillan alueella.*



*Kuva 41. Lauttaväylän lohkarejää puristuu kasaan poikkeuksellisessa eteläpuoleisessa myrskyssä, kun korkealla noussut vesi on ensin irrottanut jääkentän rannoilta ja rakenteista.*

On myös mahdollista, että yksittäinen jäälautta osuu työsillan tukipaaluihin ( $D = 0.32 \text{ m}$ ) alkutalvesta tai jäiden lähdön aikaan (kuva 32). Yksittäisen pystypaalun jääkuormaksi arvioitiin uuden  $0.2 \text{ m}$  paksun teräsjalan tapauksessa  $240 \text{ kN}$  ja  $0.4 \text{ m}$  paksun osin sulaneen ja haurastuneen jään tapauksessa  $310 \text{ kN}$ .



Kuva 42. Ison jäälautan osuminen Huikun työsillan tukipaaluihin. Törmäys voi tulla myös pohjoisesta.

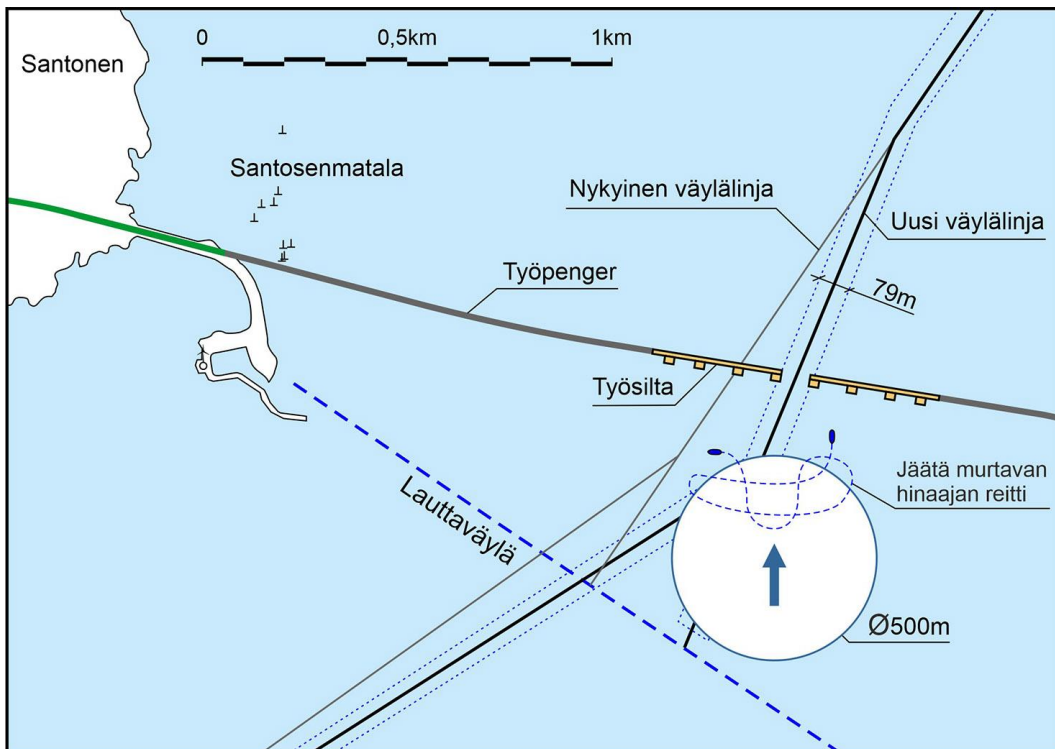
Edellytyksinä tällaisten kuormien esiintymiselle on:

- Työsillan edusta on laajalti sula;
- Jostain lohkeaa iso jäälautta;
- Työsillan eteen ei ehdi muodostua merkittävää puskuria pienistä jäälautoista;
- Kova tuuli ja virtaus antavat jäälautalle riittävän kineettisen energian;
- Jäälautta osuu siltaan, ei esimerkiksi penkereeseen.

Työsillan vaurioituminen on projektikomplikaatio, ei katastrofi. Jääiskun todennäköisyys riittävällä liike-energialla on yhden talven aikana pieni. Siksi työsillan vahvistaminen ei tässä tapauksessa ole välttämätöntä.

Toisaalta jääriskiä voi hallita. Poikkeuksellisen myrsky lähestyminen kriittisenä ajankohtana on ennustettavissa muutaman päivän etukäteen. Iso jääkuorma voidaan eliminoida vuokraamalla satamajäänmurtaja tai yhteysalus murtamaan jäätä työsillan edestä. Kuvassa 33 toimenpide on esitetty yksittäiselle jäälautalle.

Jäänmurtajia on käytetty jääkuormien hallintaan muun muassa Ohotan meren öljynporauksessa. Tässä tapauksessa toimenpiteen tarpeen todennäköisyys on pieni ja sen kustannus on marginaalinen.



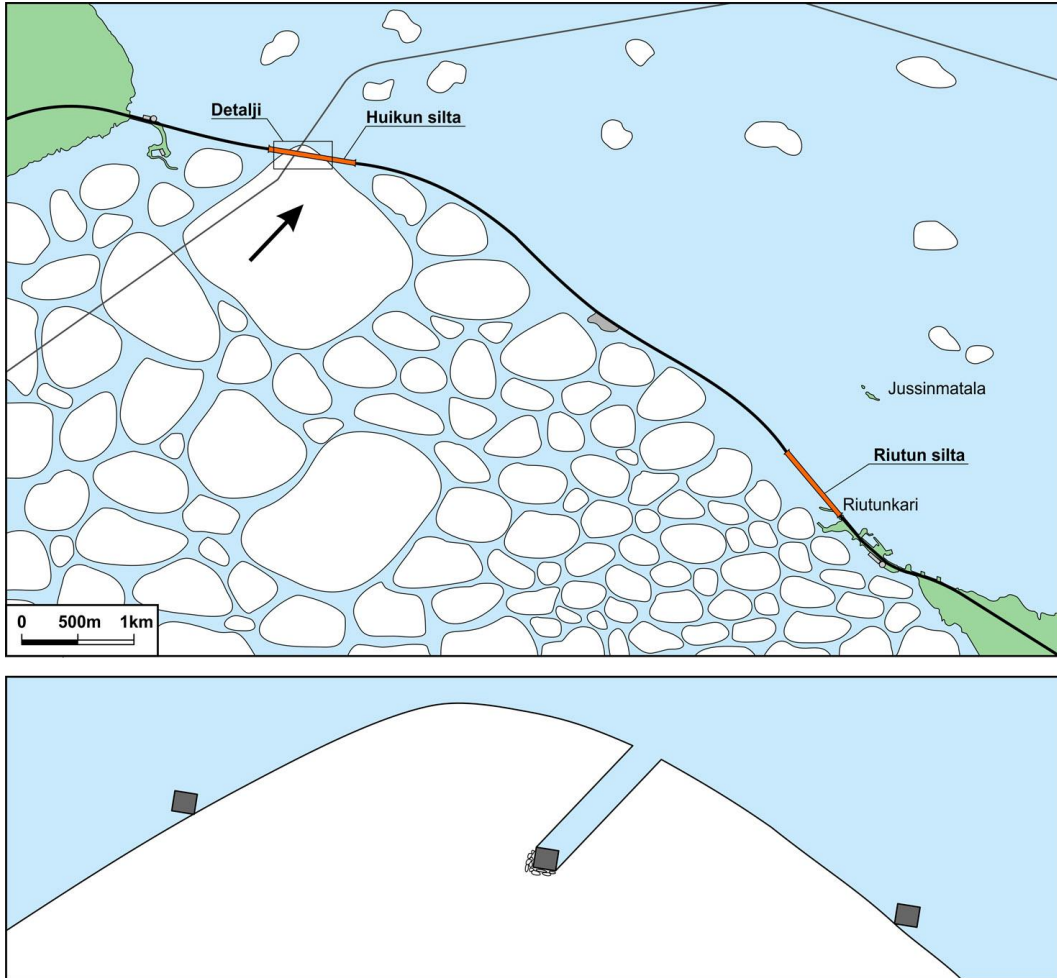
Kuva 43. Satamajäänmurtaja rikkoo työsiltaa lähestyvän ison jäälautan.

### Sillan käytön aikaiset jääkuormat

Huikun sillan käytön aikana perustusten mitoittavaksi jääkuormaksi muodostuu ison, paksun ja osin haurastuneen jäälautan törmäys riittävällä liike-energialla (kuva 34). Huomaa, että jääkuorma ei välttämättä vaikuta sillan poikkisuunnassa.

Tällainen törmäys on harvinainen, koska edellytykset eivät ole olemassa useimpina talvina ja koska siltaan on vaikea osua. Se on myöskin lyhytaikainen, koska jäälautan liike-energia kuluu törmäyksessä nopeasti ja viimeistään silloin, kun lautta osuu toisiin virtapilareihin tai penkereeseen.





Kuva 44. Ison jäälautan osuminen Huikun sillan virtapilariin jäiden lähdön alkuvaiheessa.

Kevätjään mitoituspaksuudeksi oletettiin tässä tapauksessa konservatiivisesti 0.8 m. Tukirakenteeksi suunniteltiin tässä tapauksessa paaluille perustettua teräs-betonirakennetta, joka olisi vesirajan ympäristössä kahdeksan kulmainen.

Seuraavassa on laskettu jääkuormia Kemi 1 koekartiota vasten eri kallistuskulmilla Rahlstonin menetelmällä /17/ olettaen jään taivutuslujuudeksi 0.4 MPa ja kitkaker-toimeksi 0.2 sekä Korzhavinin menetelmällä /15, 5/ olettaen jään leikkauslujuudeksi 0.25 MPa. Jään paksuudeksi on oletettu 0.8 m ja rakenteen halkaisijaksi jääkuorman vaikutustasolla 9.5 m.

Taulukko 2. Kemi 1 koekartion jääkuormat.

Kallistuskulma horisontaalisesta	Taivutusmurto		Leikkausmurto	
	F <sub>Pysty</sub>	F <sub>Vaaka</sub>	F <sub>Pysty</sub>	F <sub>Vaaka</sub>
50 astetta	1.8 MN	1.6 MN	1.1 MN	2.3 MN
60 astetta	1.8 MN	2.3 MN	1.2 MN	3.4 MN
70 astetta	1.8 MN	5.9 MN	1.8 MN	5.4 MN

Nähdään, että vaakakuorma riippuu suuresti rakenteen kallistuskulmasta. Mainittakoon, että hauraan kevätjän taivutuslujuuteen ja etenkin leikkauslujuuteen liittyy epävarmuutta.

Se, onko rakenne kahdeksankulmainen vai pyöreä ei ole kovin merkityksellistä. Sen sijaan vaakakuormalla ja rakenteen kallistuskulmalla on paljonkin merkitystä. Vaakakuorma vaikuttaa tarvittavaan paalutukseen ja kallistuskulma betonirakenteen dimensioihin.

Tässä tapauksessa päädyttiin suosittelemaan 0.8 metrin jäänpaksuutta, 60 asteen kallistuskulmaa ja Ralstonin menetelmää mitoituskuormien laskemiseen. Kuormitustapaus on harvinainen ja lyhytkestoinen.

## 4.5 Jää ja Suomen siltakuormitusohjeet

Väyläviraston siltojen kuormitusohjeissa on jään osalta (liite 1) huomioitu termisen jääkuorman ja jään murtumiskuorman lisäksi virran paine kiinteään jääpeitteeseen. Virtapilarin kuormaksi on tässä tapauksessa annettu

$$P_2 = 0.5 (l_1 + l_2) i_2 \quad (13)$$

missä  $l_1$  ja  $l_2$  virtapilarien etäisyyksiä viereisiin virtapilareihin ja  $i_2$  on 20 kN/m tai 30 kN/m riippuen sillan sijainnista suhteessa Kemi-Kajaani linjaan. Tämän kaavan perusteet eivät ole tiedossa. Yleensä virtaavan veden paine jääpeitteeseen ja sitä kautta rakenteisiin on vähäinen.

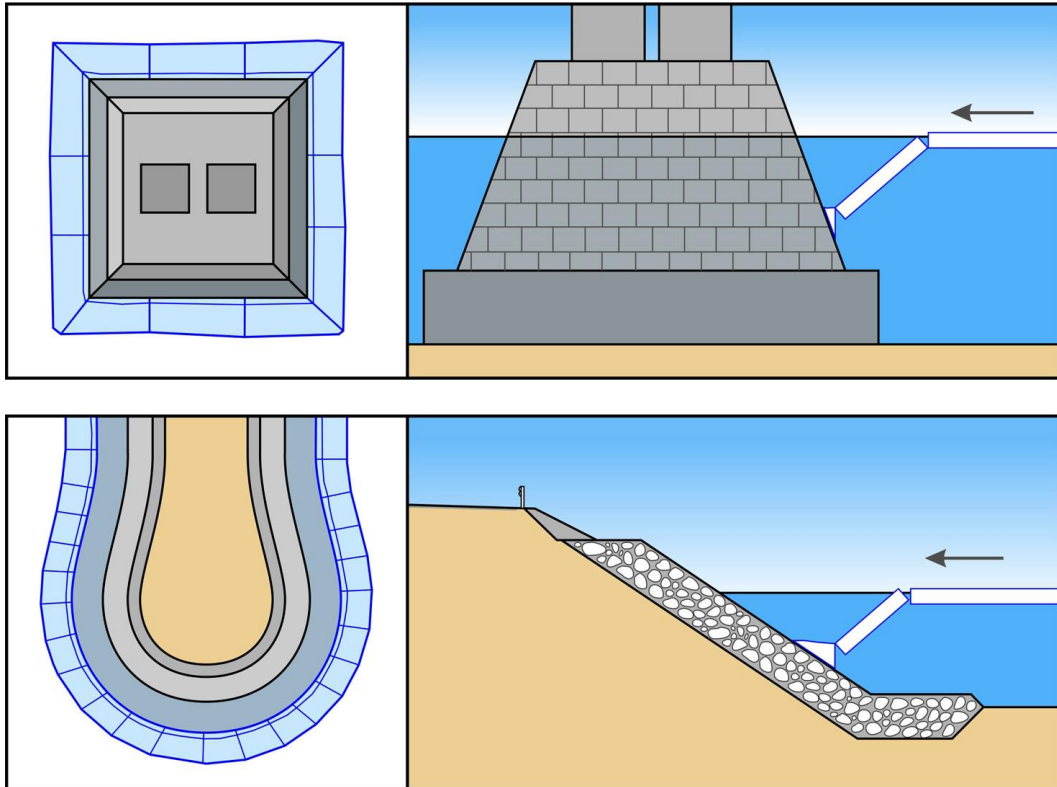
Joissa jääpeitteeseen vaikuttavat virtaavan veden kitkan lisäksi tuulen kitka, jääpeitteen oman painon vaakakomponentti sekä mahdollinen jääpeitteen reunaan vaikuttava hydrodynaaminen komponentti. Jos jääpeite on kiinni rannoissa, voimat siirtyvät rannoille. Jos jääpeite ei ole kiinni rannoissa, komponentit ovat laskettavissa ja virran paine yleensä dominoi. Paineen kasvaessa jäät kuitenkin holvautuvat rantoja vasten. Paine jää suoran ja äärettömän pitkänkin joen tapauksessa rajalliseksi /24, 5/.

Järvissä ja merellä vaikuttavia tekijöitä ovat tuulen ja virtauksen kitka. Jäiden alla virtaukset ovat suuressa mittakaavassa yleensä heikkoja. Jos jäät ovat kiinni rannoissa ja rakenteissa nämä ottavat myös rajallisen paineen (nyrkkituntuma-arvo 1 kN/m kilometrin selälle ankarissa tuulioloissa).

Jos jää irtoaa rannoista, se irtoaa myös rakenteista. Sen jälkeen jää voi puskea rantoja ja rakenteita vasten paineen jakautuessa epätasaisesti (kuva 35). Syystalvella joskus esiintyvissä ääritapauksissa suuri osa jääkenttään kohdistuvasta kitkasta voi tällöin kohdistua rakenteeseen, jos sitä ympäröivät rannat ovat loivia.

Jonkinlaisia jääkuormia esiintyy sielläkin, missä jäät sulavat paikoilleen. Näitä kuormia voi lähestyä tarkastelemalla toisaalta jään paikallisia hitaita liikkeitä ja toisaalta tuulen ja virtauksen paikalliseen jääkenttään siirtämiä voimia. Myös jäissä operoivat alukset voivat aiheuttaa jääkuormia siltojen alusrakenteisiin.

Näitä tekijöitä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.



*Kuva 45. Veden nousu voi irrottaa etenkin merellä jääkentän rannoista ja kareista mahdollistaen rajallisen jään liikkeen virtapilareita ja penkereitä vasten.*

## 5 Muiden vesirakenteiden jääkuormat

Suomen vesialueille on rakennettu ja rakennetaan monenlaisia vesirakenteita, joiden suunnitteluun jää voi vaikuttaa. Näitä ovat muun muassa penkereet, kiinteät laiturit, kelluvat rakenteet, aallonmurtajat, ohjainrakenteet, tihtaalit ja merimerkit.

Käytännön syistä nämä rakenteet on usein rakennettu merimerkkejä (eivät kuulu tämän selvityksen piiriin) lukuun ottamatta suojaisiin paikkoihin. Muut kuormat määräävät usein rakennesuunnittelussa jääkuormien jäädessä merkityksettömiksi.

Joskus harvinaiset jääkuormitustilanteet voivat vaurioittaa rakenteita. Tällöin jää harkittavaksi, kannattaako rakenteiden vahvistaminen tällaisia jääkuormia vastaan. Sallitaanhan fenderirakenteidenkin ajoittainen vaurioituminen. Aallonmurtajien lohkaresuojauksen vaurioiden korjaaminen kovien myrskyjen jälkeen nähdään osana kunnossapitoa. On siis pohdittava, kuinka mittavista vaurioista voi olla kysymys ja mitkä ovat rakennevaurioiden seuraamukset.

Kartta, paikallistieto ja käytännön kokemukset ovat näissäkin tapauksissa hyviä lähtökohtia. Kerran rakenteen eliniässä toistuvan tilanteen hahmottaminen voi olla vaikeaa. Avuksi voi ottaa pahimman mahdollisen skenaarion ja sen todennäköisyyden. Voisiko karakteristinen kuorma olla tästä puolet? Onko jääkuormalla yleensä merkitystä ja mikä on riski? Seuraavassa asiaa lähestytään esimerkkien valossa.

### 5.1 Penkereiden ja aallonmurtajien jääkuormat

Esimerkkinä penkereiden ja aallonmurtajien jääkuormista tarkastellaan Hailuodon kiinteään yhteyteen liittyvää pengertietä (kuva 38). Vaikka kiinteä yhteys stabiiloikin alueen jääkenttää melkoisesti, suuren jäälautan törmäminen penkereeseen on mahdollista harvinaisessa ääritilanteessa.

Äärimmäisenä skenaariona tarkastellaan kymmenen neliökilometrin lautan jäätörmäystä penkereeseen etelän puoleisessa myräkässä keväällä (Pohjanlahdella tuuli voi puhaltaa myrskylukemissa, mutta kohdealueella tuuli on kovaa). Haurastuneen kevätjään paksuudeksi oletetaan 0.8 metriä.

Lautan ajovoimaksi oletetaan 10 MN ja sen liike-energiaksi (kaava 4)

$$E = 0.5 \times 1.25 \times 900 \text{ kg/m}^3 \times 0.8 \text{ m} \times 10 \times 10^6 \text{ m}^2 \times (0.3 \text{ m/s})^2 = 400 \times 10^6 \text{ Nm} = 400 \text{ MNm}$$

Pengertien luiska on lohkaresuojattu (kuva 20). Siinä on lisäksi olkapää. Talvella lohkaresuojaus on ainakin keskiveden yläpuolelta tyypillisesti osittain jään sementoima.

Kun iso jäälautta törmää tällaiseen matalassa vedessä olevaan tiepenkereeseen, jää ei todennäköisesti nouse tielle vaan kehittää vähitellen kasvavan jääryöykkiön penkereen eteen.

Jos jäälautan ajovoimaa ja liike-energia riittävät, jäälautta luhistuu ensin röykkiön painosta. Sen jälkeen jääahtaus tässä tapauksessa pohjautuu. Jään murtuminen alkaa tapahtua penkereen edessä vallittumisprosessin mukaisesti (kuvat 20 ja 21).

Oletetaan, että kyseinen kymmenen neliökilometrin jäälautta on pyöreä ja ettei penkereen ja jäälautan välissä ole pienemmistä jäälautoista koostuvaa puskuri-vyöhykettä. Tämä merkitsee, että jäälautan kontaktialue penkereeseen on heti törmäyksen alkuvaiheessa satojen metrien mittainen.

Jään murtuminen hyvin karkeaa pengertä vasten on monimuotoinen vyöhykkeinen prosessi, johon liittyy muun muassa taivutusmurtumaa, leikkausmurtumaa, paikallista murskautumista ja halkeilua. Hauraan kevätjään tapauksessa leikkausmurtuman osuus kasvaa.

Paikalliset ja hetkelliset jääkuormat voivat olla suuriakin (jopa luokkaa 1 MN/5 m). Keskimääräinen vaakavoimataso isolla kontaktialalla jää kuitenkin suurella alueella pieneksi, arviolta suuruusluokkaan 0.02 MN/m.

Kun kontaktivyöhykkeeseen alkaa syntyä jäärykkiötä, tarvitaan lisäksi voimaa kitkan voittamiseen ja kasan potentiaalienergian kasvattamiseen /1/.

Oletetaan, että koko jäälautan etenemä kontaktivyöhykkeen yli muuttuu rökkiöksi jäälautan päälle ja, että kitkan voittamiseen ja potentiaalienergian kasvattamiseen tarvittava voimakomponentti on loskan peittämälle kevätjälle 30 % rökkiön painosta ja että 0.8 metriä paksun jään paino on 0.0072 MN/m<sup>2</sup>.

Näillä oletuksilla ja ympyrän segmenttigeometrian kaavoilla saadaan seuraava yksinkertaistettu suuruusluokka-arvio penkereen kokonaisjääkuorman kehityksestä alkaen ensikontaktista:

*Taulukko 3. Vesistöpenkereen kokonaisjääkuorman kehittyminen.*

Etenemä	Kontaktin pituus	Jäärökkiön kokonaispaino	Horisontaalinen jääkuorma
10 m	377 m	20 MN	$377 \times 0.02 + 0.3 \times 20 = 14 \text{ MN}$
20 m	533 m	51 MN	$533 \times 0.02 + 0.3 \times 51 = 26 \text{ MN}$
30 m	652 m	99 MN	$652 \times 0.02 + 0.3 \times 99 = 43 \text{ MN}$
40 m	752 m	145 MN	$752 \times 0.02 + 0.3 \times 145 = 58 \text{ MN}$

Jääkuorma on ylittänyt ajovoiman 10 MN jo 10 metrin etenemän kohdalla, joten jäälautta alkaa menettää liike-energiaansa. Liike-energiaa kuluu karkeasti arvioiden seuraavasti:

$$\Delta E (10 - 20 \text{ m}) = 10 \text{ m} \times (0.5 (4 \text{ MN} + 16 \text{ MN})) = 100 \text{ MNm}$$

$$\Delta E (20 - 30 \text{ m}) = 10 \text{ m} \times (0.5 (16 \text{ MN} + 33 \text{ MN})) = 245 \text{ MNm}$$

$$\Delta E (30 - 40 \text{ m}) = 10 \text{ m} \times (0.5 (33 \text{ MN} + 48 \text{ MN})) = 405 \text{ MNm}$$

Kun jäälautan liike-energia oli tässä tapauksessa 400 MNm, se pysähtyy runsaan 30 metrin etenemällä pengertä vasten. Penkereen eteen on kertynyt rökkiö, jossa on jäätä kontaktivyöhykkeen keskiosissa noin 25 m<sup>3</sup>. Paine pengertä vasten on tällöin keskimäärin

$$p = 0.02 \text{ MN/m} + 0.3 \times 25 \text{ m}^3/\text{m} \times 0.009 \text{ MN/m}^3 = 0.09 \text{ MN/m}.$$

Vallittumiskaava (11) antaa maksimikuormaksi tässä tapauksessa vakion R arvolla 3 ja vallittumislevyden arvolla 650 m

$$p_D = 3 \times 0.8^{1.25} \times 650^{-0.54} = 0.065 \text{ MN/m}$$

Tässä on huomattava, että jääryötkiön kasvaminen täyteen mittaansa vaatii tässä tapauksessa jäätä yli 100 m<sup>3</sup>/m ja että kyseessä on maksimikuorma.

On hyödyllistä tarkastella todennäköisyyttä, jolla tällainen äärimmäinen skenaario voisi toteutua. Vaaditaan:

- Kova talvi yli 80 cm jääpaksuuden saavuttamiseksi;
- Poikkeuksellinen rajuilma keväällä, joka nostaa veden korkealle;
- Ison jäälautan lohkeaminen kiintojäädästä;
- Merkittävän jääpuskurin puuttuminen jäälautan ja penkereen välistä.

Kyseinen teräsjäänpaksuus saavutetaan Hailuodon ympäristössä nykyisen kaltaisessa ilmastossa ehkä kerran viidessäkymmenessä vuodessa.

Vedenpintaa dramaattisesti nostavan kevätmyrskyn todennäköisyys kovan pakkastalven keväänä ajankohtana, jolloin Pohjanlahden ulappa on jo pääosin vapautunut jäistä, on myös pieni. Toistuvuus lienee luokkaa kerran 50 vuodessa.

Sitten tarvitaan vielä ison jäälautan lohkeaminen ja jääpuskurin puuttuminen penkereen edestä.

On syytä muistaa, että jäälautan kiihdyttämiseen ja liike-energian kerryttämiseen tarvitaan matkaa.

Edelleen tulee muistaa, että kohteessa on korkeintaan 10 kilometriä selkää, josta työntöä pengertä vasten voi syntyä. Jos liike-energiaa ei ole ja jääkenttä painaa pengertä tasaisesti, paine on kyseisen myräkän aikana luokkaa 10 kN/m.

Jääkenttä on voinut sulaa tai irrota penkereen edestä, jolloin penkereen suuntainen etureuna on mahdollinen. Tuuli voi painaa jääkenttää ensi irti penkereestä ja sitten takaisin. Kyseisen skenaarion toistuvuus lienee kuitenkin nykytilanteessa korkeintaan luokkaa kerran 10 000 vuodessa.

Isompia jääkasoja ja korkeampia paikallisia kuormia voi syntyä, jos pengeri ulkonee rannasta (esimerkiksi aallonmurtaja, kuva 22) tai jos jäälautta kohtaa penkereen kulma edellä.

Ison mutta vain 40 cm paksun pitkälle haurastuneen jäälautan ajautuminen pengertä vasten on edellä esitettyä todennäköisempää. Myös syksyllä jään ollessa ohutta röykkiöitymistä voi tapahtua (kuva 46). Näihin tilanteisiin liittyvät keskimääräiset jäänpaineet ovat edellä mainittua pienempiä.

Tämä esimerkki demonstroi sitä, että saaristossa ja sisävesillä esiintyy harvoin olosuhteita, jotka liikuttavat isoja vahvoja jäälauttoja. Rannat, karit ja matalikot pitävät yleensä jäät paikoillaan, kunnes niiden sulaminen ja haurastuminen on edennyt jo pitkälle. Jos kuitenkin liikettä pääsee tapahtumaan, lautat pysähtyvät nopeasti rantoihin ja penkereisiin.

Mainittakoon, että penkereiden ja aallonmurtajien jääkuormat eivät Suomen olosuhteissa ole yleensä ongelmallisia. Geoteknistä vaakakapasiteettia riittää. Rakennetut on yleensä osittain jäässä jäiden liikkuessa. Korkeatkin paikalliset jääkuormat jakautuvat laajemmalle alueelle.

Jos vaurioita lohkaresuojauksessa esiintyy jäiden vaikutuksesta, kyseessä on saman kaltainen kunnossapitoasia, kuin vaikkapa aallonmurtajien lohkaresuojausten korjaaminen harvoin toistuvien kovien myrskyjen jäljiltä.



*Kuva 46. Ohut ajojää on muodostanut noin 6 metriä korkean rökkiöharjanteen Porin Reposaaren länsirantaan (kuva Raimo Saarikoski).*

## 5.2 Laiturien jääkuormat

Seuraavassa tarkastellaan laiturien jääkuormia käyttäen esimerkkeinä neljää lounissaariston yhteysaluslaturia, joiden saneerausta tai uudisrakentamista suunnitellaan. Kohteet on esitetty kuvassa 47 ja niitä voisi luonnehtia seuraavasti:

Aspö	Saarten hyvin suojaama kohde Paraisten ulkosaaristossa
Kasnäs	Saarten ja rakenteiden hyvin suojaama kohde Kemiönsaaren saaristossa
Pensar	Melko suojainen paikka Paraisten sisäsaaristossa
Åselholm	Rantojen ja karin suojaama poukama Paraisten saaristossa

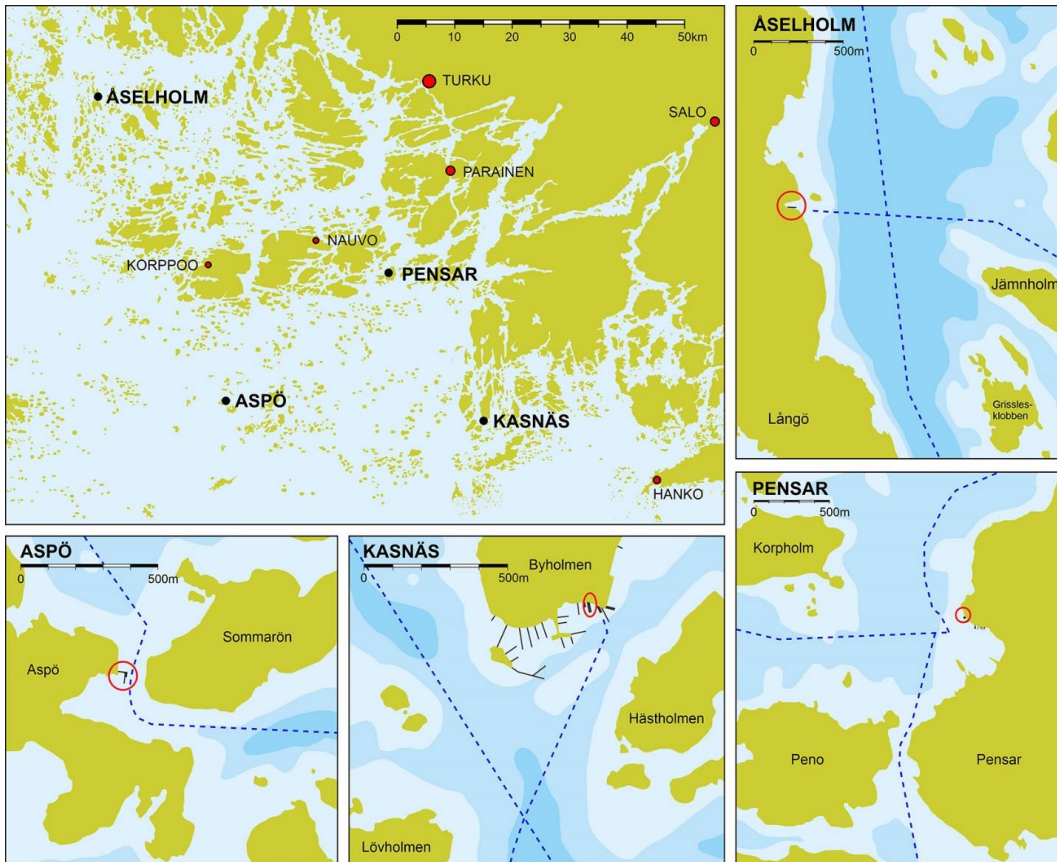
Kohteiden hydrometeorologiset olosuhteet ovat jääkuormien määrittämisen kannalta samankaltaiset. Kohteiden suojaisuudessa ja rakennejärjestelyissä on kuitenkin eroja. Tämä tuo kunkin kohteen jääproblematiikkaan omat vivahteensa.

### Hydrometeorologiset olosuhteet

Vedenkorkeuden ääri vaihtelut Turun ja Hangon mareografeilla on ollut + 1.3 m MW - - 0.8 m MW. Kohteissa ja erityisesti kovien jäätalvien aikana ääri vaihtelut ovat pienempiä.

Jos katsotaan eteenpäin vuoteen 2080 asti, keskivedenkorkeuksiin liittyvä ilmastomuutoksesta johtuva epävarmuus on +/- 0.3 m N 2000 tasosta, kun otetaan huomioon maan nousu noin 5 mm/v.

Jääkuorman vaikutuksen voi ensin arvioida MW tasossa. Sen jälkeen voi tarkastella muita vaikutustasoja, jos kuormalla ylipäättänsä on merkitystä.



Kuva 47. Lounissaariston saneeraus- tai uudisrakennussuunnittelun kohteena olevat yhteysaluslaiturit lähialueineen.

Kartan perusteella alueilla ei esiinny voimakkaita virtauksia. Erityisesti virtaukset eivät vaikuta kohtisuoraan rantaa vasten.

Kaikki kohteet ovat saaristossa. Maasto rajoittaa tuulen nopeuksia avomerinopeuksiin verrattuna. Tuulen nopeus 20 m/s on kohteissa varsin konservatiivinen oletama jääkuormien kannalta kriittisissä tilanteissa, kun otetaan vielä huomioon vaatimus tuulen oikeasta suunnasta kussakin kohteessa.

Vuosien 1961–1990 tilastojen perusteella kerran 10 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä on alueella luokkaa 900 astevuorokautta ja kerran 50 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä luokkaa 1 200 astevuorokautta. Pakkasmäärä pienenee mantereen sisälle tunkeutuvista lahdista kohti ulkomerta siirryttäessä avoimen meren vaikuttaessa ilman lämpötilaan.

Ilmaston lämpenemisen vuoksi tällaiset talvet ovat käyneet harvinaisemmiksi. Lisäksi vesimassojen ja pohjan kasvava termien reservi vaikuttaa jään muodostukseen ja sulamiseen kohteissa.

### Jääolosuhteet

Jääkarttojen perusteella jään paksuus kohteissa on viimeisen 25 vuoden aikana ylittänyt 0.3 metriä vuosina 2003, 2010, 2011 ja ehkä 2013. Jäätilan kehitys



Saaristomerellä jäätalvina 1987, 2003 ja 2011 on esitetty liitteessä 4. Mainittakoon, että suurimmat jään paksuusmerkinnät mantereen päällä viitannevat jään paksuuksiin ensin jäätyneissä sisälahdissa.

Viimeisten 25 vuoden jäätilanteen kehityksen perusteella voidaan arvioida, että jään maksimipaksuus kohteissa kerran 50 vuodessa esiintyvänä jäätalvena on 0.6 metriä. Jäätalven pituus kohteissa on tuolloin 4 kuukautta. Jään maksimipaksuus kohteissa ylittää 0.3 metriä kahdeksana vuotena. Lähtökohta on konservatiivinen, koska talvet jatkanevat lämpenemistään.

Tyypillinen jäätalvi kohteissa on vain runsaan kuukauden mittainen ja jää on ohutta. Täysin jäättömiäkin talvia esiintyy.

### **Jääkuormamitoituksen lähtökohdat**

Yhteyslaiturien vaurioiden seuraukset eivät ole erityisen vakavia. Tällaisten rakenteiden suunnittelujääkuorma on konservatiivinen estimaatti kerran 50 vuodessa esiintyvistä jääkuormasta. Jääkuormien luonteen takia on kuitenkin viisasta tarkastella myös ääritilanteita.

Yhteysalukset ovat maksimissaan noin 50 metriä pitkiä ja 12 m leveitä autolauttoja. Konetehoa voi löytyä 2000 kW ja uppoumaa noin 300 dwt. Yhteysalukset voivat käydä laiturissa noin 4 kertaa viikossa läpi talven. Tällaiset alukset voivat aiheuttaa jään välityksellä sysäyksiä rakenteille.

Helsingin kaupungin satamalaitoksen ohjeissa /25/ takavuosilta annetaan seuraavat nyrkkituntumaan perustuvat mitoitusjääkuormat:

Kuorma yhtenäistä muuria vasten	0.05–0.1 MN/m
Kuorma pilareita ja paaluja vasten	0.1–0.2 MN/kpl

70-luvun rahtilaivat olivat koneteholtaan ja uppoumaltaan usein viisinkertaisia yhteysaluksiin verrattuna. Kun lohkarjäää ja kineettistä energiaa on vähemmän kuin Helsingissä takavuosina, laituriin tuloon liittyvä jääisku on pienempiä. Laiturisuunnittelussa voi tässä tapauksessa soveltaa ohjeen alarajan kuormia.

Vedenkorkeuden vaihtelut kohteissa eivät ole kovin nopeita. Suoraan seinään ja paaluriviin tuleva kuorma on luvun 3.1 perusteella korkeintaan luokkaa 5 kN/m. Lisäksi kahden paalurivin nurkkapaaluihin kohdistuu noin 100 kN:n kuorma (neljäsosa erillispaalun kuormasta ja lisäksi osuus paalurivien kuormasta). Tällaisilla vertikaalikuormilla (nostovoimilla) on tuskin merkitystä laiturirakenteen suunnittelussa.

Jäätilanteita tarkastellaan seuraavassa sydäntalvella ja keväällä jäiden lähdön aikaan. Jää pääsee liikkumaan kohteissa keväällä vasta, kun se on irronnut rannoista sulamisen ja mahdollisesti vedenkorkeuden muutoksen seurauksena. Liikennöityjen alueiden arvioidaan olevan tällöin jo sulia. Haurastuneen jään teholliseksi maksimipaksuudeksi arvioidaan 0.4 m.

### **Aspö**

Aspön yhteysaluslaituri sijaitsee kapeassa salmessa ulkosaaristossa. Vanhan laiturin tilalle on tarkoitus rakentaa uusi, jonka konfiguraatio on esitetty kuvassa 48.

Laituria ympäröivät rannat estävät ehjän jään massiiviliikkeet laituria vasten kovan pakkastalvena, jolloin ulkosaaristo on kiintojässä. Termisiä jääkuormia voi syntyä, mutta ne jäävät vähäisiksi. Jos 0.3 metriä paksun jään keskilämpötila nousee 5 astetta ja työntöä tulee sadan metrin matkalta, jään teoreettinen liike on 3 cm.

Ranta kuitenkin rajoittaa jään liikettä kohti murrettua väylää. Jää viruu paineen alla ja rakenne joustaa. Länsipuolen rannat eivät näytä jyrkiltä. Laiturin eteläpään kasuunille voi laskea termistä jääkuormaa 50 kN/m väylää kohti.

Keväällä jäiden lähdön aikaan murrettu väylä ja salmi sulavat ensin. Salmeen voi ajautua jäälautta, jonka halkaisija on korkeintaan 100 metriä. Tällainen jäälautta voi irrota myös laiturin lännenpuoleisesta lahdesta.

Oletetaan jäälautan teholliseksi paksuudeksi 0.4 m (todellinen paksuus suurempi), liikenopeudeksi 0.3 m/s ja massaksi mukaan lukien hydrodynaaminen lisämassa 5 000 000 kg. Lauttaan kohdistuvat virtauksen ja tuulen aiheuttamat ajovoimat ovat pieniä, yhteensä alle 10 kN. Jäälautan liike-energia on noin 0.2 MNm.

Oletetaan yksinkertaistaen, että jäälautta törmää laiturikasuunin nurkkaan 45 asteen kulmassa ja murtopaine on 1 MPa. Jäävoima kasvaa lineaarisesti kaavan  $0.4 \text{ m} \times 2p \times 1 \text{ MPa}$  mukaisesti, missä  $p$  on jään tunkeutuma. Jäälautan liike-energia kuluu näin olettaen kaavan  $E = 0.4 \text{ m} \times 1 \text{ MPa} \times p^2$  mukaisesti.

Tunkeutumaksi tulee 0.7 m ja jääkuormaksi  $0.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 1 \text{ MPa} = 0.56 \text{ MN}$ . Tässä vaiheessa lautan kineettinen energia on syöty ja lautta pysähtyy.

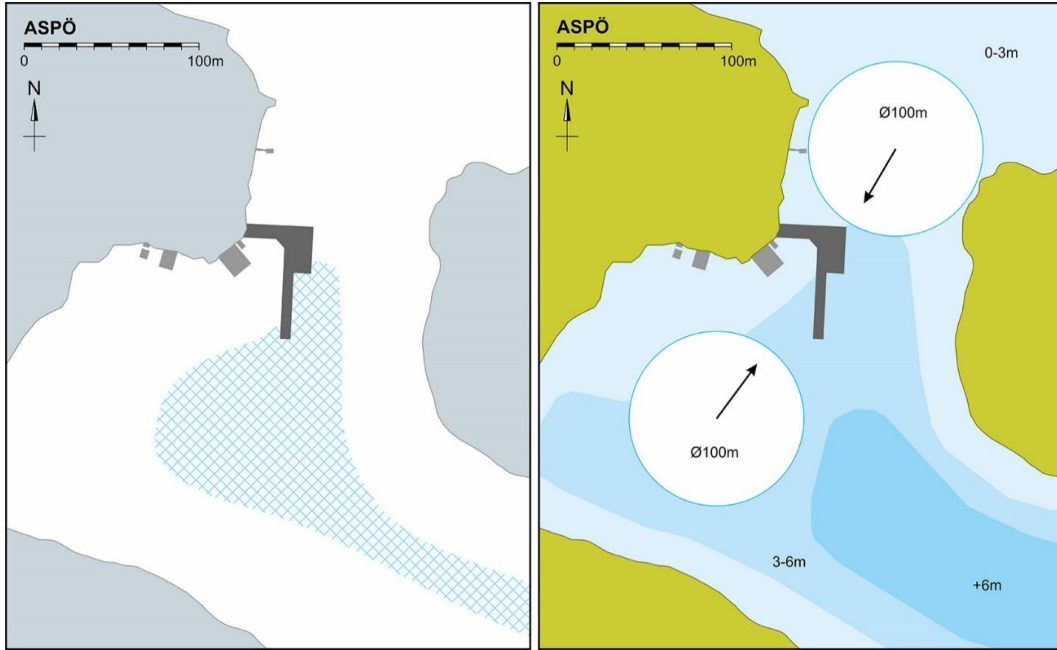
Kuormitustapaus on kuitenkin varsin harvinainen. Edellä esitetyn perusteella kohteessa on jäiden lähdön aikaan jäätä, jonka tehollinen paksuus on 0.4 m kerran 50 vuodessa.

Halkaisijaltaan 100 metriä olevan jäälautan liikkuminen salmessa ei tapahdu jokaisen kovan pakkastalven jälkeen. Lisäksi tarvitaan kova tuuli oikeasta suunnasta ajamaan jäälautta laituria vasten.

Ilmakuvasta näkyy tällä hetkellä salmessa useita varsin heppoisen näköisiä laitureita. Tämä tukee käsitystä harvinaisesta jääkuormatapauksesta.

Edellä esitetyn perusteella 0.6 MN:n jääkuorma on mahdollinen iskun osuessa todennäköisesti johonkin laiturin ulkonurkista. Jos laiturin kapasiteetti ei riitä, laiturikasuuni voi nytkähtää hiukan.

Jos tällainen harvinainen nytkähdys ei ole hyväksyttävissä, suunnittelun lähtökohdaksi voidaan ottaa rakenteen laskennallisen kapasiteetin ilman varmuuskertoimia.



*Kuva 48. Aspön suunniteltu yhteysaluslaituri sydäntalvella ja kuormituskenaario keväällä jäiden lähdön aikaan.*

## Kasnäs

Kasnäsissä on saneerauksen/uudisrakentamisen kohteena laituri 2 (kuva 49). Laiturin perä on kiinteärakenteinen, pistolaiturin ulkopää paalurakenteinen.

Laiturin perässä on eroosioaurio. Potkurivirrat ovat syöneet kiintoainesta kiinteän seinämän ali. Seinämän taakse syntynyt onkalo on aiheuttanut päällystevaurion.

Tämänkaltaisia vaurioita on esiintynyt myös muissa satamissa. Vaurion syynä on ollut usein se, että alukset ovat työntäneet sydäntalvella lohkarajamassoja ”pus-sin perälle”. Tämän seurauksena laituriin pääsy on sydäntalvella vaikeutunut ja edellyttänyt tavanomaista suurempaa potkurivoimaa. Tässä tapauksessa laiturin perän eroosio-ongelma voi ratketa kunnan suojalaatan avulla.

Tilanne Kasnäsin satamassa sydäntalvella ja keväällä on esitetty kuvassa 50. Sydäntalvella jää on murrettu pistolaiturin molemmiin puolin. Termisiä jään paineita ei synny.

Yksittäisen paalun määrääväksi jääkuormaksi tulee 0.1 MN:n jääisku laituriin ajon yhteydessä, joka voi kohdistua myös seinämään 0.3 x 0.4 m<sup>2</sup> alalle.

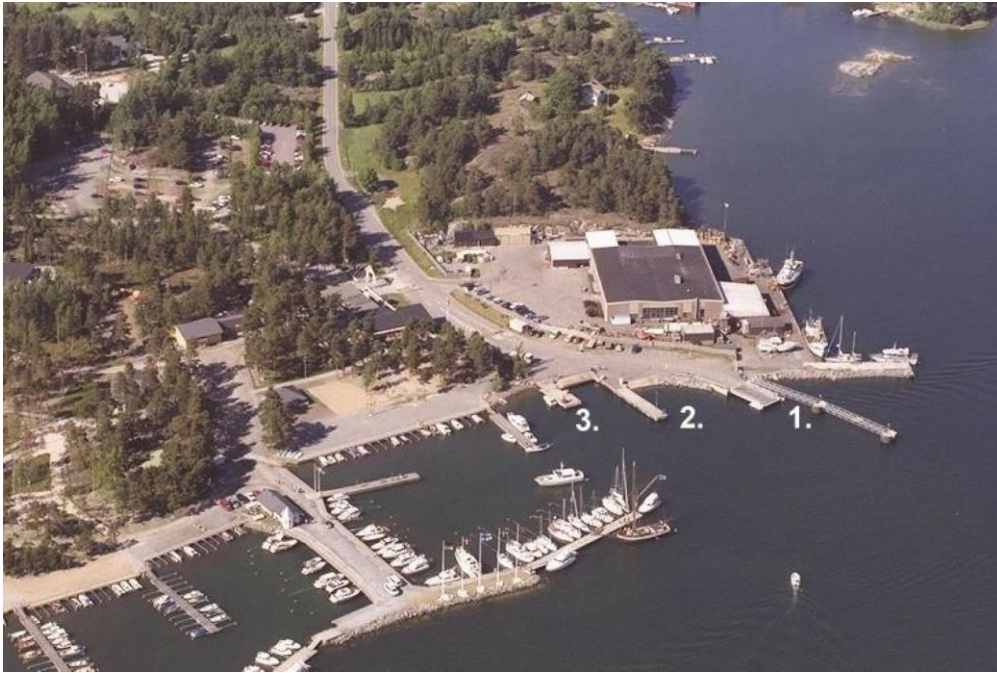
Keväällä jäiden lähdön aikaan yksittäiseen paaluun pistolaiturin päässä voi teoriassa osua jäälautta, jonka tehollinen paksuus on 0.4 m ja liike-energia kunnan myräkässä luokkaa 0.1 MNm. Liike-energia riittää puolen metrin tunkeutumaan 0.4 m paksua paalua vastaan. Paalun maksimikuormaksi tulisi 1 MPa:n nimellislujuudella kaavan 5 perusteella  $2,5 \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 1 \text{ MPa} = 0.4 \text{ MN}$ .

Kuormitustapaus on erittäin harvinainen. Se edellyttää kovaa pakkastalvea, sopivan kokoista jäälauttaa sataman suulla väylän ja laiturin edustan ollessa jo vapaa jäistä ja kovaa etelätuulta.

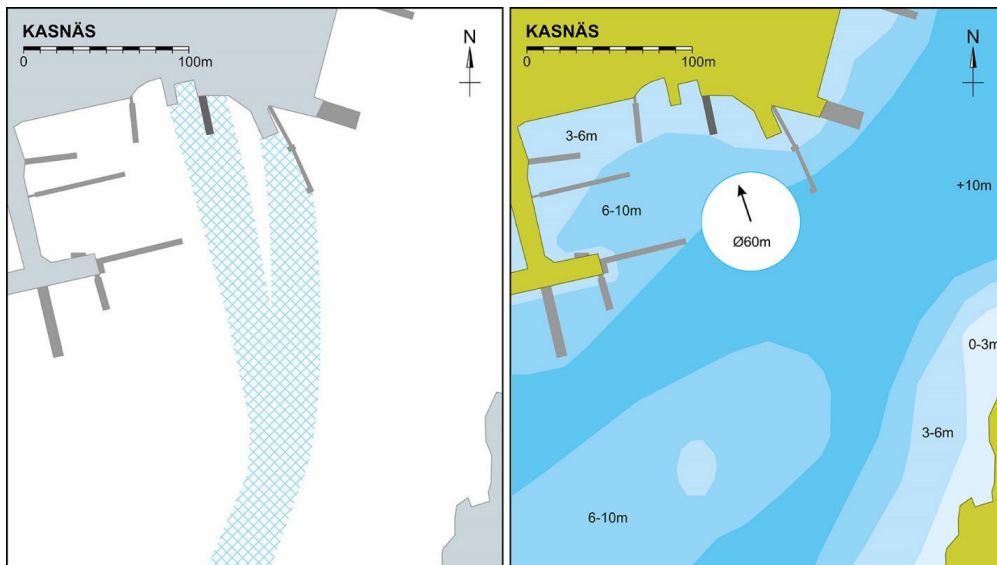
Yksittäisen paalun vaurioituminen laiturin päässä ei ole mikään katastrofi. Jos yksittäisen paalu vaurioitumista ei kuitenkaan pidetä hyväksyttävänä, suunnittelulähtökohdaksi voi ottaa paalun laskennallisen kapasiteetin ilman varmuuskertoimia.

Kuvissa 39 ja 40 kiintyy huomio myös kelluviin ponttonilaitureihin. Nämä absorboivat erittäin tehokkaasti liikkuvien jäälauttojen liike-energiaa ensin ankkurikettinkien jouston myötä ja sen jälkeen ankkurien luistaessa. Rakennevaurioita alkaa toki tapahtua jälkimmäisessä vaiheessa.

Ankkurointia voi arvioida jään ajovoimien perusteella. Ponttonilaitureita ei yleensä rakenneta kovin dynaamisiin jääolosuhteisiin.



Kuva 49. Kasnäsin satama. Saneerauskohteena on laituri 2.



Kuva 50. Tilanne Kasnäsin satamassa sydäntalvella ja kuormituskenaario jäiden lähdön aikaan.

## Pensar

Pensarissa ollaan uusimassa yhteysaluslaituri kasuunilaiturilla. Yhteysalus ajaa siihen kiinni keula edellä ja lähtee peruuttamalla. Esteetöntä selkää on edessä vajaa kilometri. Tuulen ja virtausten aiheuttama paine Pensarin rantaa kohti on siis jään välityksellä keskimäärin alle 1 kN/m kovan jäätalven länsimyrskyn aikana (kansi-kuva).

Keskitalven tilanteessa jää on murrettu laiturin edestä, joten jäänpaineet laituria vasten jäävät pieniksi (kuva 51). Kasuunin seinämään voi kohdistua laituriin ajon yhteydessä 0.1 MN:n jääisku. Kuormitusalueeksi voi olettaa 0.3 x 0.4 m<sup>2</sup>. Jos vesi nousee paljon ja jää irtoaa rannoista ja kasuunista, jään liikettä vastustavia elementtejä on pitkin rantavyöhykettä, mutta vastus on epätasaista. Viisto jääkuorma laituria vasten voi olla 10 kN/m.

Keväällä jäidenlähdon aikoihin laituriin voi törmätä halkaisijaltaan noin 500 metrin jäälautta, jonka tehollinen paksuus on 0.4 m (kuva 51). Lautalla voi olla liike-energiaa 5 MNm, kun myrsky riehuu Itämerellä. Liike-energia riittää kunnan tunkeutumaan 10 metriä leveätä rakennetta vasten.

Maksimaaliseksi globaalipaineeksi tulee kaavan 6 perusteella

$$p_G = 1.8 \text{ MPa} \times (0.4 \text{ m}/1 \text{ m})(-0.50 + 0.4/5) \times (10 \text{ m}/0.4 \text{ m}) - 0.16 = 1.6 \text{ MPa}$$

ja maksimijääkuormaksi

$$F = 1.6 \text{ MPa} \times 0.4 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 6.4 \text{ MN}$$

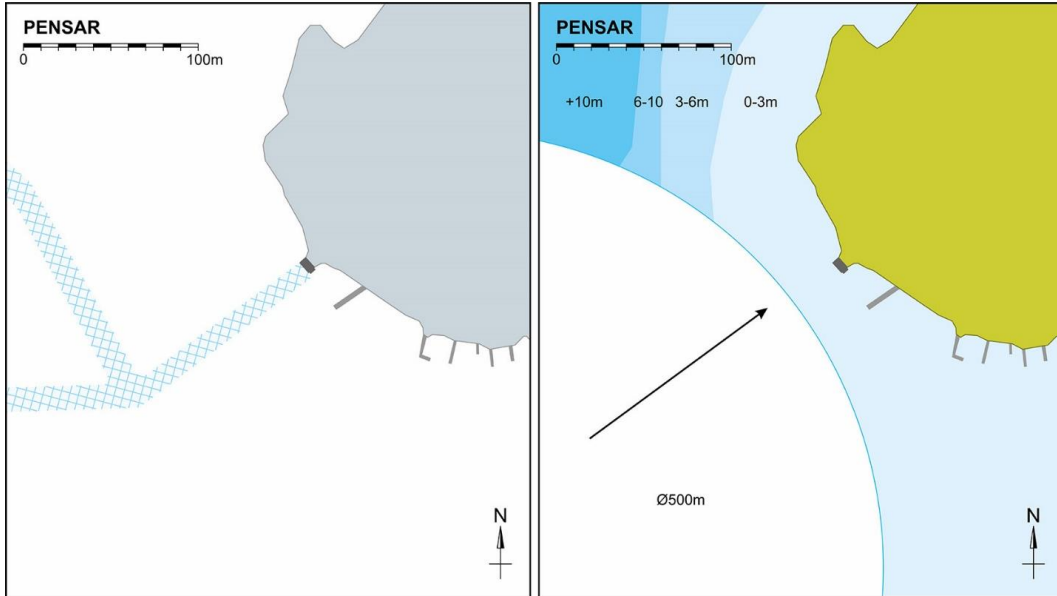
Kaava 6 on jo aiemmin luvussa 3.1 arvioitu konservatiiviseksi. Tässä tapauksessa interaktiopituus on lisäksi hyvin lyhyt. Maksimikuorma voi jäädä jään ja tämän jäykän rakenteen vuorovaikutustilanteessa puoleen lasketusta ja keskimääräinen kuorma neljäsosaan.

Erikseen voi tarkastella 3 MN:n kuormaa kohtisuoraan laituria vasten ja 1 MN:n kuormaa laiturin suunnassa. Paikalliseksi jääkuormaksi voi olettaa betonikasuunille 2.5 MPa vaikutusalueelle 0.3 x 0.4 m<sup>2</sup>.

Kuormitustapaus on erittäin harvinainen. Se edellyttää erittäin kovaa pakkastalvea, myrskyä Itämerelle jäiden lähdon aikaan oikeasta suunnasta, isoa jäälauttaa salmeen ja lähes täydellistä osumaa laituriin, ei viereen.

Laiturin läheisyydessä olevat heppoisen näköiset laiturit vahvistavat näkemystä erittäin harvinaisesta kuormitustapauksesta.

Todettakoon vielä, että laiturimuurit, joiden takana maa on vielä osittain jäässä, kestävät erittäin hyvin globaaleita ja paikallisia jääkuormia.



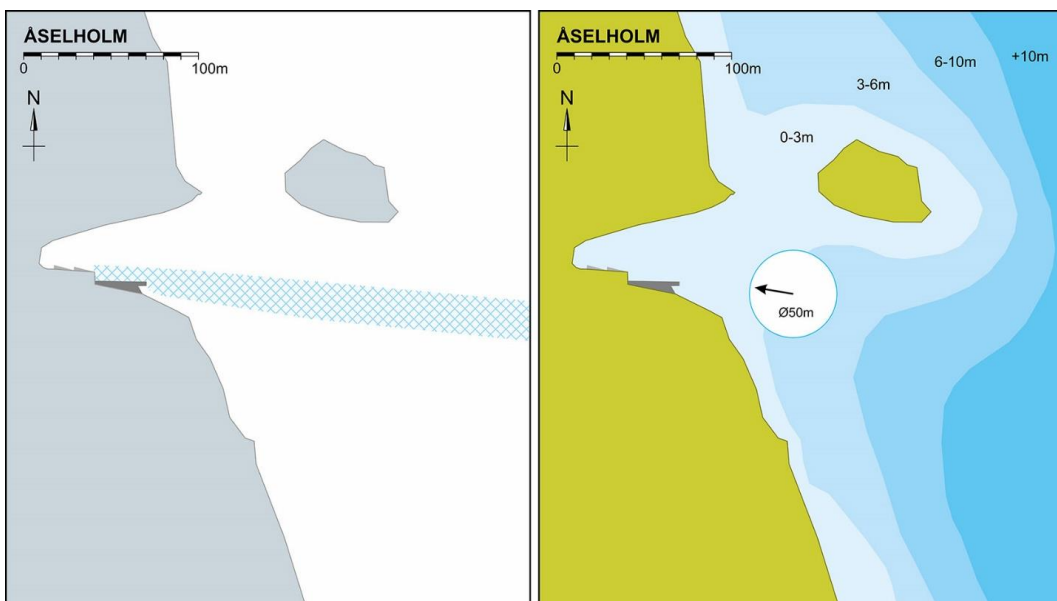
*Kuva 51. Keskitalven jäättilanne Pensarissa ja jäälautan törmäysskenaarioiden laituriiin keväällä.*

## Åselholm

Åselholmissa kohteena on rantojen ja karin suojaamassa poukamassa oleva pistolaituri. Tilanne sydäntalvella ja kevättalvella jäiden lähdön aikaan on esitetty kuvassa 52.

Sydäntalvella jää on rikottu laiturin edestä. Rakenteisiin kohdistuu lähinnä laiturin ajoon liittyvä jääisku 0.1 MN.

Jäiden lähdön aikaan edes laiturin päähän on vaikea osua jäälautalla, jonka halkaisija on 50 metriä. Harvinaisena kuormitustapauksena laiturin päätytukeen voi tarkastella 0.2 MN:n jääiskua.



*Kuva 52. Åselholmin yhteysaluslaituri sydäntalvella ja jäälautan törmäysskenaarioiden laituriiin keväällä.*

## **Laiturien jääkuormia koskevat päätelmiä**

Laitureita rakennetaan aaltovaikutusten takia pääsääntöisesti suojaisiin paikkoihin. Jos suoja ei ole tarjolla, satama-altaat suojataan aallonmurtaajilla.

Laitureihin kohdistuu jääkuormien ohella myös muita kuormia kuten alusten törmäyskuormat ja kiinnittäytymiskuormat, oma paino, hyötykuormat, aaltokuormat sekä maan- ja vedenpaine kuormat. Usein jokin näistä muista kuormista dominoi rakennesuunnittelussa.

Tässä tarkastelun kohteena olevat yhteysaluslaiturit ovat varsin suojaisissa paikoissa. Niihin kohdistuvat kuormat ovat konservatiivisin lähtöolettamuksinkin pieniä. Ison jäälautan törmäystilanteet ovat harvinaisia.

## 6 Johtopäätökset

Tavallisten siltojen suunnittelussa on Suomessa vuosikymmenet käytetty muiden kuormitusten ohella jääkuormakomponentteja  $p_1$ ,  $p_2$  ja  $p_3$  (liite 1).

Jääkuormakomponentti  $p_1$  vaikuttaa sillan tukeen sillan pituussuunnassa ja aiheutuu ensisijaisesti jääpeitteen lämpötilan muutoksista. Sen suuruusluokka on järkevä edellyttäen, että jään lämpöliike kertyy riittävän pitkältä matkalta. Useimmissa tapauksissa näin ei ole laita. Jääpeite liikkuu vähän, sillan tukirakenne myötää ja jää viruu rakenteen edessä. Kuorma jää pieneksi.

Jääkuormakomponentin  $p_2$  sanotaan aiheutuvan virtaavan veden vaikutuksesta jääpeitteeseen ja vaikuttavan sillan tukeen virran suunnassa. Kyseinen kuormakomponentti voi olla relevantti joissa, mutta siinä tapauksessa tilanne pitäisi analysoida tarkemmin. Siltasuunnittelussa tarvitaan silloin muitakin tutkimuksia koskien muun muassa jääpatojen muodostumisriskiä ja tähän liittyviä tulva- ja eroosiokysymyksiä. Järvissä ja rannikkoalueilla tämä kuormakomponentti ei ole merkittävä.

Jääkuormakomponentti  $p_3$  liittyy jään murtumiseen sillan tukea vasten. Jään ni-mellismurtolujuudelle annetaan arvo 1 MPa. Tämä arvo on realistinen jään pak-suuteen verrattuna leveille massiivituille, joiden jäätä murtava etureuna on pysty-suora tai lähes pystysuora. Kuorma ei todellisuudessa ole keskeinen ja siihen liittyy sillan pituussuuntainen komponentti. Usein jään tehollinen paksuus on oletettua pienempi.

Kuormitusohjeissa on kuitenkin muun muassa paikallisiin olosuhteisiin liittyvää liik-kumavaraa, joka edellyttää tarkempia tutkimuksia. Tällaisia tutkimuksia kannattaa tehdä myös muiden vesirakenteiden suunnitteluun liittyen. Tarkemmilla selvityk-sillä saa realistisempia suunnittelujääkuormia.

Asiaa on lähestytty modernin jäämekaniikan keinoin. Lähestymistapaan liittyy eri-laisia vakavia jääkuormitustilanteita kuvaavia skenaarioita. Jää murtuu ei tavoin ja eri painetasoilla erilaisia rakenteita vasten. Jatkuvan jään murtumistilan saavutta-minen edellyttää riittävää jään ajovoimaa ja/tai liike-energiaa. Tämän rajallisuus on usein suunnittelujääkuormia rajoittava tekijä.

Asiaa on havainnollistettu siltojen ja muiden vesirakenteiden jääkuormia koskevin esimerkein. Vaikeutena on usein lämpimän ja haurastuneen keväätjään lujuuden arviointi jäiden lähdön aikaan.

Kustannustensäästömahdollisuudet liittyvät rakenteiden muotoiluun ja kuormien yhdistelemiseen. Jos esimerkiksi termiseen jäänpaineeseen yhdistyy toinen saman-suuntainen lyhytaikainen kuorma, terminen jäänpaine putoaa pienellä lisäsiirty-mällä nolnaan.

Dynaamiset jääkuormat ovat usein esimerkiksi Kalifornian maanjäristysten kaltai-sia. Silloin tällöin esiintyy pientä tärinää, mutta kunnan järistys harvoin. Jos kunnan jääkuormitustapaus toistuu kerran sadassa tai tuhannessa vuodessa ja kestää se-kunteja tai minuutteja korkealla tasolla, niin tuskin siihen yhdistyy muita merkittä-viä lyhytaikaisia kuormia kuin ehkä murto-osa tuulikuormasta.



## Lähdeluettelo

- /1/ Eranti, E. ja Lee, G.C., 1986. Cold Region Structural Engineering, McGraw-Hill Book Company.
- /2/ Rantamäki, J., 1972. Jään kuormituskokeita talvella 1971 – 1972 Oulu – Kemi syväväylää varten. Suunnittelukortees Oy:n raportti Merenkulkuhallitukselle.
- /3/ Croasdale, K.R., 1974. Crushing Strength of Arctic Ice. Proc. Symposium of Beaufort Sea Coast and Shelf Research. Arctic Institute of North America.
- /4/ Enkvist, E., 1972. On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Ice breaking. The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland. Report No 24.
- /5/ Eranti, E., 1978. Rakenteiden jääkuormat ja jään kantokyky. TVH 753320.
- /6/ VTT, Tie- geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1993. Ilmastotilastot, 1961-90. Pakkasmäärät, lämpöastesummat ja lumen syvyydet.
- /7/ Tammelin, B., 1991. Suomen Tuuliatlas. Ilmatieteen laitos.
- /8/ Petroleum and natural gas industries, 2019. Arctic Offshore Structures. ISO 19906.
- /9/ Croasdale, K.R, Morgenstern, N.R. ja Nuttal, B., 1976. Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers. j. Glaciology 19 (81).
- /10/ Michel, B. ja Toussaint, M., 1976. Mechanism and Theory of Indentation of Ice Plates. J. Glaciology 18 (81).
- /11/ Frederking, R. ja Gold, R.W., 1975. Experimental Study of Edge Loading of Ice Plates. Canadian Geotech. J. 12.
- /12/ Enkvist, E ja Eranti, E., 1990. Development of Arctic Offshore Technology. Final Report of TEKES Technology Programme.
- /13/ Huovinen, S., 1990. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures. VTT Publications 62.
- /14/ Eranti, E., 1992. Dynamic ice structure interaction – Theory and applications. VTT Publications 90.
- /15/ Korzhavin, K.N., 1962. Action of Ice on Engineering Structures. USSR Academy of Sciences. CRELL Draft translation.
- /16/ Neill, C.R., 1976. Dynamic ice forces on piers and piles. An assessment of design guidelines in light of recent research. Canadian J. Civ. Eng 3.
- /17/ Rahlston, T.D., 1980. Plastic limit analysis on sheet ice loads on conical structures. Physics and Mechanics of Ice. New York.
- /18/ Oulun Yliopisto, 1986. Kemi 1 kartioprojekti, projektiraportit.
- /19/ Allyn, N. ja Wasilewski, B.R., 1979. Some Influences of Ice Rubble Field Formations around Artificial Islands in Deep Water. Proc. POAC Trondheim.
- /20/ Haggårt, S., 1958. Istryck mot bropelare. Väg- och vattenbyggaren 3.

- 
- /21/ Helminen, H., Häkkilä, K. Keränen, M., Koponen, J. Laihonen, P. ja Ylinen, H., 1998. Turun edustan merialueen virtaus- ja vedenlaatumalli. Suomen ympäristö, 203.
- /22/ SITO, 2018. Hailuodon kiinteä yhteys, vesilain mukainen hakemus.
- /23/ Leppäranta, M., 2013. Land-ice interaction in the Baltic Sea. Estonian Journal of Earth Sciences 62.
- /24/ Michel, B., 1966. Thrust Exerted by an Unconsolidated Ice Cover on a Boom. Proc. Conf. Ice Pressures against Structures. Nat. Res. Council of Canada. TM 92.
- /25/ Helsingin kaupungin satamalaitos, 1968. Helsingin kaupungin satamalaitoksen satamarakennusosaston kuormitusotasumia ja ohjeita satamarakenteiden suunnittelua varten. Kunnallistekniikka 6/1968.

# Liikenneviraston ohjeita 24/2017, Siltojen jääkuormat

Liikenneviraston ohjeita 24/2017

65

Eurokoodin soveltamisohje

Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 (6.12.2017)

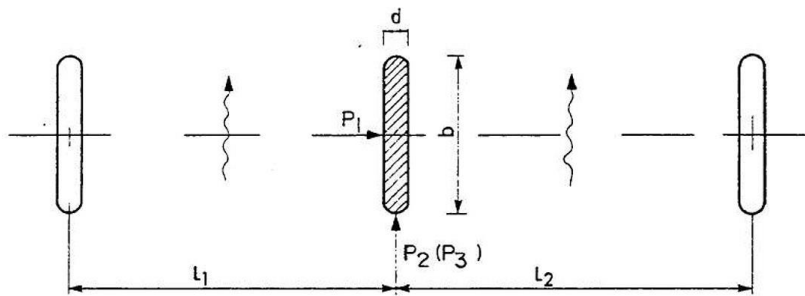
## H Eurokoodin soveltamisalan ulkopuolelle jäävät kuormat ja muut lisäohjeet

### H.1 Jääkuormat

Siltarakenne mitoitetaan jääkuormalle ottamalla huomioon paikalliset olosuhteet ja rakenteen muotoilu. Tavallisissa jokien jääolosuhteissa siltojen jääkuormat voidaan määrittää seuraavassa esitetyllä tavalla. Näitä arvoja pienempiä arvoja voidaan käyttää helppoissa olosuhteissa, esim. jos siltapilarit ovat joka puolelta jääpeitteen ympäröimiä ja jää sulaa paikoilleen. Käytettäessä pienempiä arvoja tulee siltapaikan paikalliset olosuhteet huomioida asianomaisen viranomaisen kanssa sovitulla tavalla. Erityisen vaikeissa olosuhteissa käytetään suurempia jääkuorman arvoja.

Rakenteisiin kohdistuvien jääkuormien oletetaan vaikuttavan vedenpinnan HW tai NW tasossa vaakasuorassa suunnassa.

Siltapilariin kohdistuu jääkuorma  $P_1$ , joka aiheutuu ensisijaisesti pysyvän jääpeitteen lämpötilan muutoksesta, ja jääkuorma  $P_2$ , joka aiheutuu virran paineesta kiinteään jääpeitteeseen. Kuorman  $P_1$ , otaksutaan vaikuttavan kohtisuoraan pilarin sivupintaa vastaan ja kuorman  $P_2$  virran suunnassa. (Kuva H.1). Jääkuormien  $P_1$  ja  $P_2$  ei oleteta vaikuttavan samanaikaisesti.



Kuva H.1 Sillan tukeen vaikuttavat jääkuormat

Jääkuorman  $P_1$  suuruus määritetään kaavasta

$$P_1 = b \cdot i_1 \quad (\text{H.1})$$

jossa

- $b =$  siltapilarin leveys
- $i_1 =$  100 kN/m linjan Kemi-Kajaani eteläpuolella  
150 kN/m linjan Kemi-Kajaani pohjoispuolella

Jos pilarin molemmiin puoliin on kiinteä jäänpeite,  $P$ :n arvoa voidaan pienentää.

66

Liikenneviraston ohjeita 24/2017

Eurokoodin soveltamisohje

Siltöjen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 (6.12.2017)

Jos vesistön rannat siltapaikan alueella ovat niin jyrkät, että jääkenttä saa täyden tuen vastareunaltaan, (esim. kallioranta 1:1 tai jyrkempi) kerrotaan jääkuorman  $P_1$  arvo kertoimella 1,5.

Jääkuorman  $P_2$  suuruus määritetään kaavasta

$$P_2 = 0,5(l_1 + l_2)i_2 \quad (\text{H.2})$$

jossa

$l_1$  ja  $l_2$  ovat etäisyydet tarkasteltavalta pilarilta viereisiin pilareihin

$i_2 =$  20 kN/m linja Kemi-Kajaani eteläpuolella

30 kN/m linjan Kemi-Kajaani pohjoispuolella

Jos siltapaikan alueella esiintyy liikkuvaa jäätä, tarkistetaan siltapilarit lisäksi virran suunnassa vaikuttavalle kuormalle  $P_3$ , joka määritetään kaavasta

$$P_3 = 1000 \cdot h \cdot d [\text{kN}] \quad (\text{H.3})$$

jossa

$h =$  jään paksuus tarkasteltavassa kohdassa (m)

Jään paksuudeksi ei kuitenkaan oleteta enempää kuin 1,0 m

$d =$  siltapilarin paksuus (m)

# Veden korkeuden kuukausijakautuma, mareografi Oulu (jäätalvikuvaus väreillä)

VEDENKORKEUDEN ÄÄRIARVOJA (cm)

Ilmatieteen laitos 14.7.2022

Mareografi: OULU

Korkeusjärjestelmä: Teoreettinen keskivesi

1970	22	4	7	18	11	12	54	30	48	48	39		54	1970
	-64	-46	-53	-43	-32	-34	-15	-26	-60	-27	-29		-64	
1971	14	24	6	4	28	6	38	53	60	126	152	79	152	1971
	-9	-32	-79	-45	-54	-56	-23	-26	-36	-41	-34	-55	-79	
1972	44	-11	2	16	14	30	26	36	57	8		121	121	1972
	-64	-55	-64	-98	-65	-33	-41	-47	-69	-12		10	-98	
1973	110	133	41	64	73	75	21	95	79	55	91	100	133	1973
	-40	-27	-14	-56	-59	-25	-32	-23	-52	-72	-68	-10	-72	
1974	62	57	-4	-11	8	27	62	47	89	90	47	112	112	1974
	-15	-45	-75	-70	-87	-33	-30	-27	-15	-96	-69	-18	-96	
1975	169	60	18	22	41	36	24	49	80	68	61	146	169	1975
	13	-37	-53	-72	-51	-58	-24	-47	-24	-43	-86	-39	-86	
1976	123	60	18	57	18	39	17	41	61	14	70	58	123	1976
	1	-34	-56	-62	-75	-56	-46	-44	-53	-86	-88	-86	-88	
1977	73	13	35	36	47	33	56	44	46	63	71	71	73	1977
	-43	-51	-51	-74	-49	-36	-107	-48	-81	-60	-12	-40	-107	
1978	98	11	24	25	-11	3	17	19	70	98	160	31	160	1978
	-36	-76	-46	-72	-93	-50	-45	-53	-49	-39	-24	-76	-93	
1979	18	25	38	19	38	21	34	51	97	45	67	126	126	1979
	-74	-57	-48	-78	-26	-33	-20	-64	-6	-46	-41	-50	-78	
1980	20	4	2	6	9	33	3	21	42	78	69	118	118	1980
	-69	-42	-74	-52	-52	-34	-48	-63	-20	-57	-85	-34	-85	
1981	128	97	56	8	11	31	45	42	55	60	91	101	128	1981
	-7	-26	-67	-70	-49	-51	-38	-76	-42	-42	-48	-59	-76	
1982	76	37	30	50	52	10	36	67	169	67	107	110	169	1982
	-63	-29	-20	-33	-34	-46	-24	-37	4	-66	-67	-18	-67	
1983	125	92	32	37	10	21	53	73	107	154	118	84	154	1983
	-19	-27	-30	-40	-48	-34	-24	-28	-21	-12	-57	-24	-57	
1984	183	57	21	21	1	34	31	64	22	87	60	81	183	1984
	-12	-38	-59	-69	-44	-56	-30	-41	-64	-24	-54	-27	-69	
1985	34	18	3	6	3	5	67	56	84	120	110	61	120	1985
	-101	-78	-45	-48	-54	-33	-31	-26	-30	-68	-53	-32	-101	
1986	42	-1	44	6	28	37	29	57	121	106	112	141	141	1986
	-43	-59	-46	-90	-45	-37	-67	-77	-42	-15	-16	-90	-90	
1987	24	56	-8	5	47	43	33	55	47	102	62	81	102	1987
	-106	-34	-52	-44	-44	-58	-28	-53	-29	-20	-44	-98	-106	
1988	120	44	33	30	7	39	49	44	93	88	109	105	120	1988
	-8	-32	-42	-55	-45	-52	-40	-19	-29	-70	-53	-71	-71	
1989	109	110	68	23	60	39	31	63	88	78	101	97	110	1989
	7	17	8	-51	-36	-39	-20	-44	-43	-48	-72	-58	-72	
1990	75	99	123	61	23	32	36	40	31	96	41	80	123	1990
	-13	19	21	-24	-25	-50	-57	-16	-45	-58	-85	-36	-85	
1991	80	33	11	18		58	42	41	112	66	132	93	132	1991
	-31	-79	-50	-34		-30	-19	-26	-57	-82	-31	-53	-82	

erittäin ankara

ankara

keskimääräinen

leuto

erittäin leuto

1992	115	66	85	45	55	26	39	108	68	17	84	162	162	1992
	-30	-33	-39	-63	-18	-28	-37	-15	-63	-101	-64	-36	-101	
1993	110	117	38	39	-4	26	40	46	25	50	45	74	117	1993
	-14	-49	-41	-59	-57	-33	-38	-32	-44	-90	-47	-32	-90	
1994	68	36	70	60	27	43	35	59	44	109	106	120	120	1994
	-43	-45	-52	-39	-66	-14	-34	-47	-56	-47	-33	-6	-66	
1995	124	103	109	85	44	45	37	33	38	112	75	50	124	1995
	-47	-9	-43	-56	-94	-35	-24	-45	-57	-64	-79	-72	-94	
1996	20	12	-3	9	7	48	53	21	15	115	93	71	115	1996
	-65	-83	-63	-67	-66	-22	-37	-39	-71	-31	-75	-68	-83	
1997	54	78	77	50	31	7	-2	27	125	84	53	38	125	1997
	-65	-70	-45	-81	-42	-47	-46	-47	-30	-43	-50	-52	-81	
1998	73	81	64	-8	27	39	50	44	52	157	82	102	157	1998
	-122	-60	-48	-63	-57	-79	-33	-16	-41	-62	-11	-93	-122	
1999	111	68	29	56	9	21	50	31	61	47	132	124	132	1999
	-30	-68	-27	-39	-42	-45	-28	-27	-50	-64	-73	-47	-73	
2000	113	125	86	12	34	92	40	51	58	32	28	73	125	2000
	-56	10	-19	-40	-55	-21	-52	-13	-39	-74	-39	-33	-74	
2001	43	34	8	25	29	34	39	74	62	57	135	76	135	2001
	-41	-79	-42	-82	-36	-30	-37	-19	-40	-30	-93	-101	-101	
2002	64	141	81	14	13	59	64	22	67	36	21	22	141	2002
	-61	11	-27	-48	-46	-49	-15	-31	-94	-59	-84	-87	-94	
2003	74	66	12	59	32	35	18	22	116	95	58	102	116	2003
	-48	-32	-55	-70	-43	-43	-18	-36	-26	-71	-38	-68	-71	
2004	73	50	42	12	23	32	60	32	88	89	94	123	123	2004
	-51	-19	-93	-54	-61	-17	-28	-46	-40	-40	-19	-4	-93	
2005	121	111	1	13	61	32	42	73	115	106	90	50	121	2005
	11	-63	-73	-53	-54	-31	-41	-57	-12	-84	-40	-45	-84	
2006	53	35	-18	24	11	36	53	14	44	45	119	129	129	2006
	-65	-51	-68	-46	-51	-16	-29	-32	-39	-67	-79	18	-79	
2007	166	85	46	59	65	20	47	79	123	76	94	90	166	2007
	-22	-37	-25	-57	-36	-34	-46	-33	-10	-44	-52	-24	-57	
2008	90	108	81	28	-2	30	35	71	52	131	119	118	131	2008
	-42	-54	-64	-86	-45	-60	-36	-52	-40	-41	-107	-59	-107	
2009	76	55	21	8	69	20	28	46	124	130	46	63	130	2009
	-35	-65	-43	-53	-42	-73	-60	-21	-7	-40	-62	-83	-83	
2010	28	1	22	23	18	35	66	47	54	73	58	37	73	2010
	-77	-72	-58	-32	-35	-46	-56	-48	-67	-94	-80	-63	-94	
2011	35	42	24	36	41	48	31	52	113	125	116	172	172	2011
	-36	-33	-50	-39	-59	-34	-43	-41	-19	-16	-38	1	-59	
2012	82	58	50	58	58	26	44	44	130	68	79	39	130	2012
	-60	-46	-24	-52	-58	-97	-39	-41	-30	-33	-81	-86	-97	
2013	27	23	6	37	18	18	35	47	30	46	124	100	124	2013
	-56	-50	-89	-57	-48	-53	-57	-21	-62	-54	-34	-56	-89	
2014	67	65	68	45	28	-2	14	40	60	83	55	70	83	2014
	-53	-47	-59	-40	-72	-58	-35	-32	-87	-58	-38	-41	-87	
2015	116	86	88	46	100	69	42	33	56	86	169	132	169	2015
	-22	-60	-45	-26	-29	-15	-25	-36	-47	-41	-36	11	-60	

erittäin ankara

ankara

keskimääräinen

leuto

erittäin leuto

2016	86	73	43	24	18	18	43	87	78	50	65	92	92	2016
	-109	-14	-47	-65	-53	-56	-14	-32	-26	-60	-88	-41	-109	
2017	111	30	38	60	28	35	40	64	43	89	92	90	111	2017
	-19	-45	-40	-39	-55	-31	-26	-31	-37	-75	-5	0	-75	
2018	66	24	-2	0	20	37	12	83	103	100	110	89	110	2018
	-16	-69	-66	-65	-50	-59	-43	-20	-30	-19	-61	-43	-69	
2019	91	49	80	42	100	63	22	59	56	87	25	117	117	2019
	-109	-68	-55	-115	-74	-38	-65	-43	-10	-64	-80	-30	-115	
2020	118	152	117	41	26	68	40	37	92	59	134	71	152	2020
	-17	17	-31	-38	-26	-44	-18	-27	-78	-83	-12	-64	-83	
2021	20	8	44	75	11	68	31	42	18	70	85	39	85	2021
	-48	-61	-70	-53	-47	-32	-32	-39	-38	-45	-36	-63	-70	
2022	78	119	80	29	34	37								2022
	-72	-2	-69	-65	-33	-22								

erittäin ankara

ankara

keskimääräinen

leuto

erittäin leuto

Jakson 1922-2021 maksimit ja minimi:

183	153	123	86	100	92	67	108	169	157	169	172	183
-131	-92	-96	-115	-114	-97	-107	-90	-102	-130	-108	-101	-131

Suluissa olevat arvot on laskettu viereisten mareografien avulla havaintojen puuttuessa.

# Tuuli, Korsnäs Moikipää

## Korsnäs Moikipää

Taulukko 3. Tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot eri vuorokauden aikoina paikallista talviaikaa.

Klo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Vuosi
2	6.3	5.8	6.0	5.5	5.2	5.4	4.9	5.3	6.4	7.2	7.6	7.1	6.1
5	6.4	5.7	5.9	5.4	5.2	5.4	4.8	5.2	6.4	7.2	7.7	7.0	6.0
8	6.4	5.7	5.9	5.5	5.2	5.4	4.8	5.2	6.6	7.1	7.6	7.0	6.0
11	6.5	5.7	6.0	5.7	5.8	5.9	5.2	5.4	6.7	7.2	7.6	7.0	6.2
14	6.7	5.9	6.4	6.0	6.1	6.4	5.5	5.9	6.8	6.9	7.5	7.2	6.4
17	6.3	5.9	6.5	6.0	6.1	6.1	5.5	5.9	6.8	7.0	7.7	7.1	6.4
20	6.4	6.0	6.2	5.8	5.7	5.7	5.1	5.5	6.6	7.2	7.8	7.1	6.2
23	6.2	5.8	5.9	5.7	5.2	5.4	4.8	5.4	6.5	7.3	7.7	7.0	6.1
Vrk	6.4	5.8	6.1	5.7	5.6	5.7	5.1	5.5	6.6	7.1	7.6	7.1	6.2

Taulukko 4. Tuulen nopeuden (m/s) jakauma tuulen suunnittain promilleina.

Sektor	<3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	>22
0:	138	135	141	121	101	75	70	62	50	24	49	21	8	4	1	1
30:	112	100	116	116	111	87	75	82	60	39	59	30	7	4	1	0
60:	150	116	131	130	104	92	86	65	39	32	36	11	6	3	0	0
90:	178	149	157	136	106	91	58	52	32	15	19	4	1	0	0	0
120:	175	146	141	148	116	94	68	48	24	15	21	4	1	0	0	0
150:	141	124	138	128	111	91	83	78	37	25	26	12	4	1	1	0
180:	66	71	101	112	107	105	108	92	71	48	68	32	10	4	1	2
210:	84	91	116	125	106	94	93	84	62	37	65	32	7	4	2	0
240:	119	117	121	132	104	89	92	66	49	34	44	21	8	2	1	1
270:	127	116	127	116	107	91	80	61	50	34	46	30	8	4	2	2
300:	160	132	146	127	104	84	77	45	25	29	33	20	11	4	1	1
330:	184	167	176	132	94	76	58	42	21	12	27	6	2	2	1	0
Kaikki	122	112	128	124	106	91	83	71	50	32	47	22	7	3	1	1

Taulukko 5. Eri tuulennopeusluokkia (2..22 m/s) vastaavat pysyvyysskäyrän arvot kuukausittain promilleina.

Kk	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22
1:	919	849	746	637	514	422	352	273	203	152	120	62	22	9	4	1
2:	923	836	716	573	456	360	285	213	150	108	81	35	11	5	2	1
3:	941	873	769	645	512	404	304	225	159	105	71	28	14	5	2	1
4:	953	862	730	578	439	330	250	176	119	84	67	30	10	4	1	1
5:	950	857	732	575	446	331	243	169	103	70	47	12	2	1	0	0
6:	952	876	743	595	462	347	257	172	108	70	51	18	7	4	2	0
7:	945	832	669	511	371	269	186	116	70	48	33	11	2	1	1	1
8:	957	873	728	583	436	320	227	152	93	51	31	12	2	1	0	0
9:	970	900	791	677	566	463	366	271	192	137	95	44	14	5	3	1
10:	978	940	864	758	649	541	432	331	233	156	103	42	11	4	1	1
11:	978	946	888	801	705	601	488	385	280	201	144	56	17	6	3	1
12:	945	884	804	714	610	506	419	331	256	189	140	61	29	15	5	2
Vuosi	951	878	766	638	514	408	317	234	164	114	82	34	12	5	2	1

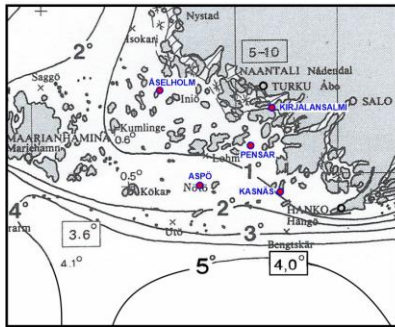
Taulukko 6. Tuulen keskinopeus (Ka) sekä tuulen suunnan (dd), tuulen nopeudesta lasketun tuulienergian (E) ja tuuliavoimailloilla A ja C saatavan tuulienergian suhteellinen osuus (%) tuulensuuntasektoreittain. Alimpane keskimääräiset WEIBULL-parametrit A ja k.

Tyynet: 686 ( 1.83 % )

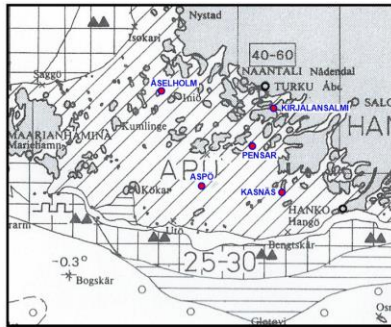
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Kaikki
Ka m/s	5.9	6.5	5.8	5.0	5.0	5.7	7.2	6.8	6.2	6.2	5.7	5.0	6.2
dd %	9.0	11.6	5.5	5.8	4.2	7.1	18.8	10.4	6.8	8.6	4.3	6.0	
E %	8.8	13.4	4.5	3.1	2.3	5.6	25.7	12.7	6.8	9.5	4.0	3.5	
A(100) %	8.4	12.7	5.2	4.3	3.3	6.6	24.0	12.1	7.0	8.6	3.8	4.2	
C(100) %	8.5	13.5	4.8	3.4	2.5	5.8	26.0	12.8	6.9	8.9	3.6	3.4	
A	7.0	7.8	7.0	6.1	6.2	6.9	8.7	8.1	7.4	7.5	6.7	5.9	7.4
k	1.72	1.94	1.94	1.97	2.08	1.97	2.28	2.08	1.92	1.80	1.63	1.68	1.91



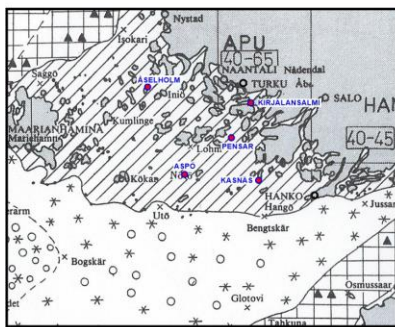
# Jääkartat lounaissaaristo



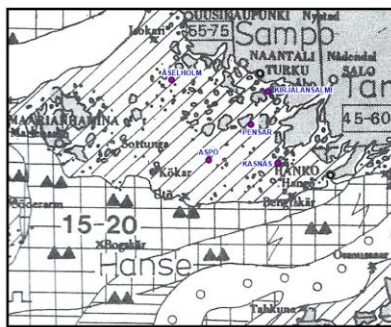
22.12.1986



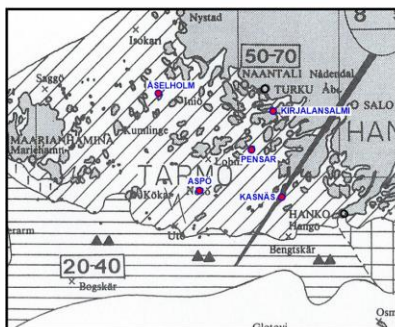
22.1.1987



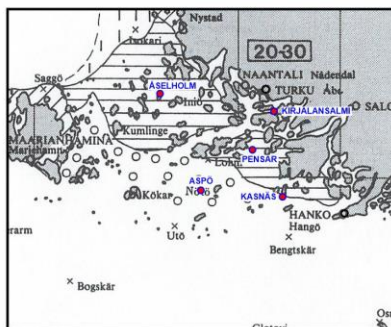
26.2.1987



19.3.1987



13.4.1987



4.5.1987

MERENTUTKIMUSLAITOS  
HAVSFORSKNINGSINSTITUTET  
INSTITUTE OF MARINE RESEARCH

1987 TALVI

Yhensyökönnyt, yhtenäistetty tai hyvin tiheä ajoää  
Consolidated, compact or very close ice (C = 10/10)  
Sammenfrosset, tømest eller tynest 10-dive

Ahaatunus tai ryykkökönnyt jää (F=rahausmitta/raha)  
Rugged or hummocked ice (F=number of ridges/m)  
Våner og oppstøttet is, 1F=raha/sjötet

Pääkkökönnut ajoää  
Ruffed ice (C = concentration)  
Hoppelinen is

Tiheä ajoää  
Close ice (C = 6/10)  
Til-dive

Havne ajoää  
Open ice (4 = 6/10)  
Sjötet-dive

Hyvin havne ajoää  
Very open ice (1 = 3/10)  
Sjötet-dive

Jään reunat tai jään raja  
Ice edge or ice boundary  
Isan etelä- ja länsi-  
linjat

Arvioitu jään reuna tai jään raja  
Estimated ice edge or ice boundary  
Uppskattad isan etelä- och västra  
linjerna

Veden lämpötila tai veden lämpötila, °C  
Wattentemperatur isoterm, °C  
Vattentemperatur isoterm, °C

Mittauksen jään paksuus, cm  
Måttad isjocklek i cm

Avvatten  
Open water (<1/10)  
Öppet vatten

Uusi jää  
New ice

Nyis  
Nyis

Työnnetty jää  
Level ice

Jään isä  
Jän is

Kiltojaää  
Fast ice

Fast is

Sohjovä  
Stomped

Stampall

Halkama  
Crack

Sorissa  
Sorissa

Rallo  
Lad

Näki  
Näki

Jään kokonaistalentiatio (1/10)  
C = Total ice concentration (in tenth)  
Total iskoncentration

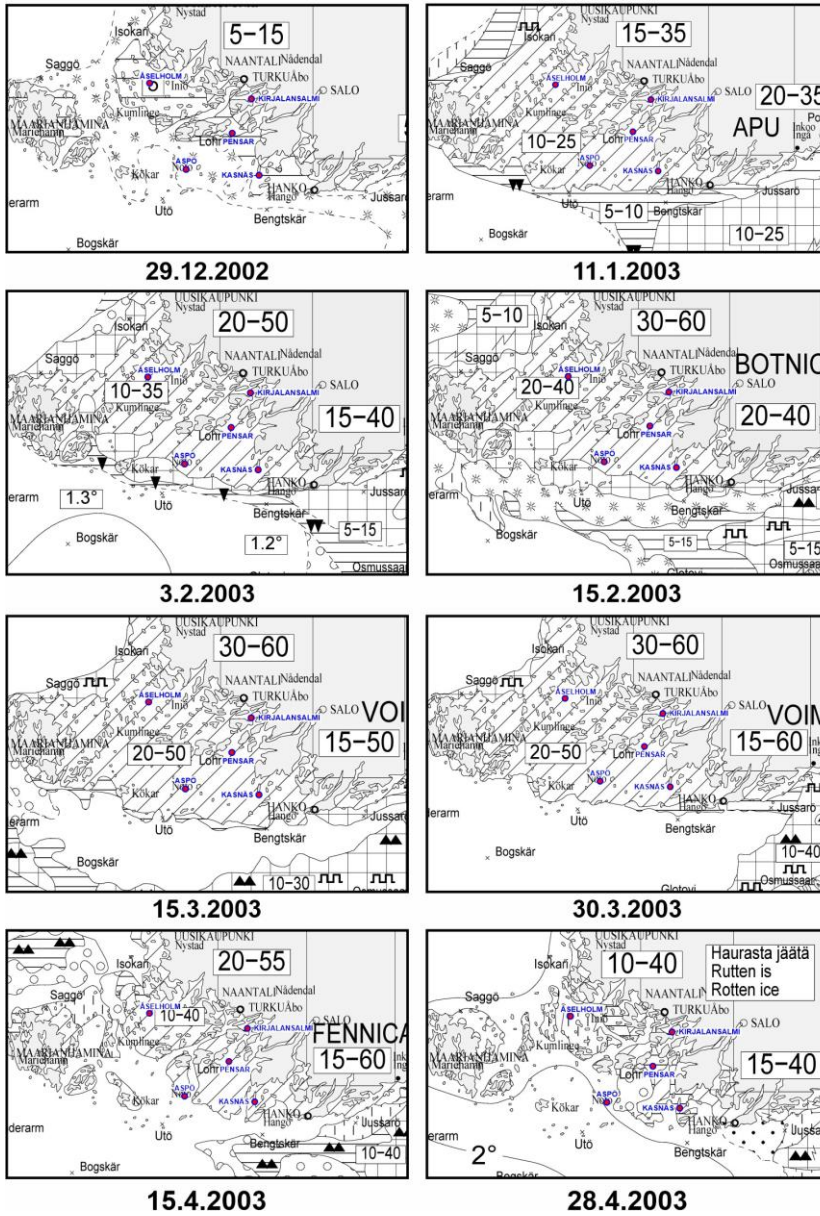
Osittaiskoncentration  
C<sub>a</sub>C<sub>b</sub>C<sub>c</sub> = Partial concentration  
Delkoncentration

Jään kehitys  
S<sub>a</sub>S<sub>b</sub>S<sub>c</sub> = Stage of development  
Isjocklek

Jään muotoiltojen koko  
F<sub>a</sub>F<sub>b</sub>F<sub>c</sub> = Form of ice/Flöjesize  
Form av is/Flakstorlek

paikun jää (a)  
toiseksi paikun jää (b)  
kolmanneksi paikun jää (c)  
of thickest ice (a)  
second --- (b)  
third --- (c)  
grövrsta isen (a)  
näst --- (b)  
trödle --- (c)

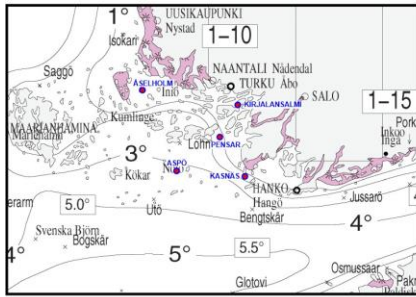
S	cm	symbol	#	F	cm	symbol	#
0	-	-	0	33			
1	new ice	1	42				
2	<10	2	420				
3	10-30	3	20-100				
4	10-15	4	100-500				
5	15-30	5	500-2000				
6	30-200	6	2000-10000				
7	30-70	7	>10000				
8	30-50	8	Fast ice				
9	50-70	9	Not determined				
1	70-120	x	Not known				



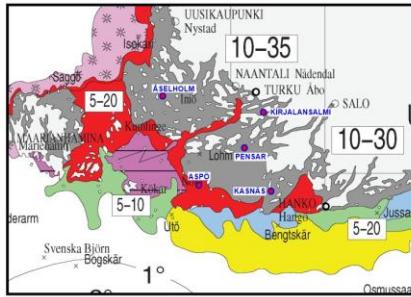
ILMATIETEEN LAITOS  
METEOROLOGISKA INSTITUTET  
THE FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE  
JÄÄKARTTA / ISKARTA / ICE CHART

**TALVI 2003**

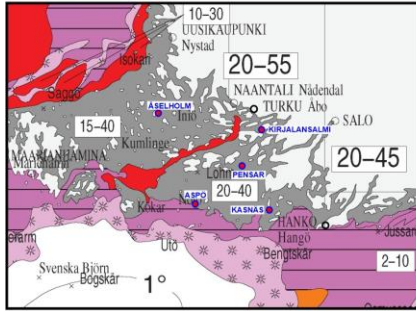
- Consolidated, compact or very close ice (9-10/10)
- Ridged or hummocked ice (F=number of ridges/naut.m.)
- Päällekkään ajautunut jää / Raffled ice (C=concentr.) / Höpöjäinen is
- Open ice (4-6/10)
- Tiheä ajojää / Close ice (7-8/10) / Täti drivvis
- Harva ajojää / Open ice (4-6/10) / Spridd drivvis
- Hyvin harva ajojää / Very open ice (1-3/10)
- Estimated ice edge or boundary / Uppskattad isgräns eller iskant
- Ice edge or ice boundary / Iskant eller isgräns
- Arvioitu jään reunus tai jään raja / Estimated ice edge or boundary / Uppskattad isgräns eller iskant
- Veden lämpötilan tasa-arvokäyrä / Watertemperatur isotherm, °C
- Mittattu jään paksuus / Thickness measured in cm / Uppmättat istjocklek i cm
- Avovesi <1/10
- Open water
- Öppet vatten
- Uusi jää / New ice
- Nivis
- Tasainen jää
- Level ice
- Jännin jää
- Kintojää
- Fast ice
- Sohjovyö
- Windrow
- Stampvall
- Halkaama
- Fracture
- Spricka
- Lead
- Räk
- Haurasta jäätä = Rotten ice
- Rotten ice
- Jään kokonaiskonsentraatio (1/10) / Total ice concentration (1/10)
- Jään konsentraatio (1/10) / Partial concentration (1/10)
- Osittaiskonsentraatio (1/10) / Partial concentration (1/10)
- Jään paksuus / Ice thickness
- Jäätikkö / Stage of development
- Jään muotoilun muoto / Form of ice/beesize
- paksuus jää / thickness ice
- kalmakkeinen paksuus jää / kalmankeinen paksuus jää
- grivista isen / nigrogrivista isen / mörja grivista isen
- tiheä isä / second thickness ice
- ohut tiheä isä / thin thickness ice
- symbol cm / symbol 0 m
- 1 new ice / 0 < 5
- 2 < 10 / 1-2
- 3 10-30 / 2-20
- 4 10-15 / 30-100
- 5 15-30 / 4 100-500
- 6 30-200 / 5 500-2000
- 7 30-70 / 6 2000-10000
- 8 80-80 / 7 > 10000
- 9 90-70 / 8 Ice ice
- 1 70-120 / 9 Not determined
- or unknown



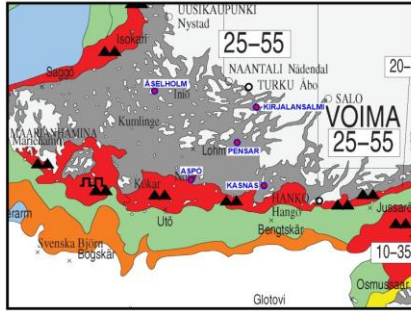
5.12.2010



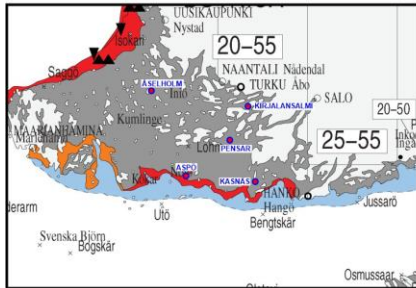
15.1.2011



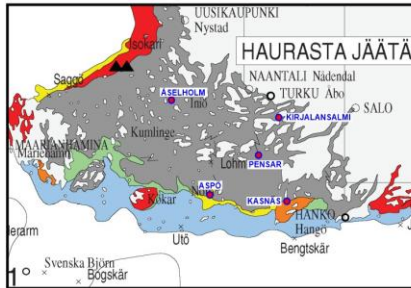
15.2.2011



15.3.2011



30.3.2011



15.4.2011

ILMATIETEEN LAITOS  
METEOROLOGISKA INSTITUTET  
THE FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE  
JÄÄKARTTA ISKARTTA ICE CHART

**TALVI 2011**

Thick ice (paksu jää) - thickness more than 10 cm (10-1000)  
 Thin ice (ohut jää) - thickness less than 10 cm (1-1000)  
 Very thin ice (erittäin ohut jää) - thickness less than 1 cm (1-1000)  
 No ice (ei jäätä)

Ice concentration (C) - percentage of ice in the area  
 C < 10%  
 10-20%  
 20-30%  
 30-40%  
 40-50%  
 50-60%  
 60-70%  
 70-80%  
 80-90%  
 90-100%

Ice type (tyyppi) - development stage  
 F1 - 1st year ice  
 F2 - 2nd year ice  
 F3 - 3rd year ice  
 F4 - 4th year ice  
 F5 - 5th year ice  
 F6 - 6th year ice  
 F7 - 7th year ice  
 F8 - 8th year ice  
 F9 - 9th year ice  
 F10 - 10th year ice  
 F11 - 11th year ice  
 F12 - 12th year ice  
 F13 - 13th year ice  
 F14 - 14th year ice  
 F15 - 15th year ice  
 F16 - 16th year ice  
 F17 - 17th year ice  
 F18 - 18th year ice  
 F19 - 19th year ice  
 F20 - 20th year ice  
 F21 - 21st year ice  
 F22 - 22nd year ice  
 F23 - 23rd year ice  
 F24 - 24th year ice  
 F25 - 25th year ice  
 F26 - 26th year ice  
 F27 - 27th year ice  
 F28 - 28th year ice  
 F29 - 29th year ice  
 F30 - 30th year ice  
 F31 - 31st year ice  
 F32 - 32nd year ice  
 F33 - 33rd year ice  
 F34 - 34th year ice  
 F35 - 35th year ice  
 F36 - 36th year ice  
 F37 - 37th year ice  
 F38 - 38th year ice  
 F39 - 39th year ice  
 F40 - 40th year ice  
 F41 - 41st year ice  
 F42 - 42nd year ice  
 F43 - 43rd year ice  
 F44 - 44th year ice  
 F45 - 45th year ice  
 F46 - 46th year ice  
 F47 - 47th year ice  
 F48 - 48th year ice  
 F49 - 49th year ice  
 F50 - 50th year ice  
 F51 - 51st year ice  
 F52 - 52nd year ice  
 F53 - 53rd year ice  
 F54 - 54th year ice  
 F55 - 55th year ice  
 F56 - 56th year ice  
 F57 - 57th year ice  
 F58 - 58th year ice  
 F59 - 59th year ice  
 F60 - 60th year ice  
 F61 - 61st year ice  
 F62 - 62nd year ice  
 F63 - 63rd year ice  
 F64 - 64th year ice  
 F65 - 65th year ice  
 F66 - 66th year ice  
 F67 - 67th year ice  
 F68 - 68th year ice  
 F69 - 69th year ice  
 F70 - 70th year ice  
 F71 - 71st year ice  
 F72 - 72nd year ice  
 F73 - 73rd year ice  
 F74 - 74th year ice  
 F75 - 75th year ice  
 F76 - 76th year ice  
 F77 - 77th year ice  
 F78 - 78th year ice  
 F79 - 79th year ice  
 F80 - 80th year ice  
 F81 - 81st year ice  
 F82 - 82nd year ice  
 F83 - 83rd year ice  
 F84 - 84th year ice  
 F85 - 85th year ice  
 F86 - 86th year ice  
 F87 - 87th year ice  
 F88 - 88th year ice  
 F89 - 89th year ice  
 F90 - 90th year ice  
 F91 - 91st year ice  
 F92 - 92nd year ice  
 F93 - 93rd year ice  
 F94 - 94th year ice  
 F95 - 95th year ice  
 F96 - 96th year ice  
 F97 - 97th year ice  
 F98 - 98th year ice  
 F99 - 99th year ice  
 F100 - 100th year ice

# Tuulen nopeudet asemilla Hailuoto Marjanemi ja Oulun lentoasema

## Hailuoto Marjanemi tuulen nopeudet

Taulukko 4. Tuulen nopeuden (m/s) jakauma tuulen suunnittain promilleina.

Sektori	<3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	>22	m/s
0:	123	86	97	99	93	87	71	62	68	46	68	43	31	12	11	3	
30:	130	117	141	140	127	99	66	41	42	21	34	19	11	4	6	1	
60:	163	160	184	196	133	62	41	21	20	10	8	2	0	0	0	0	
90:	165	152	197	217	137	63	32	14	14	4	4	1	1	0	0	0	
120:	108	112	163	198	171	136	56	31	16	3	7	1	1	0	0	0	
150:	79	89	123	171	144	142	97	60	43	19	28	6	0	0	0	0	
180:	86	70	76	110	110	105	88	69	75	63	89	43	10	2	4	3	
210:	73	63	71	76	90	75	80	66	83	61	115	83	38	12	10	6	
240:	122	90	69	84	80	80	93	68	67	54	89	56	35	5	8	1	
270:	125	81	92	91	99	97	82	96	72	52	65	34	8	3	2	0	
300:	136	85	115	108	95	89	91	47	49	44	79	35	16	5	3	4	
330:	123	76	84	116	100	113	93	46	61	38	53	47	29	10	5	8	
Kaikki	113	94	113	130	115	97	75	53	54	37	58	34	16	5	5	2	

Taulukko 5. Eri tuulenoapeusluokkia (2..22 m/s) vastaavat pysyvyyssäyrän arvot kuukausittain promilleina.

Kk	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	m/s
I	920	832	727	624	501	393	284	223	180	142	113	62	31	13	9	4	
II	934	866	787	694	578	475	381	295	231	168	130	60	23	10	6	0	
III	945	872	797	700	575	464	370	294	254	186	150	80	27	14	7	3	
IV	952	901	797	672	533	398	285	211	149	99	59	20	9	1	0	0	
V	967	892	776	645	491	366	246	157	98	52	27	7	3	0	0	0	
VI	959	876	774	655	502	368	267	188	148	95	60	17	5	2	0	0	
VII	960	869	742	594	422	305	226	149	107	76	57	23	10	6	4	1	
VIII	975	896	790	648	487	346	262	197	145	95	71	32	13	9	7	4	
IX	976	906	796	671	566	445	345	273	229	175	144	79	31	6	3	1	
X	987	962	923	854	771	684	584	508	432	348	282	162	82	39	22	9	
XI	986	944	880	783	677	600	525	450	372	296	231	138	64	26	12	1	
XII	932	845	753	659	548	441	351	282	237	199	157	90	45	18	13	4	
Vuosi	957	887	793	680	550	435	338	263	210	156	119	61	27	11	7	2	

## Oulun lentoasema tuulen nopeudet

Taulukko 4. Tuulen nopeuden (m/s) jakauma tuulen suunnittain promilleina.

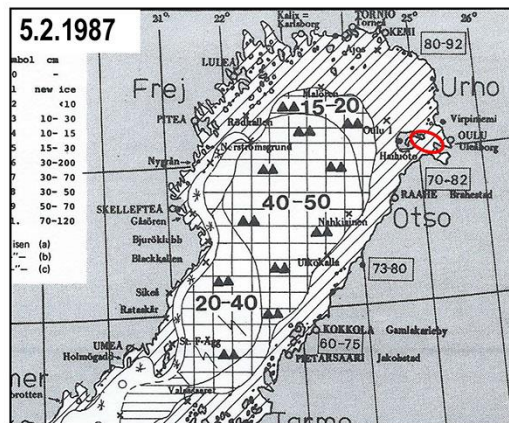
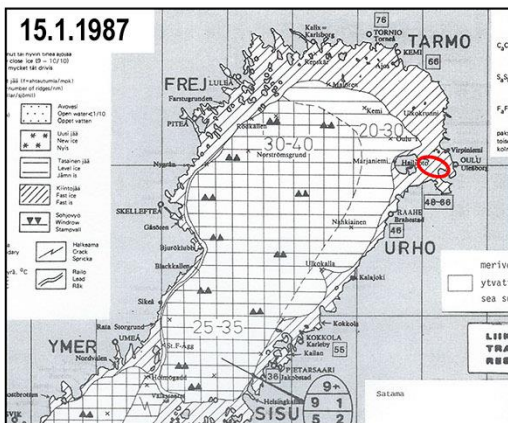
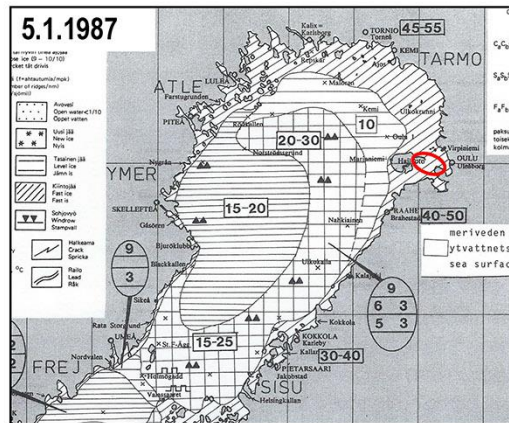
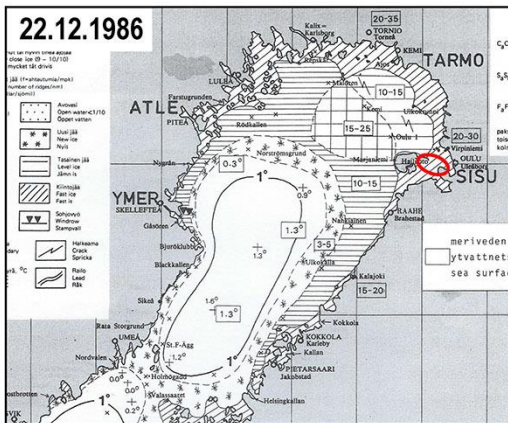
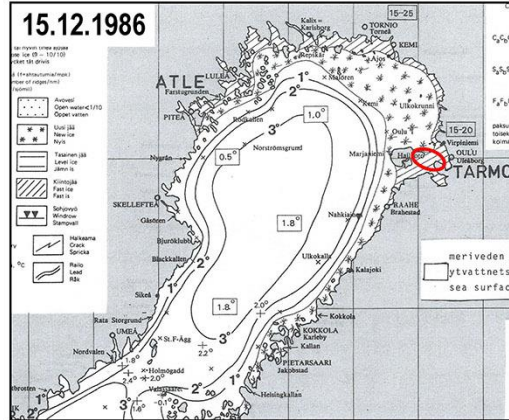
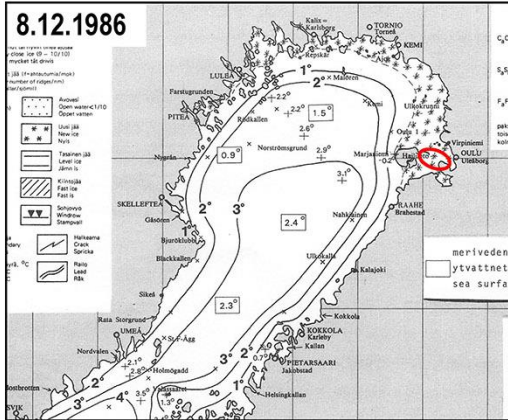
Sektori	<3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	>22	m/s
0:	465	227	134	100	43	21	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	
30:	465	252	138	93	36	11	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
60:	464	268	150	76	32	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
90:	382	225	183	111	55	29	12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
120:	256	223	187	145	76	55	30	14	9	3	2	0	0	0	0	0	
150:	209	201	192	180	91	63	37	15	7	3	2	0	0	0	0	0	
180:	219	199	205	179	103	58	23	10	2	1	2	0	0	0	0	0	
210:	195	175	203	176	107	77	37	17	9	3	1	1	0	0	0	0	
240:	188	170	161	155	123	90	62	26	12	7	6	2	0	0	0	0	
270:	201	136	133	157	121	108	66	36	21	10	10	1	0	0	0	0	
300:	353	180	131	105	85	56	41	24	13	7	4	1	0	0	0	0	
330:	332	194	167	134	81	45	28	9	6	3	0	0	0	0	0	0	
Kaikki	291	202	170	141	83	55	31	14	7	3	2	0	0	0	0	0	

Taulukko 5. Eri tuulenoapeusluokkia (2..22 m/s) vastaavat pysyvyyssäyrän arvot kuukausittain promilleina.

Kk	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	m/s
I	803	651	481	350	233	159	96	56	32	18	10	3	0	0	0	0	
II	829	663	494	356	225	142	82	45	25	14	6	1	0	0	0	0	
III	891	739	541	351	192	111	59	32	17	6	4	0	0	0	0	0	
IV	893	725	514	329	180	95	49	21	10	2	1	0	0	0	0	0	
V	905	738	514	335	188	99	50	14	5	2	1	0	0	0	0	0	
VI	905	729	518	347	194	105	46	13	3	1	0	0	0	0	0	0	
VII	886	686	442	251	129	62	24	8	2	0	0	0	0	0	0	0	
VIII	891	691	453	271	135	72	31	13	3	1	0	0	0	0	0	0	
IX	880	712	511	345	200	107	46	20	9	4	2	0	0	0	0	0	
X	904	758	552	370	219	122	61	32	17	8	4	1	0	0	0	0	
XI	890	748	568	393	234	137	69	33	17	8	3	1	0	0	0	0	
XII	829	670	498	349	222	141	78	33	17	7	3	1	0	0	0	0	
Vuosi	876	709	507	337	196	112	58	27	13	6	3	0	0	0	0	0	

# Erilaisten jäätalvien kehitys Hailuodon alueella

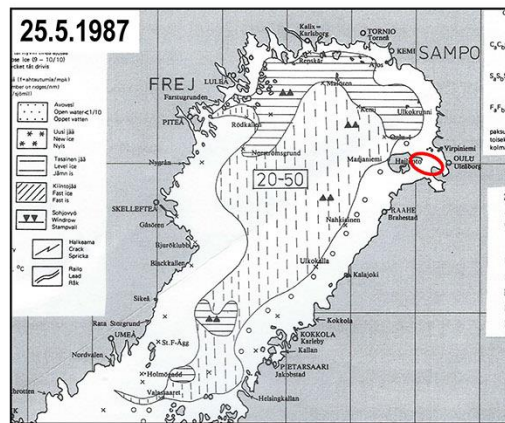
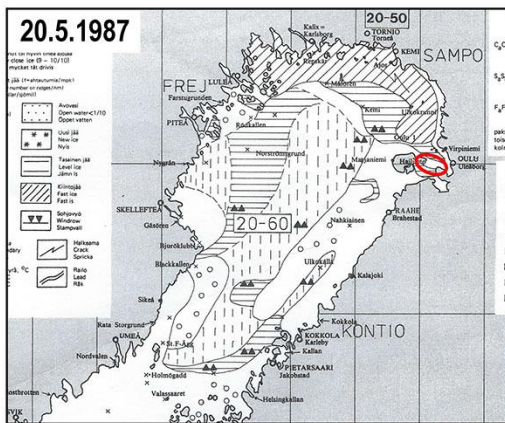
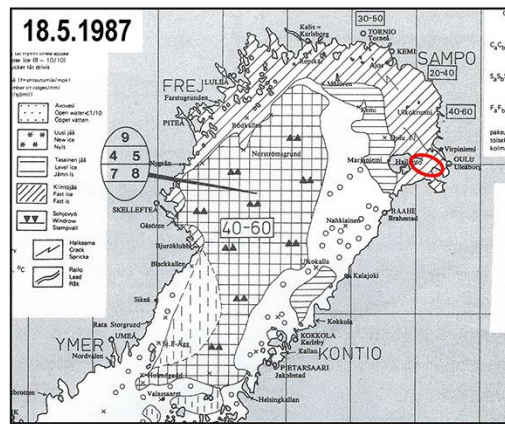
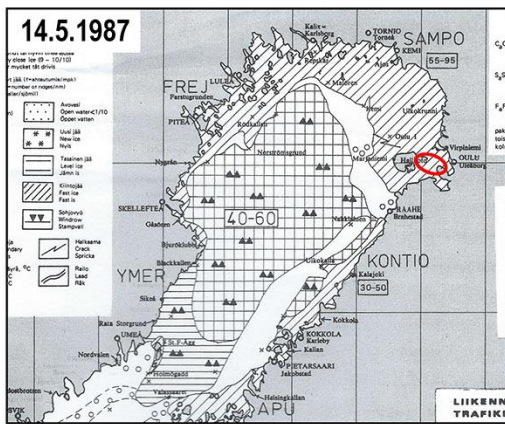
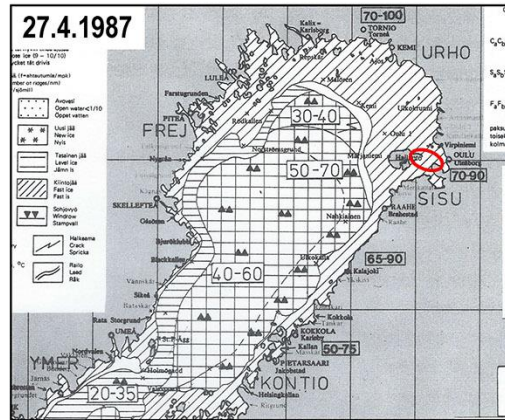
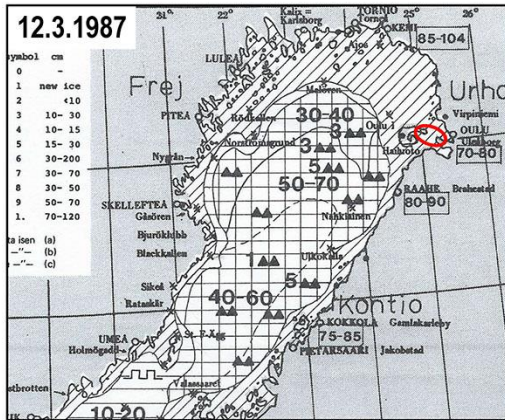
1987 Erittäin ankara talvi Hailuoto, sivu 1



- Yhteenjääntynyt, yhteenjautunut tai hyvin tiheä ajojää  
Consolidated, compact or very close ice (9-10/10)
- Ahtaunut tai ryykköitynyt jää (f=taantumia/mpk)  
Ridged or hummocked ice (f=number of ridges/naut.m)
- Päälekkäin ajautunut jää  
Rafted ice (C=concentr.)
- Tiheä ajojää  
Close ice (7-8/10)
- Harva ajojää  
Open ice (4-6/10)
- Hyvin harva ajojää  
Very open ice (1-3/10)
- Jään reuna tai jään raja  
Ice edge or boundary
- Arvioitu jään reuna tai jään raja  
Estimated ice edge or boundary

- Veden lämpötilan tasa-arvokäyrä  
Watertemperature isotherm °C
- Mitattu jään paksuus  
Thickness measured in cm
- Avovesi <1/10  
Open water
- Uusi jää  
New ice
- Tasainen jää  
Level ice
- Kiintojää  
Fast ice
- Sohjoivö  
Windrow
- Halkeama  
Fracture
- Railo  
Lead

1987 Erittäin ankara talvi Hailuoto, sivu 2



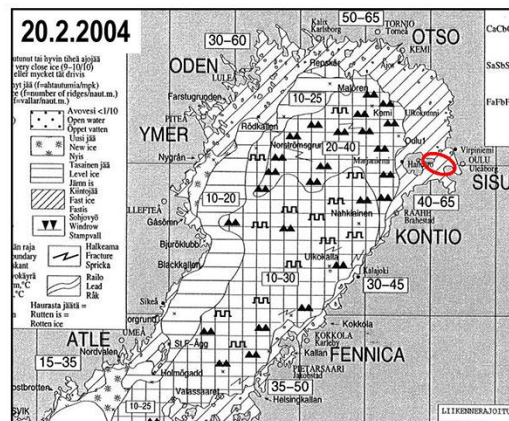
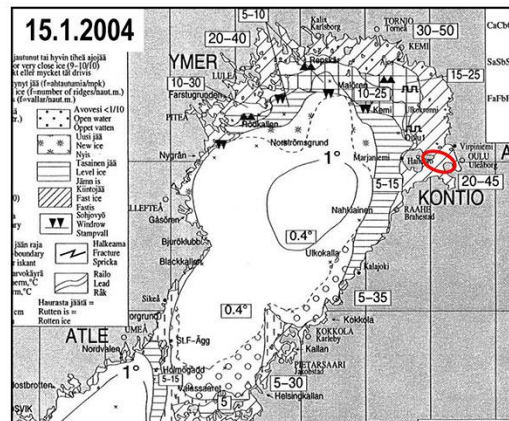
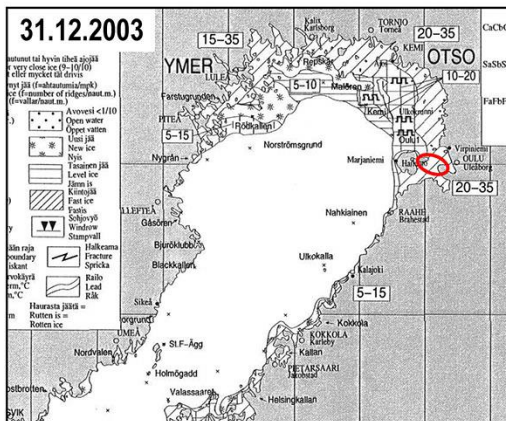
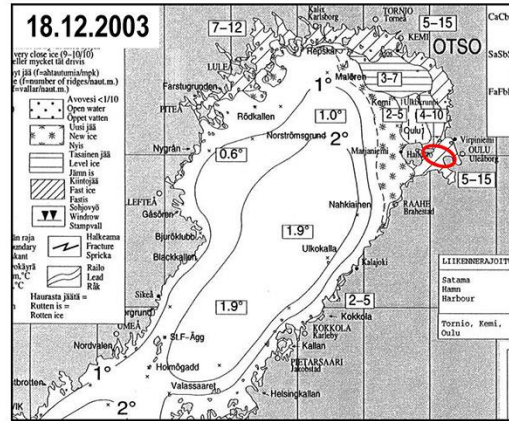
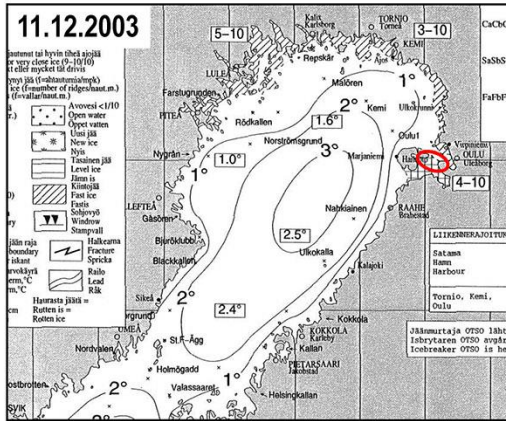
- |  |   |   |                           |                      |
|--|---|---|---------------------------|----------------------|
| Yhteensajautunut, yhteensajautunut tai hyvin tiheä ajojää<br>Consolidated, compact or very close ice (9-10/10) | Harva ajojää<br>Open ice (4-6/10)                                   | Veden lämpötilan tasa-arvokäyrä<br>Watertemperature isotherm °C | Uusi jää<br>New ice       | Sohjojövö<br>Windrow |
| Ahtaunut tai ryykköitynyt jää (f=tahtumia/mpk)<br>Ridged or hummocked ice (f=number of ridges/naut.m)          | Hyvin harva ajojää<br>Very open ice (1-3/10)                        | Mitattu jään paksuus<br>Thickness measured in cm                | Tasainen jää<br>Level ice | Halkeama<br>Fracture |
| Päällekkäin ajautunut jää<br>Rafted ice (C=concentr.)  | Jään reuna tai jään raja<br>Ice edge or boundary                    | Avovesi <1/10<br>Open water                                     | Kiintojää<br>Fast ice     | Railo<br>Lead        |
| Tiheä ajojää<br>Close ice (7-8/10)   | Arvioitu jään reuna tai jään raja<br>Estimated ice edge or boundary |   |                           |                      |







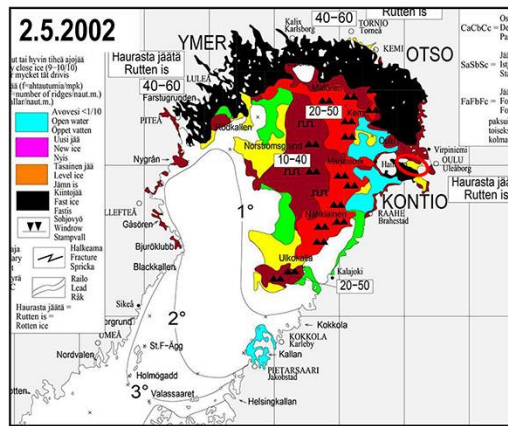
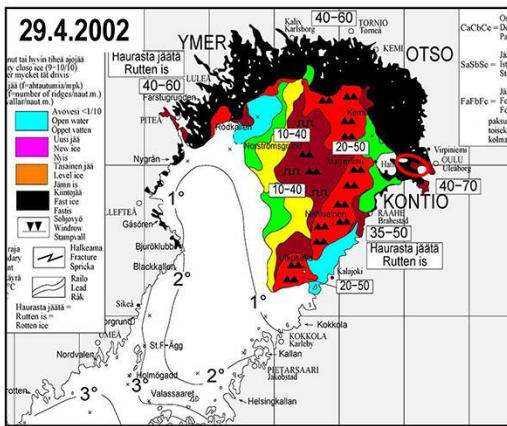
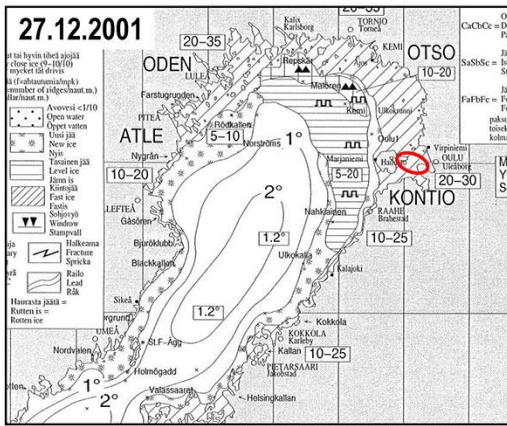
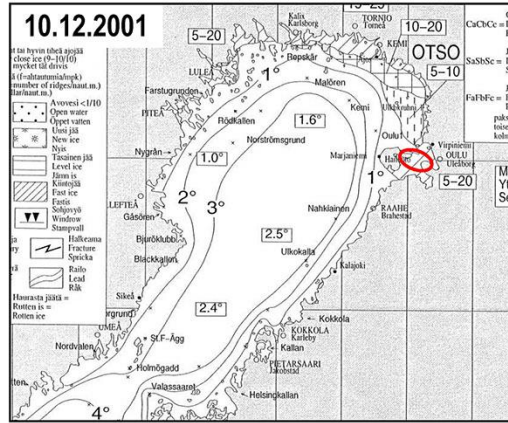
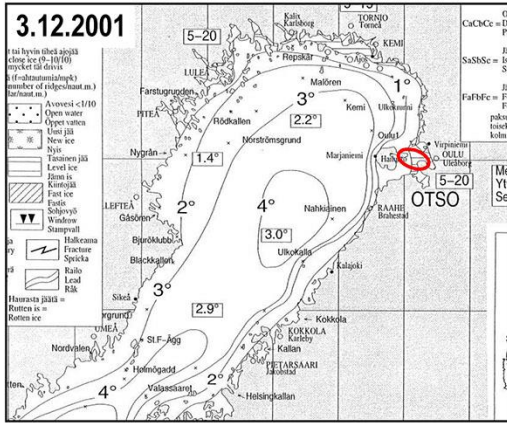
2004 Keskimääräinen talvi Hailuoto, sivu 1



	Yhteensuljettu, yhtenäistunut tai hyvin tiheä ajojää Consolidated, compact or very close ice (9-10/10) Sammanfusen, kompakt eller mycket tät drivis		Tähti ajojää Close ice (7-8/10) Tät drivis		Jään reunat tai jään raja Ice edge or ice boundary Iskant eller isgrän		Mitatun jään paksuus Thickness measured in cm Uppmättat isjocklek i cm		Tasainen jää Level ice Jämi is		Halkema Fracture Spricka
	Ahtaantunut tai ristiköötynyt jää (fohntomsmattig) Ridged or hummocked ice (fohntomsmattig) Vällar och uppomatt is (fohntomsmattig)		Harva ajojää Open ice (4-6/10) Spridd drivis		Arvioitu jään reunat tai jään raja Estimated edge or -boundary Uppskattad isgrän eller iskant		Veden lämpötilan lusa-asteikko Water temperature isotherm, °C Vattentemperatur isotherm, °C		Avovesi <1/10 Open water Öppet vatten		Fast ice Kinostaja
	Pölkkeläin ajotunnus jää Raftered ice (C-concentrat.) Hopskjutis		Hyvin harva ajojää Very open ice (1-3/10) Mycket spridd drivis				Uusi jää New ice Nysis		Soljovyy Windrow		Haurasta jäätä = Rotten is = Rotten ice

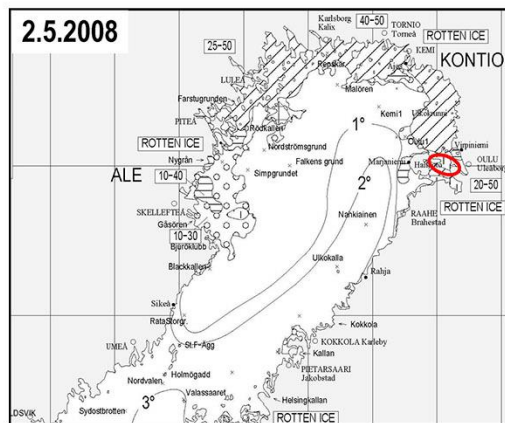
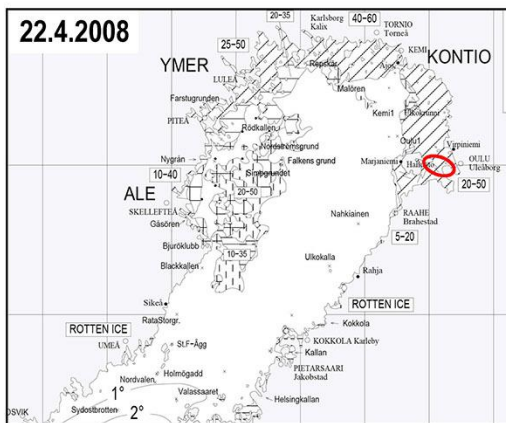
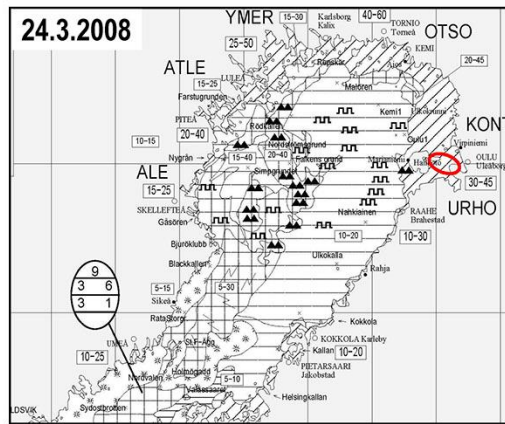
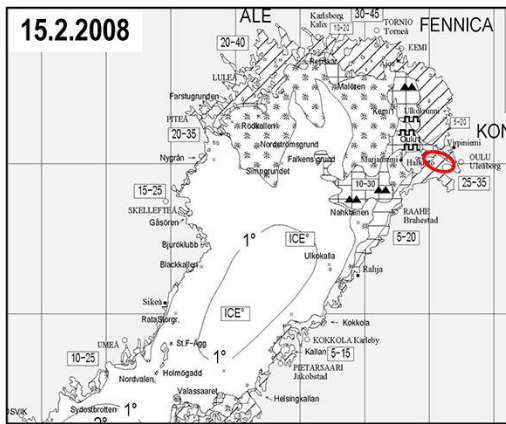
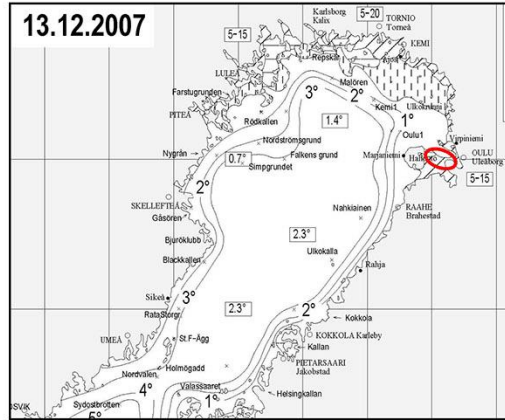
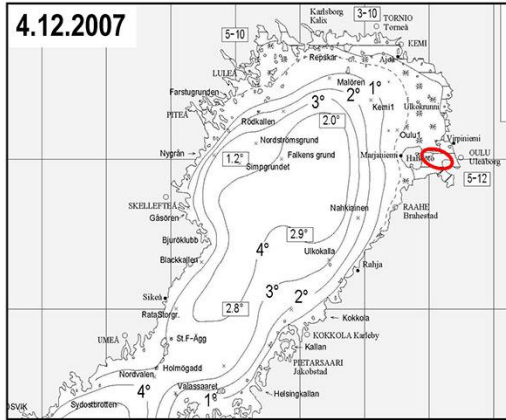


2002 Leuto talvi Hailuoto, sivu 1



<p>Yhteensijaintu, yhteensijainnut tai hyvin tiheä ajojää Consolidated, compact or very close ice (9-10/10) Summafusen, kompakt eller mycket tät drivis</p> <p>Ahtaantunut tai ryykköitynyt jää (=rauhautumia/mpk.) Ridged or hummocked ice (=number of ridges/naut.m.) Vallar och uppomnad is (=vallar/naut.m.)</p> <p>Päällekkäin sijainnut jää Rafled ice (=concentr.) Höpsjäten is</p>	<p>Tiheä ajojää Tät drivis</p> <p>Harva ajojää Spädd drivis</p> <p>Hyvin harva ajojää Very open ice (1-3/10) Mycket spädd drivis</p>	<p>Jään reuna tai jään raja Ice edge or ice boundary Iskan eller isgräns</p> <p>Arvioitu jään reuna tai jään raja Estimated ice edge or -boundary Uppskattad isgräns eller iskant</p> <p>Veden lämpötilan tasa-arvoikäryä Waternemperature isotherm, °C</p>	<p>Mittattu jään paksuus Thicknes measured in cm Uppmättat isstjocklek i cm</p> <p>Avovesi &lt;1/10 Open water</p> <p>Uusi jää New ice</p>	<p>Tasainen jää Jämn is</p> <p>Kinnojäät Fast ice</p> <p>Sohjovyö Windrow</p> <p>Stampväll</p> <p>Halkama Fracture</p> <p>Spricka</p> <p>Raio Lead</p> <p>Räk Haurasta jäästä Rotten is = Rotten ice</p>
--	--	---	--	--

2008 Erittäin leuto talvi Hailuoto, sivu 1



Yhteensijänyt, yhteensijäntunut tai hyvin tiheä ajojää Consolidated, compact or very close ice (9-10/10) Sammanfusen, kompakt eller mycket tät drivis	Tähdellä ajojää (7-8/10) Tät drivis	Jään reunat tai jään raja Ice edge or ice boundary	Mitattu jään paksuus Thickness measured in cm	Tasainen jää Level ice	Halkeama Fracture
Ahtautunut tai ryykköitynyt jää (pöytätonniamäpki) Ridged or hummocked ice (summer of ridges/haud.m.) Vallat och uppstomat is (=vallar/haud.m.)	Harva ajojää Spädd drivis	Arvioitu jään reunat tai jään raja Estimated ice edge or -boundary	Avovesi <1/10 Open water	Kintijää Fast ice	Raito Lead
Päällekkäin ajautunut jää Raffled ice (C-concentr.) Hopskjuten is	Hyvin harva ajojää Very open ice (1-3/10) Mycket spädd drivis	Veden lämpötilan tasa-arvokäyrä Water temperature isotherm, °C	Uusi jää New ice	Suljettu Window	Haurasta jäättä = Rotten is = Rotten ice
		2°	Nysä	Stampvälli	





Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745  
ISBN 978-952-405-132-3  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)