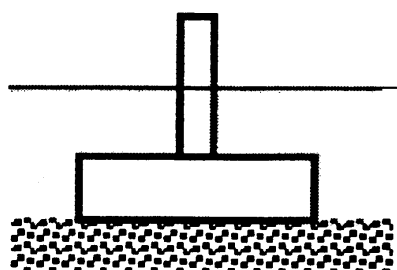
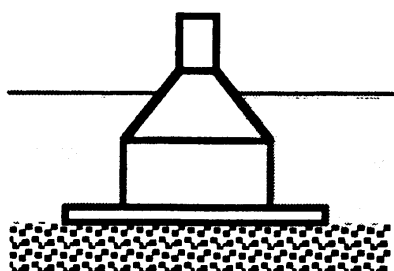


Islaster på fundament till vindkraftverk Litteraturstudie

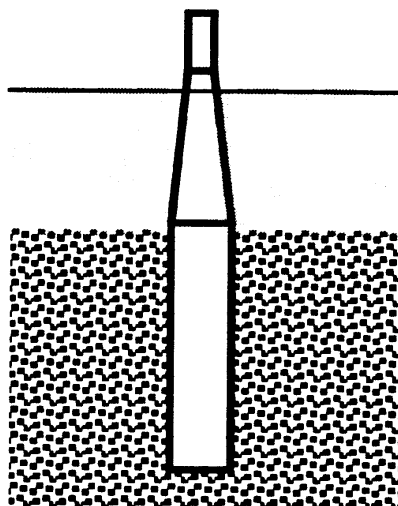
Sven-Erik Thor



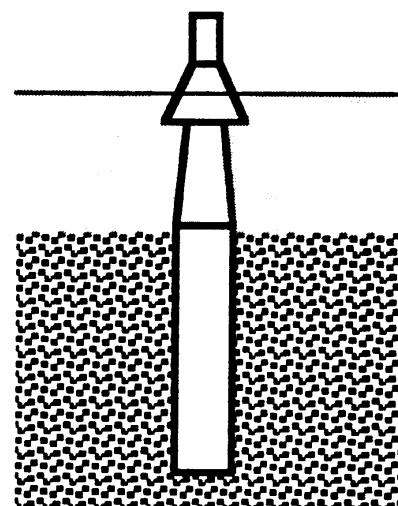
a) Caisson



b) Caisson and cone



c) Pile



d) Pile and cone

Underlagsrapport

Islaster på fundament till vindkraftverk
Litteraturstudie
Sven-Erik Thor

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Avdelningen för Flygteknik FFA 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0108--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 9. Övriga civila tillämpningar	
	Månad, år Maj 2001	Projektnummer E870307
	Verksamhetsgren 91 Övriga civila tillämpningar	
	Delområde 5 Uppdragsfinansierad verksamhet	
Författare/redaktör Sven-Erik Thor	Projektledare Sven-Erik Thor	
	Godkänd av 	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig 	
Rapportens titel Islaster på fundament till vindkraftverk: Litteraturstudie		
Sammanfattning (högst 200 ord) Inför en framtida utbyggnad av vindkraften till havs behövs bättre kunskap om de speciella förhållanden som är förhärskande. Speciellt ställs kunskap om is- och vågförhållanden för att vindkraftverk skall kunna dimensioneras på ett säkert och ekonomiskt sätt. I denna rapport redovisas resultatet av en litteraturgenomgång inom området <i>Islaster på fundament till vindkraftverk</i> Modeller för beräkning av statiska islaster på cylindrar och koner tycks vara relativt tillförlitliga. Det svåra är att hitta relevanta indata till modellerna. Medelvärden och extremer finns väl karterat i de områden som sjötrafiken trafikerar. Däremot saknas detaljerat underlag för sådana områden som är lämpliga för etablering av vindkraftverk. I en liknande litteraturgenomgång studeras inverkan av <i>våglaster på fundament till vindkraftverk</i>. Se rapporten FOI-R--0109--SE		
Nyckelord Vindenergi, islaster, fundament		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 34 s.	
Distribution enligt missiv STEM	Pris: Enligt prislista Sekretess Öppen	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Aeronautics, FFA 172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--0108--SE	Report type Base data report
	Research area code Civil applications	
	Month year May 2001	Project no. E870307
	Customers code Civil applications	
	Sub area code Contracted Research	
Author/s (editor/s) Sven-Erik Thor	Project manager Sven-Erik Thor	
	Approved by Sven-Erik Thor	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Ice loads on foundations for wind turbines. A literature survey		
Abstract (not more than 200 words) This report is an overview of literature covering the influence of ice loads on foundations for wind power plants.		
Keywords Wind Energy, Wave loads, foundations		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 34 p.	
Distribution: STEM	Price acc. to pricelist Security classification Open	

Innehållsförteckning

1.	SAMMANFATTNING	7
2.	INLEDNING	7
3.	LITTERATURGENOMGÅNG	7
3.1.	VINDKRAFTVERK TILL HAVS	7
3.2.	STANDARDER OCH CERTIFIERING TILL HAVS	8
3.3.	ISFÖRHÅLLANDEN I SVENSKA FARVATTEN	8
3.4.	ISMEKANIK	11
	<i>Grundläggande</i>	11
	<i>Isens hållfasthet</i>	12
3.5.	STATISKA ISLASTER	13
	<i>Cylindrar</i>	13
	<i>Koner</i>	13
3.6.	DYNAMISKA LASTER	14
4.	SLUTSATSER	15
5.	REFERENSER	17
6.	ÖVRIG LITTERATUR	19
7.	BILAGOR	21
7.1.	BILAGA A	21
7.2.	BILAGA B	31

1. Sammanfattning

Modeller för beräkning av statiska islaster på cylindrar och koner tycks vara relativt tillförlitliga. Det svåra är att hitta relevanta indata till modellerna. Medelvärden och extremer finns väl karterat i de områden som sjötrafiken trafikerar. Däremot saknas detaljerat underlag för sådana områden som är lämpliga för etablering av vindkraftverk.

Förslag på framtida insatser som krävs för att kunna konstruera billiga och säkra fundament till vindkraftverk:

- Kartera förekomst och typ av is i områden som är lämpliga för vindkraftsetablering, medel/max tjocklekar samt sannolik förekomst är viktigt underlag
- Genomför mätningar på Bockstigenaggregat nr 4 samt på mätmasten och jämför med modeller för isbelastning
- Kunskapsuppbyggnad

2. Inledning

Inför en framtida utbyggnad av vindkraften till havs behövs bättre kunskap om de speciella förhållanden som är förhärskande. Speciellt behövs kunskap om is- och vågförhållanden för att vindkraftverk skall kunna dimensioneras på ett säkert och ekonomiskt sätt. I denna rapport presenteras resultatet av en genomgång av litteratur som behandlar isförhållanden och de laster som dessa orsakar på vindkraftverk. Genomgången behandlar inte sådana fenomen som resulterar i isbeläggning på turbinblad.

I en liknande litteraturgenomgång studeras inverkan av *våglaster på fundament till vindkraftverk*. Se referens [1].

3. Litteraturgenomgång

Intresset för islaster på vindkraftverk till havs har hittills varit begränsat. Det avspeglas i det fåtal publikationer som litteratursökningen har resulterat i. Däremot är is och dess laster på olika typer av byggnadsverk utförligt behandlat inom t.ex. offshore-industrin, fyrväsendet och sjöfarten. Forskning är aktiv speciellt i Kanada, Finland, Ryssland samt USA.

Litteratursökningen har resulterat i ett antal intressanta publikationer. Den mesta informationen kommer dock från konferensartiklar. Exempel på konferenser som behandlar dessa områden är t.ex.:

POAC	International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions
ISOPE	International Offshore and Polar Engineering Conference
IAHR	International Association of Hydraulic Engineering and Research

3.1. Vindkraftverk till havs

I ett tidigt EU projekt (Joule I, i början på 1990-talet) redogör Matthies et. al. [2] för möjligheterna att bygga vindkraftverk till havs. Vid den tidpunkten fanns inga större praktiska erfarenheter av byggnation till havs. Däremot inventerar man erfarenheter från andra verksamhetsområden till havs som kan vara till nytta för vindkraftstillämpningar. En del av projektet behandlar mariniseringen av landbaserad vindkraft. Man konstaterar att "One thing is sure – the offshore wind energy resource of the EC is truly enormous". En annan slutsats är att utmattning och extrema laster på turbinen inte påverkas nämnvärt av havslokaliseringen, men att både vind och våglaster är viktiga vid

dimensioneringen av fundamentstrukturen. Det bör då noteras att rapporten inte behandlar laster på grund av is, förutom konstaterandet att man i Blekingen- och Vindebyprojekten har tagit hänsyn till sådana laster. "In the Swedish studies, the overturning moment due to ice loading is twice that due to the non-breaking wave". Projektet har bland annat resulterat i ett datorprogram speciellt avsett för dimensionering av vindkraftverk till havs [3] från konsultfirman Garrad & Hassan.

Litteratur som behandlar specifikt vindkraft och islaster är ovanliga, men i några finska rapporter ges intressant information. Referenserna [4], [5], och [6] har delvis samma författare och är ett resultat av en finsk "feasibility study" som startade 1996. De första och andra referenserna behandlar vindkraft i den finska delen av Bottenhavet. Artikel ett är en utomordentlig sammanställning av problemställningarna och är en bra introduktion till ämnet, och bifogas därför i Bilaga A. Typiska istjocklekar är mindre än 80 cm, med maximal tjocklek av 1.3 meter i den landfasta iszonen. Isvallar bedöms inte som något problem för vindkraftverk. Däremot kan uppbyggnaden av isblock mot torn och fundament vara dramatisk. Höjder upp till tio meter och mer bedöms som möjliga.

Dynamiska laster som uppträder vid samverkan mellan drivande is och fundament kan resultera i betydande laster. Speciellt om krossningslasternas frekvens sammanfaller med någon av vindkraftverkets frekvenser. I praktiken är de dynamiska lasterna bara en "bråkdel" av de statiska lasterna, t.ex. 50%, enligt ovanstående referenser.

Områden för vindkraft bör väljas på så sätt att man placerar vindkraftverken i områden med landfast is. På så sätt förhindras att drivande is träffar fundament.

I den andra referensen konstateras att de mest signifikanta lasterna orsakas av drivande is som bryts sönder mot fundament. För koniska fundamentstrukturer minskas de statiska lasterna till en tredjedel av motsvarande laster för ett cylinderformat fundament. Även dynamiska laster reduceras signifikant. Man rekommenderar att bygga MegaWatt vindkraftverk i områden där drivande is är tunnare än 40 cm, och att bygga iskoner för att minska islasterna till acceptabel nivå.

3.2. Standarder och certifiering till havs

Arbetet med att ta fram speciella regler och råd för dimensionering och certifiering av vindkraftverk till havs bedrivs av några aktörer. Germanischer Lloyd GL [7] presenterade 1999 regler för vindkraftverk tillhavs. Beskrivningarna av isens verkningar är "tunna" och ger inte konstruktören några hänvisningar annat än att istjockleken skall vara 30mm och ha densiteten 900kg/m².

I övrigt hänvisas ofta till motsvarande dokument för "offshore installations". Sådana exempel är GL [8], Department of Energy UK [9] och American Petroleum Institute [10]

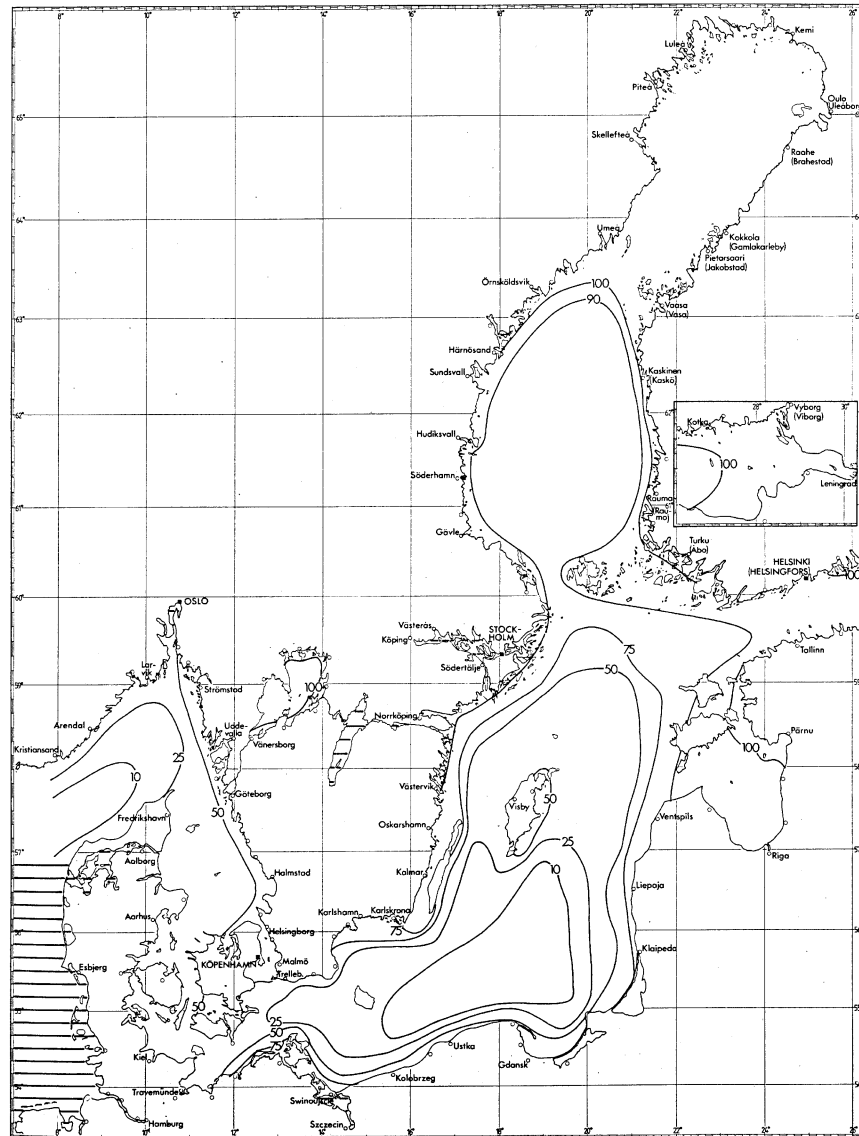
En telefonkontakt med Christer Eriksson på Det Norske Veritas visar att DNV inte har några speciella regler för vindkraftverk till havs, men att man noggrant följer utvecklingen inom området. Intresset verkar stort och han har fått flera förfrågningar om detta från olika aktörer.

3.3. Isförhållanden i svenska farvatten

En klimatologisk isatlas [11] över Kattegatt Skagerack och Vänern har utarbetats genom ett samarbete mellan Sverige och Finland. Rapporten är mycket omfattande och detaljerad. De data som ligger till grund för arbetet omfattar en period av 16 år. Materialet bedöms som tillförlitligt, men man konstaterar att det i databasen inte finns något år då de centrala delarna av Östersjön har is. Historiska data visar att Östersjön fryser helt cirka tre gånger per århundrade.

Isutbredningen varierar kraftigt från år till år. Vissa delar är dock istäckta vaje vinter. Exempel på det är Bottenviken, östra delen av finska viken samt vissa skärgårdsområden. Isolinjen som anger 50% sannolikhet för att is skall uppträda under ett år går tvärs över norra Östersjön. Den maximala isutbredningen nås i allmänhet i februari eller tidigt i mars.

Probability of ice occurrence, in percent
Sannolikhet för isförekomst, i procent
Jään esiintymistodennäköisyys, (%)

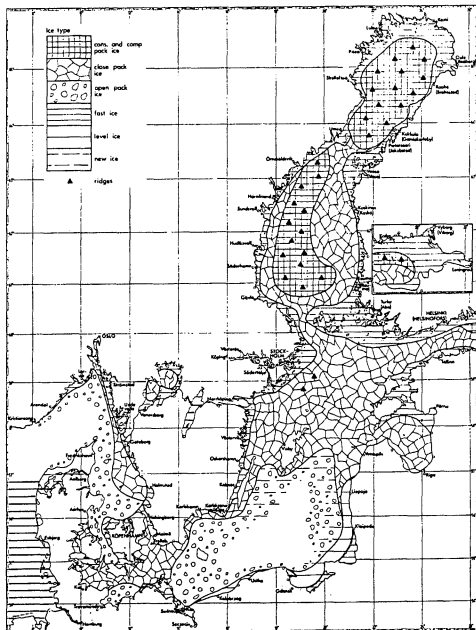


Figur 1. Sannolikhet för isförekomst, i procent

Isens tjocklek och dominerande istyp, i kombination med vindar och strömförhållanden, har inverkan på de laster som uppträder på fundament till vindkraftverk. Det är därför viktigt att känna dessa egenskaper. I figur 2 visas dominerande istyper och i figur 3 medelflaktjockleken på isen. Figurerna har valts så att maximala värden erhållits. I underlaget till figurerna påpekas att variationen av istjockleken är stor och att standarddeviationen är omkring 20 cm eller mindre.

Dominant ice type
Dominerande istyp
Tyypillinen jään laatu

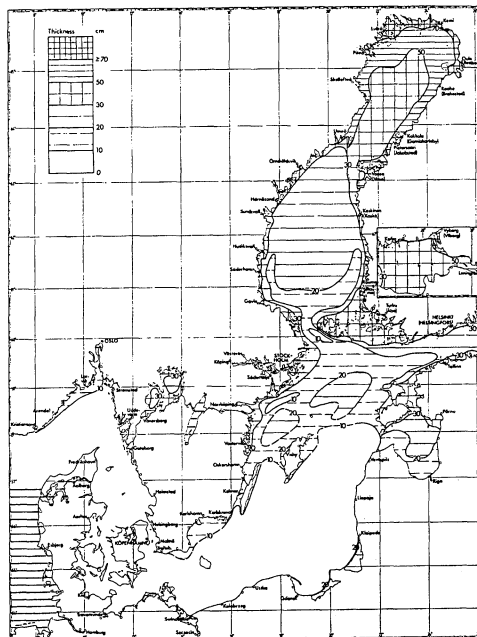
March 1



Figur 2. Dominerande istyper

Level ice thickness
Flaktjocklek
Jään paksuus

March 21



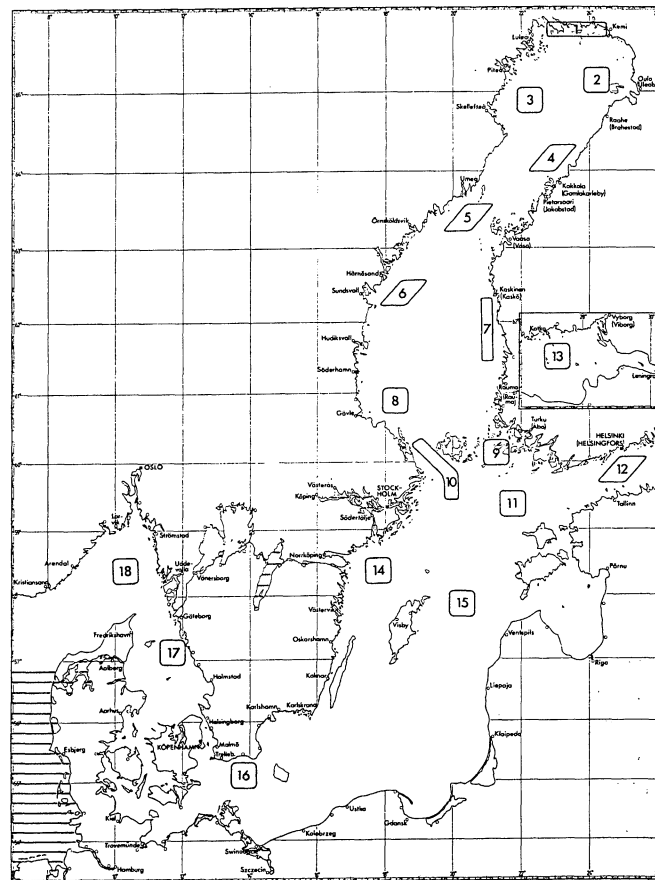
Figur3. Medelflaktjockleken

Kartmaterialet presenteras även i tabellformat ur detta material kan man notera nedanstående istjocklekar under 16-årsperioden. Tabellerna återfinns i Bilaga B.

Plats	Område	Medelvärde [cm]	Maximalt värde [cm]
Öster om Gävle	8	28	57-72, några > 72cm
Mellan Åland och Sverige	10	28	43-56
Nordväst om Gotland	14	27	43-56
Söder om Ystad	16	11	21-30
Väster om Falkenberg	17	11	21-30

Tabell 1. Istjocklekar i olika områden,
områdesbeskrivningen framgår av nedanstående figur4

Ice thickness distribution areas
 Områden för vilka istjockleksfördelningen beräknats
 Jään paksuuden jakautumia vastaavat alueet



Figur 4. Områden för vilka istjockleksfördelningen har beräknats

Ovanstående siffror bör förmodligen användas med viss försiktighet i vindkraftssammanhang. Siffrorna avser områden som sjöfarten huvudsakligen trafikerar. De områden som är lämpliga för vindkraft har förmodligen mindre vattendjup och ligger närmare kuster. Man skulle därför kunna förvänta sig högre värden på istjockleken vid vindkraftstillämpningar, men å andra sidan är risken för drivande is mindre i områden med landfast is.

3.4. Ismekanik

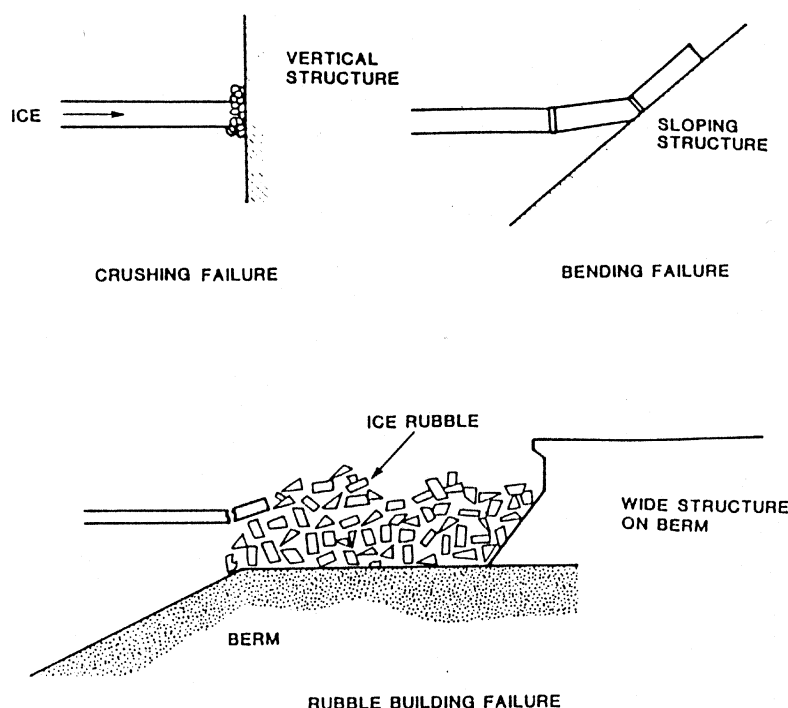
Grundläggande

I en grundläggande handbok/lärobok av Cammaert et. al [12] diskuteras många olika aspekter av isens interaktion med offshore strukturer. Allt från isens egenskaper till fallbeskrivningar behandlas. Boken ger en bra överblick av området men de modeller som beskriver laster på grund av is har hunnit utvecklas och förbättras sedan boken kom ut 1988. Boken är för närvarande slut på förlaget.

Croasdale [13] presenterar en översiktlig artikel om isens mekanik. Artikeln behandlar huvudsakligen förhållanden för oljeplattformar norr om Kanada och Alaska. I punktform konstateras att:

- När isen ligger förekommer inga vågor. Man behöver alltså inte ta hänsyn till kombinerade våg- och islast

- Fri drivande is får en hastighet som är 2% av vindhastigheten (Nansen's regel), samt att inverkan av strömhastighet tillkommer
- Isens mekaniska egenskaper är beroende av deformationshastighet, belastningsriktningen (anisotropi), tiden och saltinnehåll
- Is är ett mycket sprött material, slagsegheten är i storleksordningen 50 –100 kPam^{0.5}
- Is som träffar ett cirkulär föremål går sönder genom krossning medan is som rör sig mot sluttande strukturer går sönder genom böjning, figur 5



Figur 5. Brottyper vid olika typer av strukturer, ref [13]

Isens hållfasthet

Isens hållfasthet varierar med dess beskaffenhet och belastningshastigheten. Hållfasthetsvärden från 0.1 till 10 MPa nämns. Typiska värden från [Määttäen 4] är:

Tryckhållfasthet [Mpa]	Typ av is
3.0	Intakt is som driver på grund av vind eller ström vid den kyligaste tiden på året.
2.5	Intakt is som driver mycket långsamt t.ex. genom termisk expansion eller krympning vid den kyliga tiden på året
1.5	Intakt is som driver på våren vid temperaturer nära smältpunkten
1.0	Partiellt försvagad smältande is som driver vid temperaturer nära smältpunkten

E-modul på 30 Mpa nämns.

3.5. Statiska islaster

Cylindrar

Haapanen ref [4] redovisar formler för att beräkna laster på ett cylindrisk fundament. Formeln kommer ursprungligen från [14].

Som ett exempel används formeln för att beräkna islaster under följande förutsättningar:

b = Fundamentdiameter 2.5 meter
h = Istjocklek 0.3 meter
k1 formfaktor = 0.9 för cylindrar
k2 kontaktfaktor is – struktur = 1.5, maxvärdet
k3 formförhållande = $(1+5 \cdot h/b)^{0.5} = 1.26$
 σ = isens hållfasthet = 3.0 [Mpa] = $3.0 \cdot 10^6$ N/m²
Detta resulterar i en islast på fundamentet av 3.8 MN!

Koner

Genom att utrusta fundament med konformade strukturer vid vattenytan kan man minska islasterna. Metoden uppvisar många praktiska problem. Exempel på detta är att vattenytan kan variera (± 1 meter nämns i Bottenviken), det kan därför vara svårt att finna en lämplig placering på konen utan att den skall bli alltför stor. Landstigning på vindkraftverken kan även försvåras. Problem med infästning av koner på fundament har rapporterats från bland annat vindkraftverken vid Bockstigen.

De modeller som används för att beräkna islaster på koner är betydligt mer komplicerade än motsvarande modeller för raka cylindrar. De dominerande modellerna är:

- Croasdale 2D
- Croasdale 3D
- Finit element metod
- Nevel
- Ralston

Ralstons modell [15] för att beräkna laster är en av de äldsta, mest kända och mest refererade modellen. I en jämförelse [16] av olika modeller med mätningar i Kemi Finland konstateras att de olika modellerna ger stora variationer i predikterad islast. De flesta ligger dock över uppmätta laster för de rapporterade mätningarna. Det konstateras att de olika modellerna är känsliga för olika kongeometrier. Som exempel nämns att islasten ökar med 30% när konvinkeln ökar från 55 till 60 grader. Men så stora konvinklar är förmodligen inte praktiska på fundament till vindkraftverk.

Vid dimensionering av lutande strukturer måste man enligt Croasdale [12] ta hänsyn till följande faktorer:

- Om isen är stillastående under en längre period kan isen frysa fast på underlaget. Denna fastfrysning måste brytas upp innan konen ger avsedd verkan
- Isen transporteras uppför konen (om den är vänd med spetsen uppåt) och kan resultera i höga isvallar
- Vid breda sluttningar (ej aktuellt för vindkraftverk) kommer isen att ramla tillbaka på den is som pressas mot fundamentet. Detta kan resultera i att konstruktören tappar sin ursprungliga verkan

I ett senare arbete beskriver Croasdale [17] en förbättrad metod för att ta hänsyn till islaster på lutande strukturer. Utgångspunkten är de tidigare utvecklade 2D-formlerna.

Modifieringar har gjorts för att ta hänsyn till 3D-effekter, branta koner och isblock framför konen. Ett helt batteri med formler presenteras.

Määtänen rekommenderar att laster på koner beräknas enligt de metoder som beskrivs i Ralstons paper ovan [14].

I ett paper från Dannys [18] rapporteras intressanta mätningar på en fyr på betongfundament i Canada. Jämförelser görs med en äldre modell som inte refereras i nyare litteratur. Uppmätta laster är avsevärt högre än de som modellen ger. Modellen baseras enbart på "crushing conditions".

Nevel [19] jämför i ett paper Nevil's och Ralston's modeller med åtta olika försök med isbelastning på koner. Han konstaterar att båda teorierna överensstämmer rimligt med data, men att Nevil's modell beskriver "overturning moment and location of the ice force on the cone" bättre.

Sammanfattningsvis verkar det som de ovan beskrivna modellerna är användbara och ger resultat som "reasonable well" beskriver resultat från verkliga prov.

3.6. Dynamiska laster

Vindkraftverk dimensioneras normalt med hänsyn tagen till det totala systemets dynamik. Drivande is kommer att vara en del av en sådan analys i områden med stor sannolikhet för isbildning och drivande is. Erfarenheter från fyren Norströmsgrund i Bottenviken visar att dynamiska effekter kan vara stora [20]. "Det känns rejält när det blåser mycket och isen trycker mot fyren. Hela fyren skakar och kommer i egensvängning. Då är det svårt att sova här om nätterna, säger Lennart Fransson (Luleå Tekniska Högskola). Saker ramlar ner från hyllor och forskningsutrustningen måste surras fast rejält."

Mätningarna av iskrafter mot fyren har pågått i fyra år och ska sannolikt fortsätta ytterligare en vinter inom EU-projektet Measurements on Structures in Ice (STRICE).



Figur 6. Isvallar vid fyren Norströmsgrund

I övrigt är referenser som behandlar dynamiska effekter sparsamma. Exempel ges i referenserna [21], [22], [23]

För att isens dynamiska effekter skall kunna hanteras på ett riktigt sätt, så bör dessa analyseras som en del av de dynamiska och ickelinjära analyser som genomförs på det totala vindkraftverket vid dimensioneringsarbetet. Annars finns risken att viktiga kopplingar mellan olika konstruktionselement resulterar i att beräkningar av laster och deformationer blir mindre riktiga.

Inom detta området finns för närvarande behov av att öka kompetensen i det svenska vindfroskningsprogrammet.

4. Slutsatser

Modeller för beräkning av statiska islaster på cylindrar och koner tycks vara relativt tillförlitliga. Det svåra är att hitta relevanta indata till modellerna. Medelvärden och extremer finns väl karterat i de områden som sjötrafiken trafikerar. Däremot saknas detaljerat underlag för sådana områden som är lämpliga för etablering av vindkraftverk.

Förslag på framtida insatser som krävs för att kunna konstruera billiga och säkra fundament till vindkraftverk:

- Kartera förekomst och typ av is i områden som är lämpliga för vindkraftsetablering, medel/max tjocklekar samt sannolik förekomst är viktigt underlag
- Genomför mätningar på Bockstigenaggregat nr 4 samt på mätmasten och jämför med modeller för isbelastning
- Kunskapsuppbyggnad

5. Referenser

I nedanstående referenslista används följande förkortningar :

POAC International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions

EWEC European Wind Energy Conference

ISOPE International Offshore and Polar Engineering Conference

-
- 1 Carlen I., Litteraturgenomgång – Våglaster vid vindkraftverk. FOI-R--0109--SE.
 - 2 Matthies H.G., et al, Study of offshore wind energy in the EC., Germanischer Lloyd Joule I (JOUR 0072)
 - 3 Garrad & Hassan, Reklamblad för datorprogrammet "Bladed Offshore", 1999
 - 4 Haapanen E., Määttänen M., Koskinen P., Offshore wind turbine foundations in ice infested waters
 - 5 Holttinen H., Määttänen M., Holttinen E., Offshore wind power in the ice-infested waters of Gulf of Bothnia, Finland, EWEC'99, Nice
 - 6 Määttänen, M., Moving ice and offshore wind turbines. 15th POAC 1999 Helsingfors.
 - 7 Germanischer Lloyd, Regulations for the Certification of Offshore Wind Energy Conversion Systems, Hamburg 1999. Rules and Regulations VI - Non Marine Technology, Part 2 - Offshore Wind Energy.
 - 8 Rules for Classification and Construction – Offshore Technology, Part 2 Offshore Installation., Hamburg 1990
 - 9 Deparmet of Energy HMSO, UK, Offshore Installations: Guidance on design, construxccction and certification, 4th edition , London 1990.
 - 10 API Bulletin 2N 1981, API planning, designing and construction of fixed offshore structures in ice environmens, First edition, Draft API Dallas, Texas.

American Petroleum Institute RP 2A-LRFD, Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore PlatformsLoad and Resistance facor design first ed 1993

American Petroleum Institute RP 2A-LRFD-S1, Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore PlatformsLoad and Resistance facor design first ed 1997
 - 11 Klimatologisk isatlas för Östersjön, Kattegatt, Skagerrack och Väner (1963-1979), SMHI 1982
 - 12 Cammaert A. B., Muggeridge D. B., Ice interaction with offshore structures, van Nostrand Reinhold, 1988
 - 13 Croasdale, K.R., "Sea Ice Mechanics: A General Overview", MTS Journal, Vol. 18, No. 1.
 - 14 Mättänen M., Design Recommendations for ice effects on ainds-to-navigation. IALA. Technical Committee to study the effect of ice on lighthouses. International Association for Lighthouse Authorities

-
- och
RIL: Rakenteiden kuormitusmääräykset (Finnish regulations for structural loads)
- 15 Ralston T. Ice force design considerations for conical offshore structures, POAC 77 – 4th Int. Conference on port and ocean engineering under arctic conditions, 1977
 - 16 Määttänen, M., Hoikkaenen, A., N., Avis, J. Ice failure and ice loads on a conical structure – Kemi-I cone full scale ice force measurement data analysis, IAHR Ice Symposium Beijing, 1996
 - 17 Croasdale, K.R. and Cammaert, A.B., “An Improved Method for the Calculation of Ice Loads on Sloping Structures in First-Year Ice”, *Hydrotechnical Construction*, Vol. 28, No. 3, 1994.
 - 18 Danys, J.V. and Bercha, F.G., “Investigations of Ice Forces on a Conical Off-shore Structure”, *Ocean Engng.* Vol. 3, pp. 299-310. Pergamon Press 1976.
 - 19 Nevel, D.E., “Comparison Between Theory and Measurements for Ice Sheet Forces on Conical Structures”, *Hydrotechnical Construction*, Vol. 28, No. 3, 1994.
 - 20 Sjunnesson, H., *Iskallt uppdrag. Teknik&Vetenskap* 3/99.
 - 21 Langohr, P.H. and Ghali, A. Dynamic Effects of Ice Forces on the Confederation Bridge”, *Can. J. Civ. Eng.* 24: 915-921. NRC. 1997
 - 22 Fang Hua Can, Duan Meng Lan, Ice-induced displacement responses of fixed platforms in Bohia Gulf, SOCS-94/PACOMS-94, Beijing, 1994
 - 23 Kajaste-Rudnitski, J. “On Dynamics of Ice-Structure Interaction”, Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1995.

6. Övrig litteratur

som finns i författarens hyllor

Cylindrar

Frederking, R. "The Pressure Area Relation in the Definition of Ice Forces", Proceedings of the Eighth (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference Montréal, Canada, May 24-29, 1998.

Projicerad area minskar ju större kontaktytan är. D.v.s 3D effekter. Det finns ju redan i den formel som beskrivs under cylindrar.

Sepehr, K. and Selvadurai, A.P.S. "Discrete Element Modelling of the Local Interaction Between a Stationary Structure and a Moving Ice Pack", Proceedings of the Seventh (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25-30, 1997.

Diskret modelleringsteknik för interaktion mellan drivande packis och struktur

Bekker, A.T., Uvarova, T.E., and Chertyrbotsky, A.N., "Interactive Model of Ice-Structure Interaction" Proceedings of the Eighth (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference Montréal, Canada, May 24-29, 1998.

Diskret modelleringsteknik för interaktion mellan drivande packis och struktur

Koner

Kolymbas, D., "Ice Forces on Conical Off-Shore Structures" Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 60 (1987), pp. 217-231, North-Holland..

Behandlar matematiken kring FEM-formuleringar av is och koner.

Chao, J.C., "Comparison of Ridge Load Prediction Methods and Experimental Data for Conical Structures", 1992 OMAE – Volume IV, Arctic/Polar Technology ASME 1992.

Behandlar fleråriga isvallar och laster på koniska strukturer

Hållfasthet

Kaldjian, M.J. "Ice-Sheet Failure Against Inclined and Conical Surfaces", Computers & Structures Vol. 26, No. ½, pp. 145-152, 1987.

Behandlar FEM analys av is som bryts mot konformade strukturer

Evgin, E. and Frederking, R.M.W. "A Method to Calculate Pack Ice Driving Forces", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, May 1995, Vol. 117.

FEM-formulering av isens brottförlopp

Leppäranta M., Hakala R., Field measurements of the structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic Sea, Proc Int. Conf. On offshore mechanics and arctic engineering, 1989

Behandlar isvallar, verkar mest vara intressant för sjöfarten

Dynamiska laster

Saeki H., et al., Impact ice load on pile structures and deformation of ice floes, Proc 8th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Canada, 1998

Isens hållfasthet vid stötblastning

Likhomanov, V. and Stepanov, I. "Comparison of Results of Impact Tests on Laboratory and Natural Freshwater Ice with Hydrodynamic Model Predictions", Proceedings of the Eighth (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference Montréal, Canada, May 24-29, 1998.

Isens hållfasthet vid stötblastning

Övrigt

Innehållsförteckning, Proc 8th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Canada, 1998

7. Bilagor

7.1. Bilaga A

Moving ice and offshore wind turbines

Määttänen, M.,

OFFSHORE WIND TURBINE FOUNDATIONS IN ICE INFESTED WATERS

***Erkki Haapanen, MScTech **Mauri Määttänen, D.Tech,
***Pekka Koskinen, MScTech**

*** Engineering Office Erkki Haapanen Ky, A Limited Partnership Company
** Helsinki University of Technical - Faculty of Mechanical Engineering
***Technical Research Center of Finland - Manufacturing Technology - Maritime
Technology**

FINLAND

ABSTRACT

The northern coast of the Gulf of Bothnia has a great potential of wind resources and shallow waters. The majority of the wind turbines in Finland are located ashore along the coast line of the Gulf of Bothnia. The useful area is narrow making the offshore area very promising for wind energy. There are potential offshore sites for major wind parks in many locations along the 300 km coast line.

The real challenge is to develop a technology for wind turbine foundations to withstand high loads caused by up to 1.3 m thick ice during the winter time. The behaviour of ice has to be thoroughly understood. The maximum lateral ice load level can reach to an order of ten MN when high winds drive ice against the foundation structures. The larger the solid ice field the larger are the loads. Pressure ridges, which are causing a lot of trouble for marine operations, are not considered to be a major problem for wind turbines in shallow waters (max 7 m deep), because of a deep keel which will stop the ice well before the wind turbines. Ice may also cause uplift loads during water level changes. This force can reach a magnitude of one MN depending of the dimensions. The most dramatic case is caused by ice blocks piling up against the tower and foundations. This pile-up can reach a height of ten meters or even higher and cause damages to the tower structures. Thermal ice expansion can also induce lateral loads on the foundation structures.

The paper describes ice properties, ice action against structures, and presents different options for solving ice related problems in wind turbine foundations with some recommendations on how to avoid hazardous situations.

KEYWORDS

Offshore, Wind Park, Ice, Wind Energy, Foundation, Load

Introduction

The highest wind speeds are found in open sea areas. Figure 1 shows the wind speed change across the coast line. Wind turbines work best in open sea areas where the flow is less turbulent and the wind energy highest. Hundreds of turbines can easily be built offshore. The increase in wind speed will compensate for the higher cost of construction. The large size of modern wind turbines has brought us to a point, where the ice and rough sea can be challenged. We know from maritime winter navigation experience how to build offshore lighthouses and aids-to-navigation on an open sea even if the ice thickness is more than one metre and the sea is deeper than 10 metres. The wind society can now start to use ice infested sea areas for energy production. The technical Research Center of Finland has started a development program in which a prototype wind turbine foundation will be built in the waters of the Gulf of Bothnia.

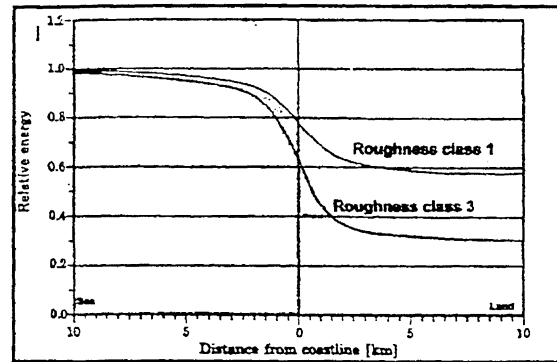


Figure 1. Wind speed across a coast line

This paper describes what can be expected from moving thick ice, presents ice load scenaria, and advises how to select a location for an offshore wind park. A practical problem in design is the uncertainty in estimating the ice loads and ice behaviour. Before a decision about the wind park site, the local environment should always be checked and discussions held with local seamen, fishermen and people who have lived years dealing with the ice and know it by heart. In the Gulf of Bothnia there are lots of excellent places for wind parks where the ice loads can be limited to a reasonable level and the production of clean energy is feasible.

The ice load cases and their order of importance

Offshore structures will be influenced and stressed in many different ways by the ice around them. In the Gulf of Bothnia at the open sea, outside the fast ice zone, the level ice thickness is typically below 80 cm. However, the ice fields are heavily ridged. The pressure ridges are typically 4 to 6 m thick. However, an above water sail of a ridge can be more than 2 m high and an underwater keel more than 10 m deep. The ridged ice fields are often moving due to winds and currents causing high loads on offshore structures. Thus the areas, where heavy ridging occur, are not economically possible locations for wind turbines.

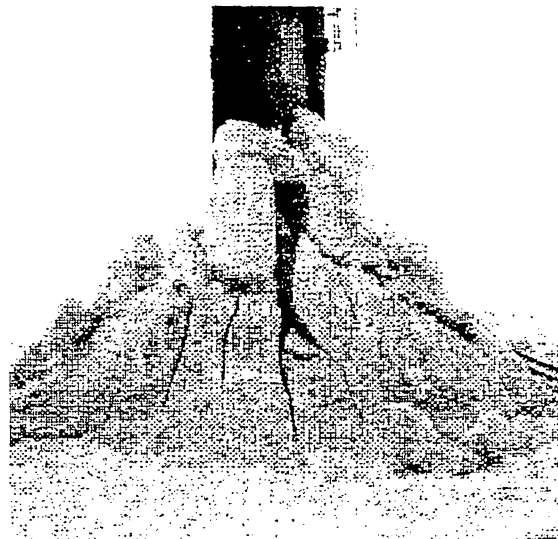


Figure 2. Slow ice movement and failure against the Kemi-I lighthouse with a test cone

At the coastal region ice is moving only in autumn before the land fast zone is formed. Thus, the thickness of the moving ice is significantly lower than at the open sea area. When a strong wind drives a large ice floe, it may move at a speed up to 1.3 % of the wind speed. When such a floe meets a wind turbine foundation, it will either be stopped or broken by the structure. In the coastal area the level ice thickness may grow more than one metre thick. Temperature changes in the fast ice field will either expand or shrink the ice cover. The foundations at the coastal region have to be designed to withstand the loads due to relatively thin moving ice and thermal expansion of the thick fast ice.

In the Gulf of Bothnia the water level will rise due to storm surges from the south. The water level rise in

Kokkola can be about 1 metre and in Kemi up to 2 metres. After the storm surge, or during northerly winds the water level sinks. In winter the ice cover will reduce these maximum water level changes. When the rising water level lifts the ice, it causes uplift loads on the foundation.

Moving ice.

Shear forces created by the wind will push the ice. The driving force F [kN] is depending on the wind kinetic energy and on the surface roughness of the floe. /7/

$$(1a) \quad F = A * \mu * q_k$$

in which

$$(1b) \quad q_k = v_k^2 / 1600$$

A = the area of the ice float, m^2

μ = friction factor.

= 0.0010 for smooth ice

= 0.0015 for snowy ice;

= 0.0020 ... 0.005 for rough and pack ice

q_k = wind kinetic pressure, KPa

v_k = wind speed, m/s

We can see from this formula that if the area of a floe is large enough, the force will be extremely high. In designing the maximum area in this formula should be chosen. In the Gulf of Bothnia the floe may easily be $30 \times 30 \text{ km}^2$ and a 20 m/s wind will create a shear load of 0.5 ... 1.0 Pa on the surface and up to 900 MN to the whole floe. In a storm the wind speed may reach 35 m/s for few hours. It is evident that such a driving force is too large for any wind turbine foundation to resist. Practically there are two options, either the ice or the structure has to break.

Near the coastline the ice thickness in a landfast ice zone may reach 1.3 metres while further offshore in the actively moving ice zone an 0.8 m ice thickness is frequent. The structures to break such a thickness have to be extremely strong and heavy. This is an obvious threat to the economy of a wind turbine structure. The site for wind turbines should be chosen in the landfast ice zone so that there are natural or man made objects to prevent too large moving floes to hit the structures. From a long experience we know that in many locations there is a few kilometre-wide zone along the coast, where only thin ice, less than 0.30 m thick, can move at the beginning of the winter before getting thicker and stabilizing, (Figure 3). In these areas the thicker ice can also move during spring, but then its strength has already deteriorated. The landfast ice zone is a natural choice for wind generator foundations as maximum ice forces will

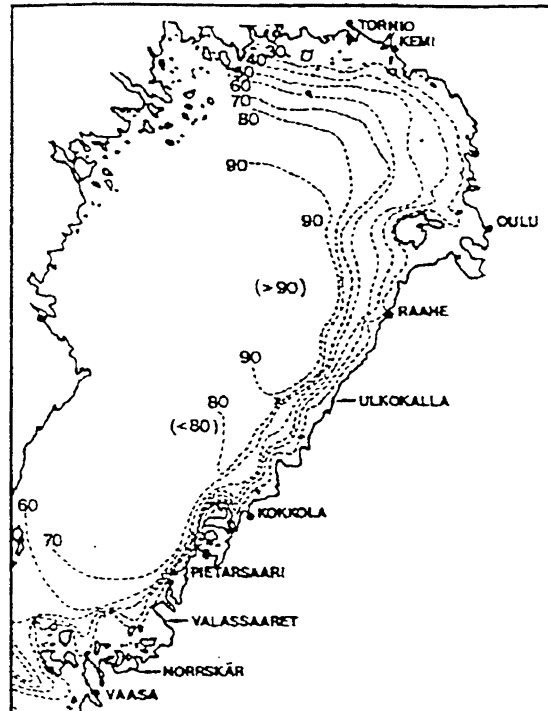


Figure 3. Moving ice thickness on the Gulf of Bothnia. Note the 0,3 m zone nearest to the coast line /10/

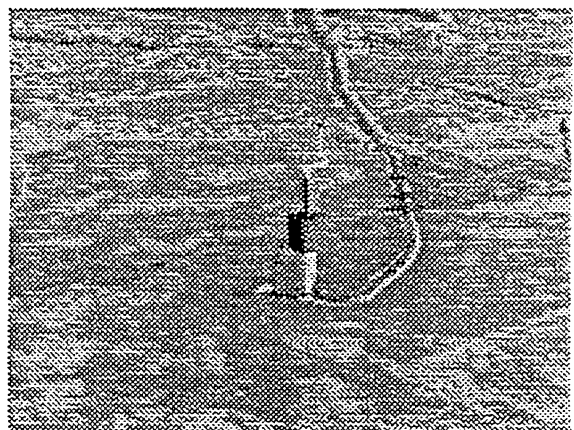


Figure 4. Wind driven ice movement at the active ice zone, Kemi-2 Lighthouse

there be limited due to the limitation of the moving ice thickness.

Forces and means to break moving ice

Ice properties will vary with time due to environmental conditions. The salt content of the water, time history of the temperature, snow coverage and consistency of ice will affect ice strength and ductility. We have to look at different load cases and then be sure that the structures are built for those requirements.

Solid ice in the autumn is the strongest and most ductile but not yet very thick. The strength in compression at a high loading rate would reach up to 10 MPa, or even higher with small test pieces. Ice strength decreases with decreasing loading rate, and with increasing size. Thin ice cover may buckle and fail by bending before the normal stress reaches the compressive strength limit along all the contact area. The wind friction on smooth level ice is very low and causes low pushing force. When snow covers the ice, the friction increases with the height of the snow dunes.

At the coldest time in winter, the ice has normally experienced a few temperature fluctuations which bring with thermal cracking and make the ice not homogenous any more. There may be some ridges, cracks, long leads, and other discontinuities in the ice field. Weathered cold, moving ice breaks easier than virgin autumn ice. Compressive strength is still high, but during interaction with a structure the average pressure against the whole contact area falls below 3 MPa. Later in spring when the temperature is close to the melting point the compressive strength goes down to 1.5 MPa and later to 1.0 MPa, when the ice has weakened through melting. And if the ice is moving very slowly as in the case of a thermal expansion, the compressive strength falls below 0.5 MPa and the behaviour of the ice is ductile. All these stress values are subject to arguments and may vary depending on the winter.

When ice is pushing a structure, it is compressed and possibly bent due to the eccentric or inclined contact area. Highly stressed ice will break and due to the brittle nature of the ice, the cracking will continue. Cracked pieces will be forced away, to bypass the foundation, above or below the ice cover depending on the surrounding conditions and the slope of the contact area. The ultimate load depends on the ice properties, dimensions and the geometrical shape of the obstacle.

The crushing load will be dynamic and fluctuate either

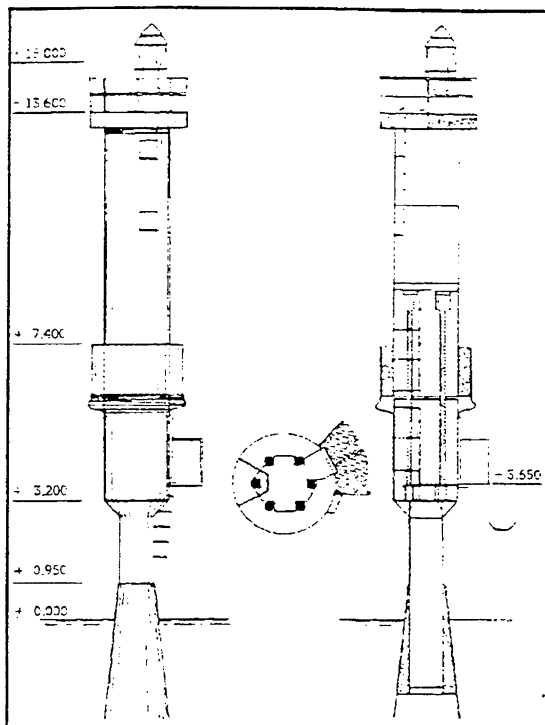


Figure 5. Principle of isolation of dynamic loads of a lighthouse. System allows lateral movement of the upper part of the tower.

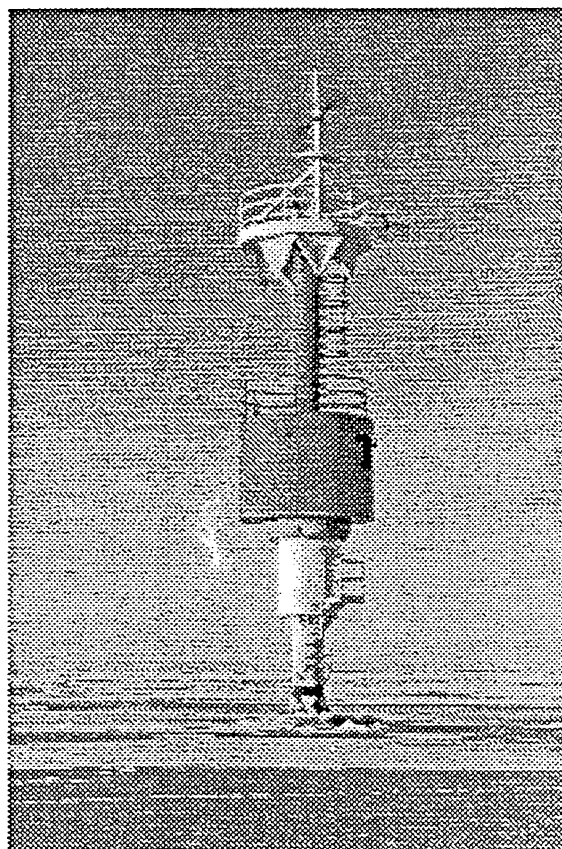


Figure 6. Vibration isolated Kemi-2 Lighthouse. Wind generator on the top has been running smoothly since construction in 1981

randomly between near zero and a certain maximum, or there is a dominant frequency depending on the ice thickness, speed, and structural response. Load amplitude also has random fluctuations. The thicker the ice, the higher the forces. Eigenfrequencies of the structure may control the ice failure frequency resulting in resonant vibrations. This situation is very dangerous for a wind turbine with a nacelle weight at the top of a narrow long tower. The foundations have to be designed in such a way that there is no chance for a resonant loading, or that the tower itself has vibration isolation to prevent oscillations and high dynamic loads. In Finnish offshore steel light houses the superstructure has been installed on top of a vibration isolation section. This concept has been proven in the field for more than twenty years in practice (Figures 5 and 6).

The initial crushing strength of ice is high if the structural shape does not stimulate bending or initiate crack propagation. To avoid extreme loads we could enhance the breaking of the ice before it reaches the wind turbine, or prevent the ice from moving by locking it in place. This is the normal situation in the landfast ice zone near the coast line, where there are natural blocks like rocks and islands to prevent ice from moving. Islands and skerries will also limit the maximum size of a floe, and prevent all but only thin ice movements. Figure 3 shows a landfast ice zone, approx. 3 - 5 km wide, in the coastal area of the Gulf of Bothnia. Here thick ice is locked by natural stoppers. By knowing the local geography and long term ice behaviour, we can approximate the maximum size and pushing force of moving floes and use this information when designing foundations.

Loads to a vertical, cylindrical foundation, when the ice starts to move or is moving.

In literature the formula for the maximum static force due to ice crushing against a vertical structure is [5] [7]:

(2)

$$P_1 = k_1 * k_2 * k_3 * b * h * \sigma_{ip}$$

where k_1 = shape factor for the structure
= 0.9 for round shape
= 1.0 for rectangular shape
 k_2 = ice to structure contact factor
= 1.0 when an adfrozen floe starts moving
= 1.5 when a thick ice collar has adfrozen to the structure
= 0.5 when ice is cracking continuously
 k_3 = shape ratio factor

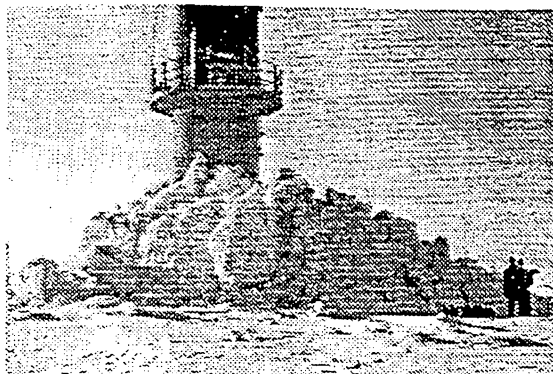
(3)

$$k_3 = (1 + 5 * h/b)^{0.5}$$

b = width of the structure (at a level $\frac{1}{3}h$ down from the ice upper surface)
 h = ice thickness
 σ_{ip} = compressive strength of ice
= 3.0 MPa for intact ice moving by the wind or current at the coldest time of winter
= 2.5 MPa for intact ice moving very slowly e.g. by thermal expansion or shrinking at the coldest time of winter
= 1.5 MPa for intact ice moving in the spring and the temperature is close to melting point
= 1.0 MPa for partially weakened melting ice moving at a temperature close to melting point

This formula suggests that the worst situation is at the very moment, when a thick ice collar, adfrozen to the structure, starts to crush. Here the ice compressive strength may be $\sigma_{ip} = 3.0$ MPa and the contact factor $k_2 = 1.5$. However, as the ice movement starts, the loading rate is so low that the loading rate dependent ice strength is also low resulting in loads less than in the case of faster moving ice with a lower contact factor but higher strength. Hence it is the combination of all factors that has to be considered. Measurements have proven that the

initial ice failure with good contact induces the highest loads, and thereafter, the load decreases suddenly close to zero and rises again to a new maximum, which is a lot less than the initial one because of the reduced contact factor k_2 .



Loads to a conical foundation

As moving ice hits a conical foundation, both horizontal and vertical loads will develop. An ice sheet breaks easier by bending than by crushing. This makes bending failure dominant, even though crushing and shearing modes are present simultaneously to some extent. In addition the

mode of ice failure depends on the shape and size of the structure. It also depends on ice properties, ice velocity and the friction between the structure and ice. In a loading cycle local crushing and shearing will occur initially, smoothening a large enough contact area, making higher ice loads possible. Increasing vertical forces first cause radial cracks and later a circumferential crack, which yields to the final bending failure. Thereafter, a new cycle can start. The ice load is at its maximum just before the formation of the circumferential crack. Clearing mechanisms involve pushing broken ice pieces upwards and aside of the structure. Figures 2 and 7.

Figure 7. Ice failure and pile-up against Kemi-2 cone at active ice zone.

The cone ice force calculations are based on loads needed to break the ice in the bending mode, to raise broken pieces up, and to bypass the structure. An upper bound plastic limit analysis solution can be calculated by Ralston's model. Later more refined FEM-analysis and full-scale measurements have indicated that Ralston's model in general overpredicts maximum loads. The procedure for cone ice load calculations is too demanding to be presented here, see References /5/ and /6/.

Dynamic load

Ice failure against a structure is mostly dynamic causing dynamic load fluctuations. In dynamic ice structure interaction energy from the moving ice is being transferred and stored as elastic and kinetic energy in the structure. A dynamic crushing load P_D may have a random frequency between 0.5 Hz and 10 Hz. A resonant state may develop while an eigenmode of the structure controls the ice crushing frequency. The theoretical explanations for dynamic ice-structure interaction are based on forced or self-excited vibration models. Resulting ice force history can be solved with numerical integration of dynamic equations of motion.

In practise, however, the dynamic ice load is simply assumed to be a fraction of the static level ice load Eq.2, e.g. 50 %. If this load amplitude is applied at the frequencies of lowest eigenmodes of the structure, a conservative design against dynamic ice action is achieved. Another case is the hit of an ice edge which causes dynamic amplification of the superstructure displacements.

When ice is cracking by bending, the frequency varies from 0 to 1 Hz. The amplitude of the load varies between zero and P_D . The Conical shape of the foundations has a great importance in lowering the dynamic stresses.

Pressure ridges and ice pile-up

Pressure ridges are formed, when ice is compressed, buckled and crushed together. The pressure will lift up the crushed area. Some of the crushed ice blocks go under the water forming a keel, which typically has the depth 10 and width 30 times the height of the parent ice sheet. Pressure ridge formation takes place in the active ice zone beyond the landfast ice zone. It is not recommended to install wind generators in such areas.

Ice pile-up frequently occurs in shallow waters, or when moving ice hits the shore or the wind turbine foundations. This can occur also in the landfast ice zone before the ice thickness has grown over 0.4 m. Local loads against the structure are not too high but the threat is in the height of the pile-up, up to 14 m high formations have been recorded. The access door to the wind turbine may be blocked. Removable ladders may be required to enter the tower. The ice blocks may damage all protruding obstacles like a landing stage from the tower and foundation. The lower end of the tower must be strong enough to withstand these impacts. The impact is caused by single ice blocks sliding down and hitting against the foundation. The pressure load is low and the situation looks much worse than it really is. In the wind park area the the formation of pile-ups should be initiated on top of natural or artificial hindrances, well before the wind generators.

Rising water level makes the ice force to lift the foundations

High winds induce water level changes also during winter time even though the sea is ice covered. As ice is normally adfrozen to the foundation or tower, it results in the vertical uplift loads on structures. The surface properties of the contact area determine the maximum force. Wind turbine foundations are usually heavy enough to resist this force. The vertical load can be estimated by a formula

(7)

$$V = \tau * A$$

where A = adhesion or contact area, m²

τ = adhesion strength (e.g. at - 10°C τ = 0.1 MPa for plastics and up to 1 MPa for concrete)

How to select a proper site for offshore wind park

The wind park location should be in the landfast ice zone in a shallow place, surrounded by some islands, reef or skerries to prevent large floes from pushing the wind turbine foundations. This will limit the maximum moving ice thickness below 0.4 metres which correspondingly limits ice loads against the foundations. If some stones or rocks are seen above the water level, they are excellent stoppers and ice breakers. Shallow water depth in front of a wind park induces ice pile up preventing further ice movement closer to the coastline. However, there should be a waterway to the site for building the foundation and transporting the material.

Summary

An offshore wind park in ice infested waters is a challenge. Moving ice exerts severe loads against the foundations and ice pile-up can reach to the propeller blades or prevent access to the tower.

By choosing the wind park site inside the landfast ice zone significantly reduces the thickness of moving ice, resulting ice forces, and other adverse ice actions. By proper foundation design the ice failure mode can be controlled, which on its behalf further reduces ice loads.

Thorough knowledge of the ice dynamics history in the proposed site is essential in finding optimum solutions, which limit ice loads to a reasonable level and make offshore wind parks not only technically but also economically feasible. Large coastal areas even in ice infested waters can thus be utilized to produce wind energy efficiently.

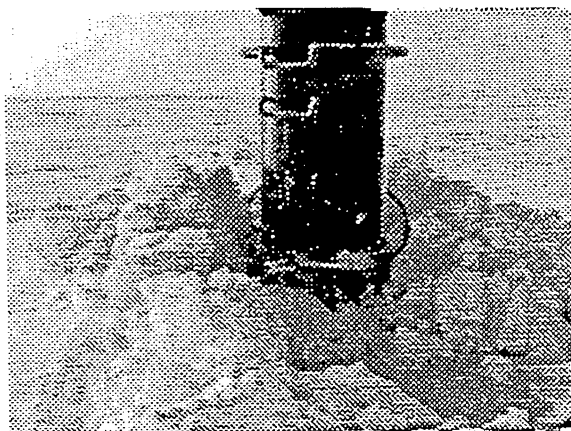


Figure 8. Slow ice movement and failure against a lighthouse at landfast zone in Kokkola

References:

1. Cammaert & Muggeridge: Ice Interaction with Offshore Structures, van Nostrand Rheinhold 1988, New York
2. IAHR working group on "Ice Forces on Structures" State of Art Reports, 1980, 1984, 1986, 1988 and 1992.
3. Michel B: Mechanics of Ice, Les Presses de L'Universite Laval, Quebec 1978.
4. Määttä M.: Ice Forces and constructions. Bi-lateral symposium on Ice Engineering The Chinese Hydraulic Engineering Society, The Finnish National Committee on Large Dam. Proceedings report 1989. Beijing
5. Määttä M.: Design Recommendations for Ice Effects on Aids-to-Navigation. IALA Technical Committee to study the Effect of Ice on Lighthouses. International Association for Lighthouse Authorities. Paris 1984
6. Ralston T. (1977):Ice Force Design Considerations for Conical Offshore Structures. POAC 1977, Memorial University of Newfoundland, St.John's, Newfoundland, Canada, Vol II, pp. 741-752.
7. RIL: Rakenteiden kuormitusmääräykset. (Finish Regulations for Structural Loads)
8. Sanderson T: Ice Mechanics, Risk to Offshore Structures, Graham & Trotman, Lontoo 1988.
9. YIT Ltd. The Vibration Isolated Lighthouse, Brochure
10. Palosuo E., et Al.: Formation, thickness and stability of fast ice along the Finnish coast. Institute of Marine research. Helsinki 1982.

7.2. Bilaga B

Tabellunderlag från ref [11]

Area 7

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	4	6	8	13	29	43	56	57	72	78	83	78	76	73	59	42	20	9	3	0
Thickness																						
1– 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3– 6 cm	0	0	0	0	0	0	0	36	59	43	11	9	24	14	8	12	0	33	0	0	0	0
7–12 cm	0	0	0	0	0	0	0	27	25	22	14	14	13	22	13	32	19	33	0	0	0	0
13–20 cm	0	0	0	0	0	0	0	27	0	22	52	41	21	15	26	20	5	0	100	0	0	0
21–30 cm	0	0	0	0	0	0	0	9	13	0	9	24	16	20	30	15	76	20	0	0	0	0
31–42 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	14	8	19	16	17	10	0	7	0	0	0	0
43–56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	14	5	12	0	0	0	0	0	0
57–72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	0	0	11	8	12	18	19	20	22	22	20	22	16	16	0	0	0
Number of ice years	0	0	0	0	0	0	0	4	8	10	10	12	12	11	12	8	6	3	1	0	0	0
Number of data	0	0	0	0	0	0	0	11	32	58	81	90	75	81	84	41	21	15	1	0	0	0

Area 8

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	0	0	0	5	8	27	33	44	59	68	69	68	61	53	49	34	27	16	14	5
Thickness																						
1– 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
3– 6 cm	0	0	0	0	0	0	50	16	47	25	26	14	15	5	6	2	2	6	0	0	0	0
7–12 cm	0	0	0	0	0	0	50	53	9	18	13	2	18	36	35	7	17	46	40	36	56	60
13–20 cm	0	0	0	0	0	0	0	32	0	20	29	51	24	23	32	39	23	17	12	50	44	40
21–30 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	44	7	5	13	25	14	8	17	11	11	8	14	0	0
31–42 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	27	17	16	4	4	10	26	3	16	0	0	0
43–56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	16	11	22	21	17	16	0	0
57–72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8	0	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	0	7	10	14	18	18	18	19	21	20	27	28	19	28	15	12	12
Number of ice years	0	0	0	0	0	0	2	5	4	8	11	11	12	11	11	9	6	5	4	2	2	1
Number of data	0	0	0	0	0	0	2	19	32	55	78	83	55	56	71	59	47	35	25	14	9	5

Area 9

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	0	0	2	9	18	33	56	69	75	78	90	88	86	77	77	51	27	7	0	0
Thickness																						
1– 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3– 6 cm	0	0	0	0	0	0	75	17	34	8	2	2	2	0	0	0	0	2	11	0	0	0
7–12 cm	0	0	0	0	0	0	25	17	17	5	2	1	4	0	0	1	8	12	21	100	0	0
13–20 cm	0	0	0	0	0	0	0	35	17	26	14	8	13	8	8	4	8	2	39	0	0	0
21–30 cm	0	0	0	0	0	0	0	30	24	34	46	47	29	30	32	31	29	44	4	0	0	0
31–42 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	7	26	25	28	43	44	42	40	39	14	18	0	0	0
43–56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11	12	8	18	17	24	16	26	7	0	0	0
57–72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	0	5	15	14	23	28	31	30	33	33	35	31	30	19	9	0	0
Number of ice years	0	0	0	0	0	0	3	6	8	11	12	12	14	13	13	11	11	8	4	1	0	0
Number of data	0	0	0	0	0	0	8	23	58	85	106	118	121	129	132	114	79	43	28	4	0	0

Area 10

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	0	0	0	4	10	21	25	34	42	60	62	57	56	46	35	15	12	6	5	0
Thickness																						
1– 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3– 6 cm	0	0	0	0	0	0	0	33	55	19	31	29	24	19	21	16	12	0	0	0	0	0
7–12 cm	0	0	0	0	0	0	0	67	15	31	21	24	17	39	50	44	59	60	67	100	0	0
13–20 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	15	8	14	16	27	8	11	12	0	27	0	0	0	0
21–30 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	15	19	21	17	17	14	9	12	18	7	0	0	0	0
31–42 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	12	8	10	17	5	12	12	7	0	0	0	0
43–56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	3	4	5	0	0	17	0	0	0
57–72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	0	0	7	10	18	15	16	17	16	13	16	14	14	28	9	0	0
Number of ice years	0	0	0	0	0	0	0	2	5	5	7	9	9	7	9	6	6	4	3	2	0	0
Number of data	0	0	0	0	0	0	0	3	20	26	42	63	41	36	56	43	17	15	6	6	0	0

Area 13

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	0	0	6	10	29	59	73	79	91	97	97	93	93	92	89	88	67	21	3	0
Thickness																						
1- 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3- 6 cm	0	0	0	0	0	100	33	18	4	3	1	5	2	1	0	0	1	4	5	0	0	0
7-12 cm	0	0	0	0	0	0	48	19	2	6	4	1	3	2	1	3	2	30	38	71	100	0
13-20 cm	0	0	0	0	0	0	5	37	31	18	10	6	11	7	5	4	10	8	31	14	0	0
21-30 cm	0	0	0	0	0	0	14	19	39	32	22	19	18	10	18	10	20	17	18	7	0	0
31-42 cm	0	0	0	0	0	0	0	6	22	29	40	34	26	30	24	29	31	26	3	0	0	0
43-56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	2	12	19	30	35	46	48	45	32	9	3	0	0	0
57-72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	5	4	5	9	4	5	3	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	4	10	16	24	28	32	37	36	40	41	42	36	26	17	16	9	0
Number of ice years	0	0	0	0	0	1	5	9	10	12	15	16	16	16	15	15	13	12	8	3	1	0
Number of data	0	0	0	0	0	2	21	62	100	117	134	151	129	144	147	119	108	76	39	14	2	0

Area 14

Day	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1	11	21	1
Month	11	11	11	12	12	12	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
Ice frequency	0	0	0	0	0	0	0	5	9	14	21	23	31	25	16	14	12	15	3	0	0	0
Thickness																						
1- 2 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3- 6 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	50	29	23	0	41	19	0	0	0	0	0	0	0	0
7-12 cm	0	0	0	0	0	0	0	100	50	57	43	8	18	42	31	0	0	57	100	0	0	0
13-20 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	38	0	0	31	25	60	43	0	0	0
21-30 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	50	32	32	38	50	40	0	0	0	0	0
31-42 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	17	0	0	0	0	0	0
43-56 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	4	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
57-72 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
> 73 cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean thickness	0	0	0	0	0	0	0	9	7	10	12	21	11	15	17	27	20	12	9	0	0	0
Number of ice years	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	3	3	6	6	5	1	1	2	1	0	0	0
Number of data	0	0	0	0	0	0	0	1	2	7	30	26	22	31	13	12	5	14	3	0	0	0