

Rapport nr 2002:1

ISLASTER PÅ VINDKRAFTVERK TILL HAVS

Beskrivning av mekanismer och
rekommendationer för dimensionering

LARS BERGDAHL

Vatten Miljö Transport
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2002

Islaster på vindkraftverk till havs

SAMMANFATTNING

Lastmekanismer för islaster på vindkraftverk till havs beskrivs. Islasterna uppkommer på grund av värmeutvidgning, vattenståndsvariationer, drift av isfält, isflak och isval-lar, och islasternas storlek beror av brottmoder, deformationshastigheter och isegen-skaper. Nedisning berörs kortfattat för fullständighetens skull. Isförekomst, istjockle-
kar, isliggetid, vattenståndsvariationer och strömhastigheter i svenska farvatten anges. Huvudtexten avslutas med ett förslag till dimensioneringsrekommendationer för vind-kraftverk till havs. I appendix finns en utförlig genomgång av isens fysikaliska egen-skaper, isens hållfasthetsegenskaper, iskrafter mot vertikal och lutande strukturer.

Islaster på vindkraftverk till havs

FÖRORD

De riktlinjer och underliggande antaganden om dimensionering av bropelare, fyrar och offshorekonstruktioner som tillämpats tillkom från början utan någon faktisk kunskap om istryckens mekanik. Sedan dessa riktlinjer under lång tid tillämpats har de dock fått ett empiriskt värde. Riktlinjerna för dimensionering av bropelare har t ex inte resulterat i några egentliga bakslag, medan några mindre utsjöfyrar skadats eller brutits ned trots att man följt liknande tidiga riktlinjer för fyrar.

Dimensioneringsrekommendationerna i den föreliggande rapporten bygger på erfarenheterna från skador på svenska och finska utsjöfyrar; på Vägverkets: ”Istryck på bropelare”; kanadensiska standard och sovjetiska normer och publicerade kommentarer till dessa; samt på några senare vetenskapliga resultat. I rekommendationerna har – på grund av islasternas slumpmässiga natur – lasterna på koniska fundament inte reducerats till de låga nivåer, som man enligt moderna rön skulle kunna förvänta sig, om man kunde vara säker på att böjbrottmekanismen alltid fungerade. Osäkerheten i bestämningen av islasterna beror i första hand på svårigheterna att fastställa förutsättningarna i form av istjocklekar, fast is eller drivis, isvallar, istyper, is hållfasthet vid olika årstider mm, medan däremot beräkningen av tryckens storlek vid kända förutsättningar numera är ganska säker.

Rapporten innehåller en huvuddel som beskriver lastmekanismer, erfarenheter från byggda konstruktioner, några resultat från fältmätningar, isstatistik mm följt av dimensioneringsrekommendationerna. I appendix finns en mycket preliminär sammanställning av vetenskapligt underlagsmaterial.

Arbetet har bekostats av Statens Energimyndighet inom ramen för vindkraftprogrammet, Projektnr 13079-1. Appendixen har sammanställts av mastersstudenten vid Internationella strukturmekanikprogrammet vid Chalmers Ing. Kim Il Ho. Det är tänkt att dimensioneringsrekommendationerna skall omarbetas efter synpunkter från industrin och forskarvärlden. Lennart Fransson, Luleå tekniska universitet, Sven-Erik Thor FOI FFV och Bengt Göransson, Scanwind, har redan givit synpunkter som har påverkat huvudtexten.

Göteborg, maj 2002

Lars Bergdahl

Islaster på vindkraftverk till havs

INNEHÅLL

Sammanfattning

Förord

Innehåll

| | |
|--|----|
| Islaster på vindkraftverk till havs..... | 1 |
| Bakgrund..... | 1 |
| Nuvarande praxis | 1 |
| Rapportens mål | 2 |
| Lastmekanismer | 3 |
| Termiska istryck..... | 3 |
| Beräkning av termiska istryck | 4 |
| Termiskt istryck mot vindkraftverksfundament..... | 6 |
| Horisontell last från fast istäcke p.g.a. vattenståndsvariationer och valvverkan | 6 |
| Horisontella laster från drivande is | 7 |
| Stöbelastning från drivande isflak | 7 |
| Horisontell last från stora isfält som drivs av ström och vind | 8 |
| Brottmoder vid skärning av isfält som drivs av ström och vind | 8 |
| Dynamiska effekter | 11 |
| Tryck från isvallar | 12 |
| Vertikala krafter från fast istäcke..... | 13 |
| Nedisning | 13 |
| Istatistik..... | 14 |
| Isförekomst | 15 |
| Istjocklekar, isliggetid mm..... | 17 |
| Vattenståndsvariationer..... | 20 |
| Strömmar..... | 22 |
| Dimensioneringsrekommendationer | 23 |
| Allmänna råd..... | 23 |
| Allmänt | 23 |
| Beteckningar | 23 |
| Val av istjocklek | 24 |
| Horisontell last från fast istäcke på grund av temperaturfluktuationer..... | 24 |
| Horisontell last från fast istäcke p.g.a. vattenståndsvariationer och valvverkan. | 24 |
| Horisontell last från drivande is | 24 |
| Dynamisk belastning..... | 27 |
| Tryck från packis (isvallar)..... | 27 |
| Vertikal kraft från fast istäcke..... | 27 |
| Referenser | 29 |

Appendix

- A Physical properties of ice
- B Mechanical properties of ice
- C Ice forces on vertical structures
- D Ice forces on sloping structures

Islaster på vindkraftverk till havs

ISLASTER PÅ VINDKRAFTVERK TILL HAVS

Bakgrund

Vindkraftverk placerade på grunda havsområden i svenska vatten kommer att utsättas för påverkan från istäcken eller ge upphov till packisvallar. Belastning från drivande isflak och isfält mot fundamenten till vindkraftverken torde tillhöra de större belastningar som fundamenten kommer att exponeras för. På litet djupare vatten kommer isfälten vid passage av kraftverken att brytas kontinuerligt och ge belastning ungefär i höjd med vattenytan. I lite grundare områden finns risk för upptorning till isvallar, som kan göra att istäcket glider upp på dessa och angriper på en högre nivå.

I områden skyddade mot isdrift och de stora krafter denna ger upphov till kan horisontella laster på grund av temperaturrörelser samt horisontell laster och lyftkrafter orsakade av vattenståndsändringar uppträda.

Den kontinuerliga isbrytningen kan ge upphov till en sågtandad belastning med en viss dominerande frekvens. Grova tunga konstruktioner utsätts för stora laster, men får små deformationer och försumbara vibrationer, och då är enbart maximala lasten intressant. För slanka konstruktioner däremot blir de uppträdande lasterna mindre, men deformationerna större och exciterade vibrationer kan resultera i utmattning och i sämsta fall resonanssvängningar och nedskakning av torn och vindturbin. Jämför till exempel med det finländska misslyckandet med slanka utsjöfyrrar av stål vintern 1973/74. (Styrelsen för vintersjöfartsforskning Nr 11, 1974)

Egentliga Östersjön är helt istäckt i genomsnitt vart trettionde år, och landfast is, isvallar och drivande isfält uppträder i snitt vartannat till vart fjärde år. Liknande förhållanden råder i Kattegatt och Skagerack, medan Ålands hav, Bottenhavet och Bottenviken har is varje år. (SMHI, 1982) Isvallar med en mäktighet på cirka 5 m uppträder vart tionde år i Egentliga Östersjön. Grundstötta och upptornade vallar kanske förekommer oftare, t ex i Kalmar sund utanför strandlinjen på vattendjupet 4 – 5 m. I Bottenhavet och Bottenviken förekommer regelbundet isvallar med ett djupgående på 20 – 25 m.

Nuvarande praxis

Man kan inte tala om någon etablerad praxis för beräkning av islaster på vindkraftsfundament. T ex Matthies et al. (1995) konstaterar att man i svenska studier räknar med stjälpande moment p.g.a. is som är två gånger så stort som moment från icke brytande vågor. Kühn (2001) gör en modern genomgång av metoder att beräkna laster på vindkraftverksfundament i havet men konstaterar vad beträffar is bara att man för vindkraftverket vid Nordersund räknat med 50 cm tjock is. Germanischer Lloyd har utarbetat speciella regler (1995) för certifiering av havsbaserade vindkraftverk. Avsnittet om islaster är där mycket summariskt och säger bara att sannolikheten för is och fasta istäcken skall undersökas och att i så fall en kompetent auktoritet (authority) efter överenskommelse med Germanischer Lloyd skall bestämma de mekaniska egenskaperna (mechanical properties, sic). I stället är man vid dimensionering hänvisad till regler, riktlinjer eller rekommenderad praxis utfärdade av DnV, API, Bureau Veritas, norska Oljedirektoratet (bottenfasta

anläggningar på kontinentalsockeln) och det brittiska Department of Energy (Numera: Health and Safety Executive) för anläggningar i havet. Dessa generella regelverk ger oftast dålig ledning vad gäller beräkning av islaster eftersom de mest behandlar vind- och våglaster.

Metoder och riktlinjer för islaster på bottenfasta strukturer till havs har dock publicerats av Vägverket (Löfquist, 1987), Norges Skipsforskningsinstitut (1979), IALA (Määtänen) och speciellt för vindkraftverk i SIKOB:s rapport om havsförlagda vindkraftverk (Hardell, 1978). Engelbrektsson sammanfattade Sjöfartverkets erfarenheter om belastning på utsjöfyror 1975. Den svenskfinska Styrelsen för vintersjöfartsforskning (1974) intresserade sig för problemet i samband med de ovan nämnda slanka finska stålfyrarna. Määtänen, som var med redan då, har 1999 publicerat en förtjänstfull modern sammanställning om rörlig havsis vid vindkraftverk. Timco et al (1995) redovisar modellförsök i is med pelarfundamenten till Västbron, Stora Bält, vilket är intressant i sammanhanget.

Rapportens mål

Rapportens mål är

- att beskriva tänkbara mekanismer för isens belastning på vindkraftsfundamenten,
- att ange överslagsmetoder för beräkning av belastningar och
- att som bakgrund beskriva
- isförekomst i svenska farvatten,
- isbildning och dess följder för
- isegenskaper såsom kristallstruktur, reologi och hållfasthet.

År 2001 genomförde Thor en litteraturstudie som tar upp många intressanta referenser kring ämnet. Den nu föreliggande rapporten är mer utförlig framför allt vad beträffar isegenskaper och beräkning av belastningar, och ger också konkreta förslag till dimensioneringsvärden.

LASTMEKANISMER

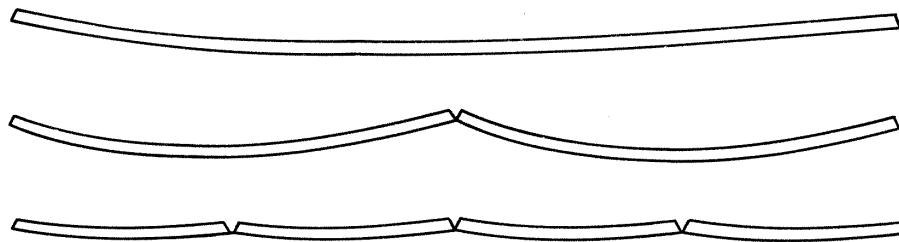
Indelningen nedan följer till stor del Vägverkets rapport: Istryck mot bropelare (Löfquist, 1987).

Islaster mot vindkraftsfundamenten utgörs av

- horisontell last från fast istäcke på grund av temperaturfluktuationer (termiskt istryck)
- horisontell last från fast istäcke på grund av vattenståndsvariationer och valvverkan.
- horisontell last från drivande is
- tryck från packis (isvallar) och
- vertikal kraft från fast istäcke.

Termiska istryck

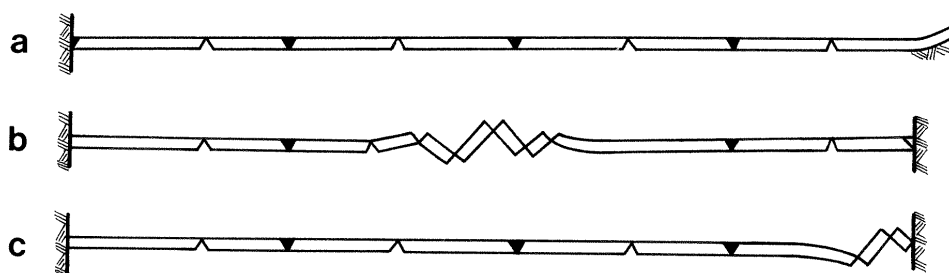
Nybildade tunna istäcken i sötvatten har en temperatur nära isens fryspunkt. Vartefter isen tillväxer i tjocklek kommer dock temperaturen i isens överyta att sjunka, och denna kommer därför att krympa och dragspänningar uppstår där. Dragspänningarna kan balanseras av tryckspänningar i isens undersida eller av dragspänningar mot stränder eller konstruktioner. Vid mycket kallt väder eller snabba temperaturfall kommer isen att spricka upp, och genomgående sprickor bildas.



Figur 1 Bågningen och uppsprickningen av ett flytande istäcke efter en snabb sänkning av lufttemperaturen. (Bergdahl, 1978)

I de större av dessa kan vatten tränga upp och frysa till. Vid senare mildvädersperioder kommer istäcket att expandera men får då inte plats och ger därför upphov till stora krafter mot branta stränder, följt av buckling av istäcket, förskjutning upp på flacka stränder eller överskjutning över angränsande isfält.

Islaster på vindkraftverk till havs



Figur 2 Exempel på expanderande istäcken

- a) som skjuter upp på en flack strand
- b) som knäcker ute på vattenytan och
- c) som knäcker mot en brant strand. (Bergdahl, 1978)

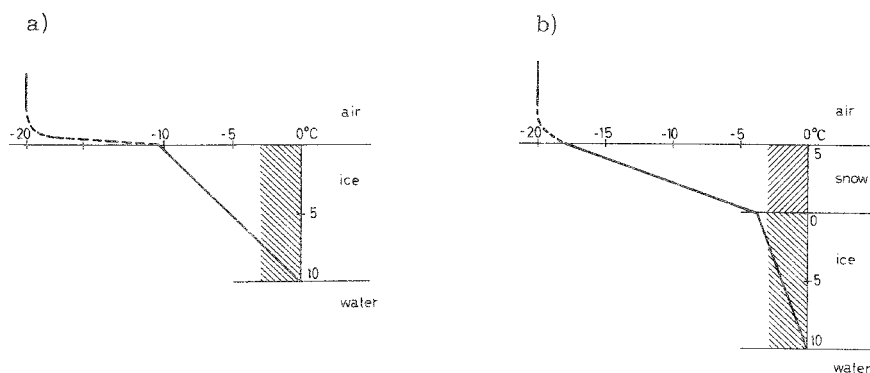
Trycken i fasta istäcken i sötvatten kan bli betydande: För norra Sverige anges i litteraturen möjliga tryck upp mot 500 kN/m och för södra Sverige 250 kN/m. Tryck på 240-300 kN/m har konstaterats vid fältmätningar i USA och Sverige. (Löfquist 1987)

Salthaltig is med salthalter över c:a 0,5 % har negativ längdutvidgningskoefficient och därför borde temperaturberoende is inte vara något problem i Skagerack, Kattegatt, och Egentliga Östersjön, men kan tänkas spela roll i Bottenviken, Bottenhavet och Stockholms skärgård.

Beräkning av termiska istryck

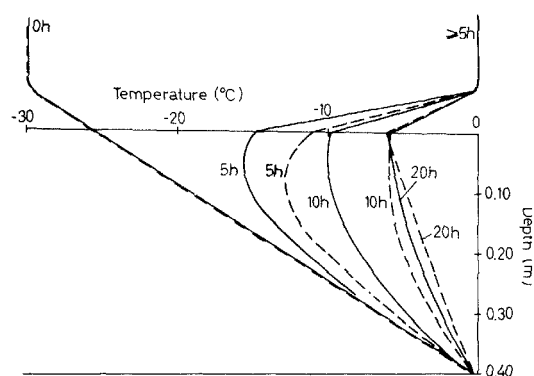
Det är vanskligt att bestämma storleken av de termiska istrycken, bl. a. för att isens reologiska beteende (deformation under belastning) är svårbeskrivet, men också för att det är svårt att definiera de yttre omständigheterna i form av temperaturförändringar i lufthavet; starttemperaturen och temperaturökningshastigheten i istäcket (funktion av vindhastighet, solinstrålning, luftens klarhet, snö på isen etc.); i vilken omfattning vatten har trängt upp i alla sprickor mm (Bergdahl, 1978, Bergdahl och Wernersson, 1978, Fransson 1988). För exempel på hur olika temperaturfördelningen kan vara i ett bart istäcke och ett med snö, se figur 3.

Islaster på vindkraftverk till havs



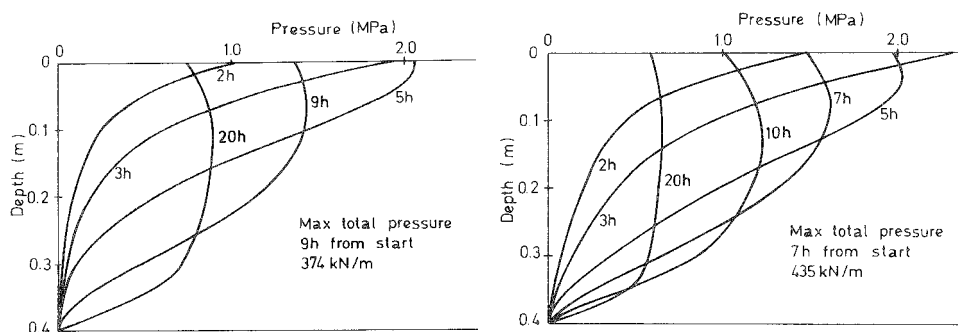
Figur 3 Exempel på temperaturfördelningar i ett 10 cm tjockt istäcke a) utan snö och b) med 5 cm snö. (Bergdahl, 1978)

| | |
|------------------------------|---------|
| Lufttemperatur | -20°C |
| Vindhastighet | 2 m/s |
| Ångtryck | 0,03 Pa |
| Molnighet | 4/8 |
| Kortvågig instrålning (natt) | 0 |



Figur 4 Exempel på uppvärmningen av ett 40 cm tjockt istäcke utan sol, heldragna kurvor, och med sol, streckade kurvor. Samma lufttemperaturökning, ångtryck och vindhastighet i båda fallen. (Bergdahl, 1978)

Islaster på vindkraftverk till havs



Figur 5 Tryckfördelningar uppkomna i ett istäcke på grund av uppvärmning och förhindrad expansion. Vänstra figuren i mulet väder motsvarande heldragna kurvor i figur 3, och högra figuren i soligt väder motsvarande streckade kurvor i figur 3. (Bergdahl, 1978)

Termiskt istryck mot vindkraftverksfundament

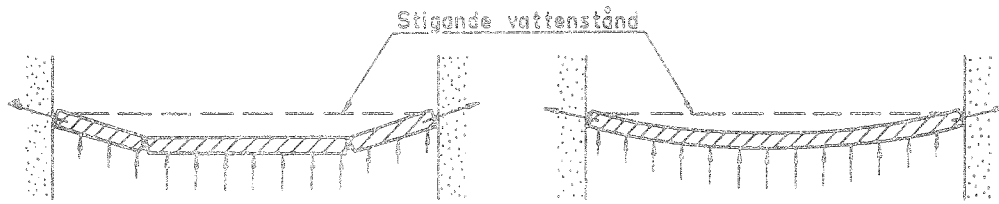
Om vindkraftverken är placerade inomskärs i ett homogent istäcke, så kommer det termiska istrycket att vara allsidigt och ger då ingen resulterande kraft eller stjälpande moment på fundamenten, men manteln måste kunna bära trycket utan att buckla eller brista.

Vanligare torde vara att vindkraftverken är placerade något ut från kusten – det är ju det som är idén – och att det litet längre ut är öppet vatten eller bruten farled mot vilka isen kan expandera fritt. Isens expansion utåt förhindras då enbart av vindkraftsfundamenten själva. Om kusten är brant och avståndet till land är några hundra meter eller mer så blir krafterna mot fundamenten då så stora att isen där krossas, bucklar eller, vid långsam förskjutning, deformeras visköst.

Ett exempel på att krafterna kan bli stora är en händelse vid Hjulstabron i Mälaren, där 1953 den södra anslagspelaren i svängbron stälptes till anläggning mot svängspannet så att bron inte gick att öppna. Lufttemperaturen hade då stigit cirka 14° på 12 h, och det 22 cm tjocka istäcket hade expanderat ut mot den brutna rännan under bron. Kraften uppskattades av Haggård (Löfquist, 1987) till 3 MN eller 270 kN/m. Ett annat exempel på undervärdering av problemet är de fyra i Mälaren på dykdalber placerade fyror som man tvingades släcka redan första vintersäsongen (75/76) efter deras installation. De hade nämligen förskjutits eller vridits så mycket av isexpansionen mot den brutna rännan att de visade fel. Krafterna uppskattades till mellan 200 och 800 kN och istrycket till mellan 100 och 270 kN/m av dykdalbens bredd. (Vattenbyggnadsbyrån, 1979)

Horisontell last från fast istäcke p.g.a. vattenståndsvariationer och valvverkan

Om vattenståndet sjunker efter att istäcke bildats och frusit fast vid fundament och stränder kommer istäcket att hänga kvar vid dessa och böjspänningar uppkommer som resulterar i sprickor. Dessa sprickor fylls helt eller delvis av snö och vatten och fryser till. När vattenståndet sedan stiger igen uppstår en spännverkan mot stränder och fundament om isen inte kan röra sig fritt mot öppet vatten. Se figur 6.



Figur 6 Sidkrafter vid stigande vattenstånd. Idealiserade modeller.
(Löfquist, 1987)

Spännverkan kan således – liknande det som gäller för termiskt istryck – uppkomma dels mellan land och vindkraftverksfundament som förhindrar isens rörelse ut mot öppet vatten dels mellan fundamenten i grupper av vindkraftverk. I det förra fallet riktas kraften från land ut mot öppet vatten. I det senare fallet radiellt ut från centrum av vindkraftverksgruppen om istäcket inte har landkontakt. Vid mindre branta stränder och konstruktioner kan det spruckna istäcket och strandmaterialet skjutas långt upp på land som följd av upprepade vattenståndsvariationer. Mot branta stränder bropelare och fundament kan istället istäcket skiktas och mer än fördubblas i tjocklek. Det senare kan då innebära att den lokala belastningen och det allsidiga trycket mot ett fundament med liten utsträckning kan bli åtskilligt större än om istäcket vore jämntjockt.

Horisontella laster från drivande is

Stötbelastning från drivande isflak

Där lös drivande is förekommer kan stora krafter utvecklas när isflak eller isbrötar törnar mot hinder som t ex bropelare eller kraftverksfundament. Vid en central stöt står i princip hela isflakets rörelseenergi till förfogande för att bryta ner hindret eller alternativt krossa, buckla eller böja isen i kontaktpunkten. Vid en sned stöt omvandlas en del av den linjära rörelseenergin till rotationsenergi, vilket kan minska kontaktkrafterna något.

Fenomenet har studerats för bropelare i floder, speciellt i Ryssland och Kanada. Från t ex Kanada refereras ett fall där en bropelare försköts. Isens krosshållfasthet uppskattades efteråt till 1 MPa. Från Kina rapporteras att kraften från en stöt där en bropelare nästan stjälppte kunde uppskattas till 3 MN vilket motsvarade 1,8 MPa ishållfasthet. (Löfquist, 1987)

Till havs torde många isflak vara mycket stora. Haapanen m.fl. (1999) anger att isflak lätt kan ha en storlek på 30×30 km² och om de driver med hastigheten 0,5 - 1 m/s (1 - 2 knop), vilket inte behöver vara ovanligt, inser man att även krafterna kommer att bli stora, och gör att mindre strukturer efter den första stöten skär sig igenom större isflak på samma sätt som beskrivs nedan. Skillnaden i belastning är då främst att den första stöten kan ge vindkraftverket en kraftig impulsbelastning som exciterar egensvängningar.

Horisontell last från stora isfält som drivs av ström och vind

Tryck från fasta istäcken som hålls i rörelse av ström och vind är antagligen det viktigaste lastfallet vid design av vindkraftverk till havs i områden där istäcken förekommer. Erfarenhet av stora belastningar på grund av detta föreligger från fyror där skador inträffat i Bottenviken och Finska viken.

Av denna orsak försköts fyren Tainio i Finska viken – innan grunden hunnit injekteras – c:a 14 m över en plan berghäll. Islasten kunde uppskattas till 4 – 5,6 MN och istrycket till 1,15 – 1,6 kN/m av konstruktionens diameter 3,5 m. (Löfquist, 1987) Fyren har ett fundament bestående av en sandfylld cirkulär betongkassun, gjuten på land och bogserad och sänkt på plats.

Engelbrektsen (1974, 1983) listar också följande fall:

- **NYGRÅN**
Kassunfyra utsatt 1958 utanför Rönnskär i Bottenviken. Tornet bröts av helt under vintern 1968-1969. Den horisontella islasten kunde gafflas in till cirka 4 MN och istrycket till 1,6 MN/m av konstruktionens diameter 2,5 m. Se även avsnittet om packis nedan.
- **BJÖRNKLACKEN och BORUSSIAGRUNDET**
Dessa tvillingfyror av kassuntyp utplacerades 1969 i en helt oskyddad del av Bottenviken, där isgången brukar vara svår. Våren 1970 upptäcktes att båda fyrorna förskjutits horisontellt, den förra cirka 10 cm den senare någon cm. Fyrarnas stabilitet förbättrades då genom komplettering med efterspända bergförankringar. Vid lunchtid den 4 april 1985 slets dock Björnklackens förankringar av, fyrens bottenkassun försköts 17 m och fyren fick en lutning på 12°. Vid inspektion av brotten bedömdes förankringarna ha varit helt intakta före brottet och visades inga tecken på korrosion. Istjockleken mättes lokalt kring fyren till 1,4 – 1,5 m och islasten beräknades till 10,9 MN på diametern 2,9 m dvs 3,75 MN/m eller 2,6 MPa. (Engelbrektsen, 1987, Fransson och Danielsson, 1985)
- **KEMI 1 och 2**
Två fyror med torn av stålrör nedslagna i sandbotten och fyllda med packad sand byggdes 1973 utanför Kemi. De skadades mycket svårt redan första vintern. De första skadorna orsakades av isstötar följda av egensvängningar, vilka skadade överbyggnaderna och fyrhusen. Slutligen bröts den ena fyren av nära basen. Detta brott bedömdes inte vara ett utmattningsbrott utan berodde på underdimensionering, och islasten kunde därför uppskattas till minst 4,4 MN i vattenlinjen (Styrelsen för vintersjöfartsforskning, 1974) eller 2,2 MN/m av konstruktionens bredd 2 m. Fyror ersattes senare av fyror med liknande fast starkare fundament men försågs med vibrationsisolerad överbyggnad och har klarat sig sedan dess. Vibrationsisoleringen visas t ex i Haapanen (1999).

Brottmöder vid skärning av isfält som drivs av ström och vind

När stora isfält med nästan konstant fart bryter sig förbi ett fast fundament kan isen skäras igenom genom att spräckas, krossas, bucklas eller böjas i kontakt punkten.

Vertikala fundament

Om fundamentet har vertikal trubbig front i strömriktningen kommer isfältet att buckla, skjuvas av i 45° uppåt eller nedåt, krossas i kontaktzonen eller möjligtvis klyvas, beroende på vilken kraft som är lägst. Fotona nedan visar som illustration

isgången förbi en bropelare i Kalix älv vid ett tillfälle i maj 1997. I båda bilderna kan man se hur isen dels krossas mot pelaren dels hur radiella sprickor bildats som strålar ut från pelarfronten. I den högra bilden ses också ett par gamla hopfrusna sprickor, som inte verkar påverka brottet till någon större grad. Den kontinuerliga krossningen vid isfältets passage av fundamentet ger upphov till en i tiden varierande belastning, som ibland kan excitera någon av strukturens egensvängningsmoder. Se vidare dynamiska effekter nedan.

Medan krossningskraften beror av isens hållfasthet och fundamentets form, styrs bucklingskraften av istäckets elasticitet. I de flesta fall uppträder inte buckling för smala fundament eller tjocka istäcken utan snarast för breda fundament eller tunna istäcken. Sodhi och Nevel (1980) anger t ex att kvoten mellan fundamentets diameter, D , och isens tjocklek, h , skall vara större än sex för att buckling skall inträffa:

$$D/h > 6.$$

Om istäcket är fastfruset vid fundamentet, när isen börjar röra på sig kan bucklingslasten bli tre till fyra gånger större än om isen kan glida och vrida sig fritt mot denna (Wang, 1978). Det är bl.a. därför viktigt att inte tillåta fastfrysning av istäcket i områden med risk för isdrift. Av detta skäl kan det vara intressant att förse fundamentet med någon hydrofob behandling i områden där man bara förväntar sig relativt tunna istäcken. Man kan kanske i skyddade lägen också komplettera med strömbildare eller bubbelanordning för att hålla isen tunnare intill fundamenten.

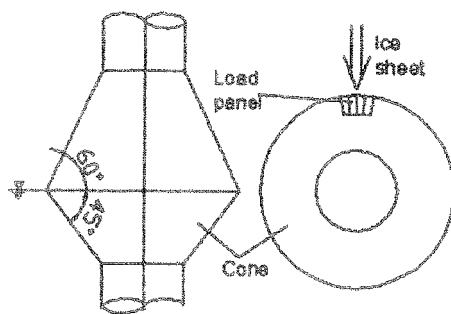


Figur 7 Exempel på isbrytning mot bropelare i Kalix älv i maj 1997
Foto Lennart Fransson Luleå tekniska universitet.

Kraften mot ett vertikalt fundament kan minskas om man utformar fundamentet som en plog (kil) med spetsen riktad mot rörelseriktningen och på så sätt klyver isen snarare än krossar den. Klyvningsmekanismen är intressant ur dimensioneringssynpunkt endast om istäcket eller isflaket efteråt kan glida åt sidan. För stora isfält eller i trånga passager måste klyvningen följas av någon annan typ av brott. Man måste också vara säker på isens rörelseriktning eller möjligtvis utforma anordningen som en flöjlande krage vilket kanske är realistiskt.

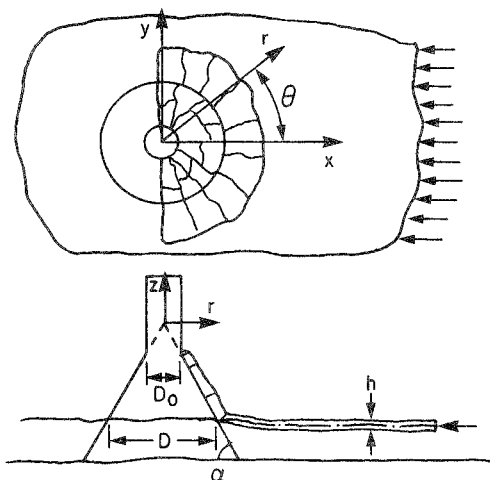
Lutande fundament

Ett annat sätt att göra den horisontella iskraften mindre är att utforma fundamentet koniskt uppåt eller nedåt i höjd med vattenytan och på så vis få istäcket att böjas till brott. För en bred konstruktion kan man genom detta minska iskraften till mindre än hälften. För en slank cirkulär konstruktion i ett område med vattenståndsvariationer är det inte lika självklart att man kan reducera kraften så mycket eftersom man måste se till att istäcket träffar i nivå med konen. Den ”exponerade” diametern kan då öka mer än vad kraften minskar om vattenståndsvariationerna är stora. En möjlig utformning vore att förse fundamentet med en krage i form av en dubbelkon som vid ett fältförsök med koner på plattformsbän i Bo hai (Yue och Bi, 2000). Se figur 8 nedan. Frågan är vad man vinner om istäcket träffar eller i sämsta fall har frusit fast på det bredaste stället. Eventuella lyftkrafter får dessutom ibland ett bättre grepp.



Figur 8 Dubbelkon monterad på plattformsbän i Bo Hai.
Tidvattenskillnad cirka 4 m, lastpanelerna är 1,4 m långa.
(Från Yue och Bi, 2000)

Brottprocessen mot en uppåttekande kon har studerats många t.ex. av Yue och Bi (2000) vid fältförsöket i Bo hai. Under varje brottcykel kan tre distinkta stadier särskiljas; böjbrott, uppklattring längs konen och utskjutning åt sidorna. I figur 9 nedan visas en skiss av brottets utseende. Detta ger upphov till en ganska regelbunden cyklisk belastning. Se vidare dynamiska effekter nedan.



Figur 9 Isbrytning mot ett koniskt fundament.
(Från Michel, 1978)

Den lägsta totalkraften uppträder om fundamentet är försett med en lutande vass kant riktad mot isfältets rörelse. Detta kan utnyttjas i älvar eller på andra ställen där man är säker på isrörelsens riktning, men är i allmänhet inte aktuellt att utnyttja för vindkraftverk i havet.

Dynamiska effekter

Vertikala fundament

Som nämnts ovan ger den kontinuerliga krossningen vid genomskärningen av isen upphov till en i tiden varierande belastning. För vissa ishastigheter uppstår då oregelbundna vibrationer och vid andra stationära vibrationer hos strukturen. Yue och Bi (2000) iakttog vid fältförsök med vertikala plattformsbän i den innersta viken av Gula havet, Bo hai, att de förra vibrationerna uppträder vid höga ishastigheter (0,3 – 0,4 m/s) och utgörs av en typisk smalbandig process. Vibrationsamplituderna är slumpmässiga och responsen liknar en som exciteras av vind och vågor. Brottmekanismen är en spröd flisande (flaking) process. De senare, stationära vibrationerna uppträder för jämntjock is vid låg hastighet, cirka 0,03 m/s. Vibrationsamplituden är nästan konstant och större än hos den oregelbundna vibrationen. En preliminär analys visar att relativhastigheten mellan is och struktur är sådan att brottet växlar regelbundet mellan segt och sprött.

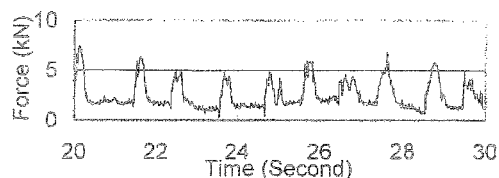
Vid höga ishastigheter kan man försumma strukturens vibrationshastighet jämfört med isens hastighet, och belastningshastigheten på isen kommer alltid att befinna sig i området för sprött brott, varvid isens krossas till mindre bitar, vars form och storlek bestäms av istäckets struktur. Det behöver då inte uppstå någon regelbundenhet i brytningsmekanismen, eftersom ”brottlängden” är slumpmässig, och responsen hos strukturen då också blir slumpmässig. Vid låga hastigheter däremot, kan man inte bortse från strukturens hastighet. Vid vissa speciella hastigheter kan då relativhastigheten göra att isens deformationshastighet kommer på gränsen mellan segt och sprött brott. Resultatet blir att isen brister växelvis i segt brott och växelvis i sprött brott, vilket kan förklaras på följande sätt. När strukturen trycks framåt i isriktningen, befinner sig deformationshastigheten i det sega området, men när isen sedan brister och strukturen fjädrar tillbaka, ökar relativhastigheten och deformationshastigheten går in i det spröda området. Detta får till följd att mikrosprickorna i isen propagerar snabbare och islasten faller dramatiskt. Amplituden och frekvensen på iskraften styrs av strukturens respons, och t.ex. ett stort vindkraftverk med stor filteringskapacitet kommer alltid att vibrera i närheten av sin resonansfrekvens. För en utförligare beskrivning se Yue och Bi (2000).

Lutande fundament

Även vid lutande fundament kan dynamiska effekter uppträda som initieras av de tre stadierna under varje brottcykel. Först bildas radiella sprickor och kraften ökar snabbt tills den första cirkelsprickan uppstår och de bildade sektorerna bryts av samtidigt. Under den följande uppklämningen längs konen minskar kraften för att sedan under utskjutning åt sidorna bli liten. Detta ger upphov till en ganska regelbunden cyklisk belastning, vars frekvens kan beräknas ur isens hastighet och avståndet, L , mellan konen och den cirkulära sprickan, den s.k. brottlängden. Se ett exempel på registrerad kraft i Bo hai. Brottlängden där mättes till cirka 7 gånger istjockleken, h (Yue och Bi 2000). Om isens hastighet är U blir således brottfrekvensen cirka

$$f_b = U/L = U/(7h).$$

Om denna frekvens är i närheten av strukturens resonansfrekvens uppträder dynamisk förstärkning av vibrationerna.



Figur 10 Typisk Iskraftsregistrering mot konen i figur 8. .
(Från Yue och Bi, 2000)

Tryck från isvallar

Isvallar förekommer i de områden i Östersjön, Kattegatt och Skagerack som är aktuella för utplacering av vindkraftverk. Dessa isvallar uppstår när drivis eller fast is pressas ihop av vind, strömmar och vattenståndsvariationer. Isvallarna kan uppnå en mäktighet på 25 m i Bottenviken och 5 m i södra Östersjön och på Sveriges västkust. Isvallar uppstår ofta på grunt vatten eller när den rörliga isen träffar på andra hinder som t ex fyrar eller vindkraftfundament. Lasterna ifrån nybildade isvallar är inte stora, men de kan torna upp till stor höjd. Upp till 14 m har noterats och det kan blockera ingångsdörrar i vindkraftstornen eller skada fast monterade stegar och plattformar (Haapanen et al., 1997). Risken för sådana skador är inte försumbar ens på Sveriges västkust. På 1950-talet förstördes t ex Restaurang Strandbaren söder om Falkenberg av is som pressades upp på stranden. Det händer också att färjorna i Öresund och i inloppet till Göteborg har problem med packisvallar.

Isvallarna består underst och överst av löst hoptryckta isflak och isfragment, men i nivå med vattenytan kan de ha frusit ihop och bildat ett konsoliderat konglomerat med ganska hög hållfasthet och större tjocklek än det omgivande plana istäcket. Detta gör att det finns risk för att kraften lokalt mot ett fundament kan bli större än vad som motsvarar isens brotthållfasthet och det plana istäckets tjocklek. En annan liknande effekt uppstår när större isfält förskjuts över varandra och sedan fryser ihop.

I t ex fallet Björnklacken ovan fanns på lovartsidan av fyren en isvall med höjden 1,4 m och med djupgåendet 3 m. Den konsoliderade isens tjocklek intill fyren uppskattades till 1,4 – 1,5 m, medan istäcket i stort hade en tjocklek på cirka 1 m. (Engelbrektsson, 1987, Fransson och Danielsson, 1985)

En annan väsentlig effekt kan vara, att det omgivande istäcket vid press förbi ett fundament bildar en isvall och kanar upp på denna. Iskraften kommer då att angripa fundamentet på en högre nivå än förutsett, så att det stjälpande och böjande momentet blir större än beräknat.

I fallet Nygrån ovan bröts fyrtornet av 1 m under vattenytan i anslutningen till bottenkassunen. Tornet var beräknat för en kraft av 3,75 MN verkande 0,5 m över vattenytan. Packisen byggde dock upp till stor höjd så att tryckresultanten kom att verka på omkring 2 m över vattenytan. Troligtvis hade även i detta fall isen i vallen

delvis frusit ihop till ett fast konglomerat varför kraften också blev stor. (Bergdahl, 1971, Engelbrektsson, 1974)

Vertikala krafter från fast istäcke

Vid vattenståndsväxlingar kan vertikala krafter uppkomma som en komponent till spännkraften (Se figur 6) men också utan horisontell komponent om istäcket frusit fast vid fundamentet. Vid fallande vattenstånd hänger då istäcket kvar och dess tyngd ger en nedåtriktad kraft, som i allmänhet inte vållar några större bekymmer. Vid stigande vattenstånd blir kraften uppåtriktad och bestäms av vattnets uppkraft mot den grop eller det tråg som bildas intill konstruktionen vid isens lyftning. Kraftens storlek begränsas för tjocka isar av att dessa är uppspruckna och brister och att vatten kan tränga upp genom isen. Vid slanka konstruktioner begränsas lyftkraften av isens skjuvhållfasthet eller skjuvvidhäftningen. Lyftkrafter är av intresse främst för mindre konstruktioner såsom bryggor, ledverk, pålar och dykdalber, som ofta lyfts av istäcket när vattnet stiger. För bropelare vållar lyftkrafterna normalt inga olägenheter (Löfquist, 1987). Enligt Haappanen et al (1997) är också vindkraftverk i allmänhet tillräckligt tunga för att motstå lyftkrafter.

Nedisning

Nedisning av vindkraftverk inträffar vid kallt väder och öppet vatten. Detta kan ge följande effekter: (Engelbrektsson, 1975)

- tyngd av isbeläggningen,
- ökning av vindmotstånd,
- krafter av nedfallande is och
- fastfrysning av rörliga delar.

Germanischer Lloyd (1995) anger att man skall räkna med 30 mm istjocklek med densiteten 900 kg/m³. Oljedirektoratet (1994) anger två oberoende lastfall enligt tabell 1. Det ena anger ökad vikt pga. stänk (sjöspröjt) det andra pga nederbörd. I föreliggande rapport behandlas inte detta ytterligare.

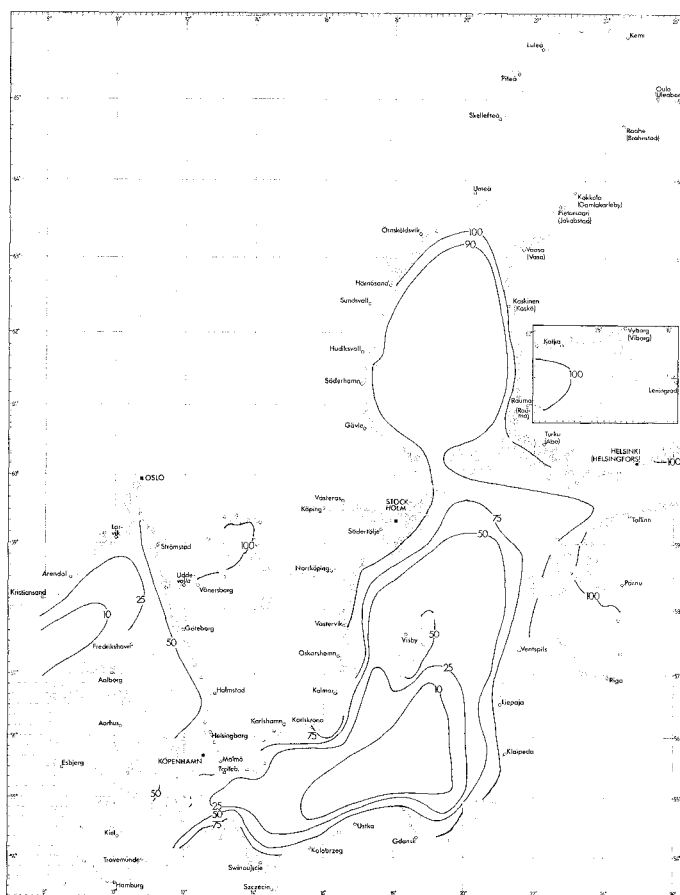
Tabell 1 Last av ackumulerad is. (Efter Oljedirektoratet, 1994)

| Höjd över havsytan | Lastfall 1 | | | Lastfall 2 | |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------|-----------------------|
| | Is pga. stänk | | | Is pga. nederbörd | |
| | 56°N till 68°N | Norr om - 68°N | Densitet | Tjocklek | Densitet |
| 5 m – 10 m | 80 mm | 150 mm | 850 kg/m ³ | 10 mm | 900 kg/m ³ |
| 10 m – 25 m | Linjär reduktion från 80 mm till 0 | Linjär reduktion från 150 mm till 0 | Linjär reduktion från 850 kg/m ³ till 500 kg/m ³ | 10 mm | 900 kg/m ³ |
| Över 25 m | 0 | 0 | - | 10 mm | 900 kg/m ³ |

ISTATISTIK

Egentliga Östersjön är helt istäckt i genomsnitt vart trettionde år, och landfast is, isvallar och drivande isfält uppträder i snitt vartannat till vart fjärde år. Liknande förhållanden råder i Kattegatt och Skagerack, medan Ålands hav, Bottenhavet, och Bottenviken och Finska viken har is praktiskt taget varje år. En karta över sannolikheten för isförekomst återges i figur 11 nedan. Isvallar med en mäktighet på cirka 5 m uppträder vart tionde år i Egentliga Östersjön. Grundstötta och upptornade vallar kanske förekommer oftare, t ex i Kalmar sund utanför strandlinjen på vattendjupet 4 – 5 m. I Bottenhavet och Bottenviken förekommer regelbundet isvallar med ett djupgående på 20 – 25 m. Mycket av informationen nedan är tagen från SMHI och Havsforskningsinstitutet: *Climatologic Ice Atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern (1963-1979)*, 1982. ”Isförhållanden i svenska farvatten under normalperioden 1961-1990” innehåller senare information om isutbredning men inte mycket om istjocklekar. Senare statistik är under bearbetning och kommer att göras tillgänglig i digital form. I ”Svensk Lots Del A” finns också ett auktoritativt och välskrivet kapitel om isförhållanden (Sjöfartverket, 1992).

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



Figur 11 Sannolikheten för isförekomst i procent (SMHI och Havsforskningsinstitutet, 1982, även Svensk Lots 1992)

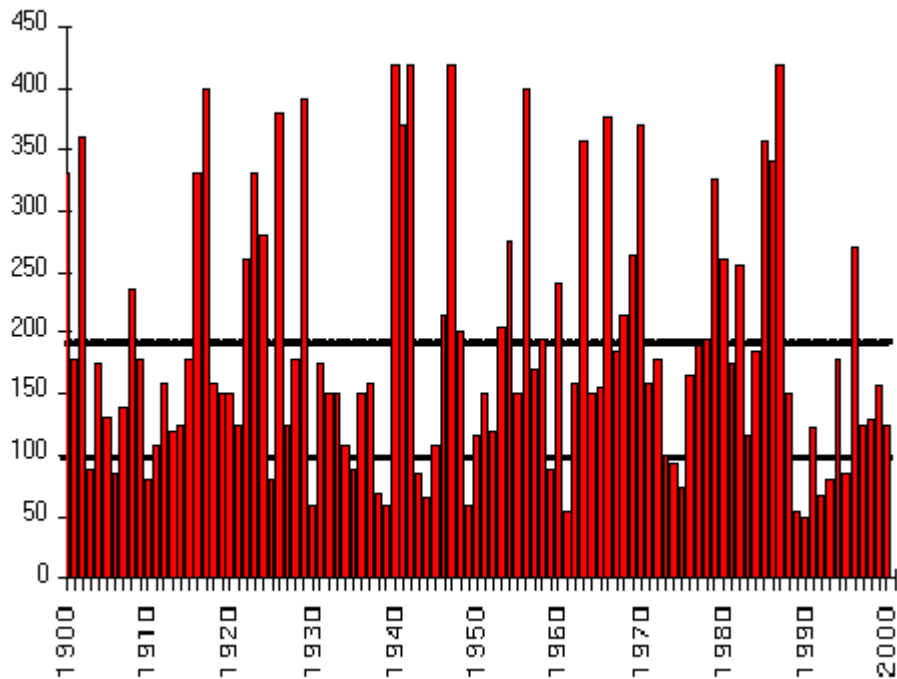
I havsisstudier måste man skilja mellan fastis och drivis. Fastis är jämn plan is som sitter fast i skärgårdar och utefter kuster. Den förekommer oftast innanför 5-15 meters djupkurvan, utvecklas ganska snabbt under tillfrysningsperioden och ligger sedan ganska still under större delen av issäsongen. Haapanen et al. (1997) påpekar att i östra Bottenviken brukar den landfasta isens drift upphöra när den blivit tjockare än cirka 30 cm, och fastän isen senare på säsongen blir tjockare än 0,8 m och ibland upp till 1,3 m bedöms den ligga still tills den på våren börjar driva igen. Den är då inte längre så hållfast och krafterna bedöms inte bli så stora. Enligt Haapanen bör vindkraftverk endast byggas i sådana områden med erfarenhetsmässigt fast is.

I motsats till fastisen är drivisen av dynamisk natur. Vind och ström får den att röra sig och att deformeras. Under svåra stormar kan den förflytta sig 20 – 30 km på ett dygn. Isflak av åtskilliga kilometers diameter omväxlar med råkar och små öppningar. Under midvintern fryser de öppna vattenytorna snabbt och nyis bildas. Deformationsprocesser ger sedan upphov till issörjebälten, hopskjuten is och isvallar.

Isförekomst

Enligt Sjöfartsverkets hemsida (2002) indelas isvintrarna i "lindriga", "normala" och "stränga". Den grundläggande faktorn vid bedömning av en isvinters totala svårighetsgrad är havsisens utbredning. Även andra förhållanden som inverkar på sjöfarten tas dock i beaktande. Dit hör isperiodens längd, istäckets framkomlighet under inverkan av vind- och strömförhållanden m.m. Diagrammet i figur 12 visar havsisens maximala utbredning i Östersjön, Kattegatt och Skagerak olika år. Diagrammet bekräftar påståendet att Egentliga Östersjön är helt istäckt i genomsnitt vart trettionde år. Under 1900-talet har Östersjön varit nästan helt istäckt fyra gånger, senast 1986/87. I figur 13 återges som ett exempel den maximala isutbredningen under denna vinter.

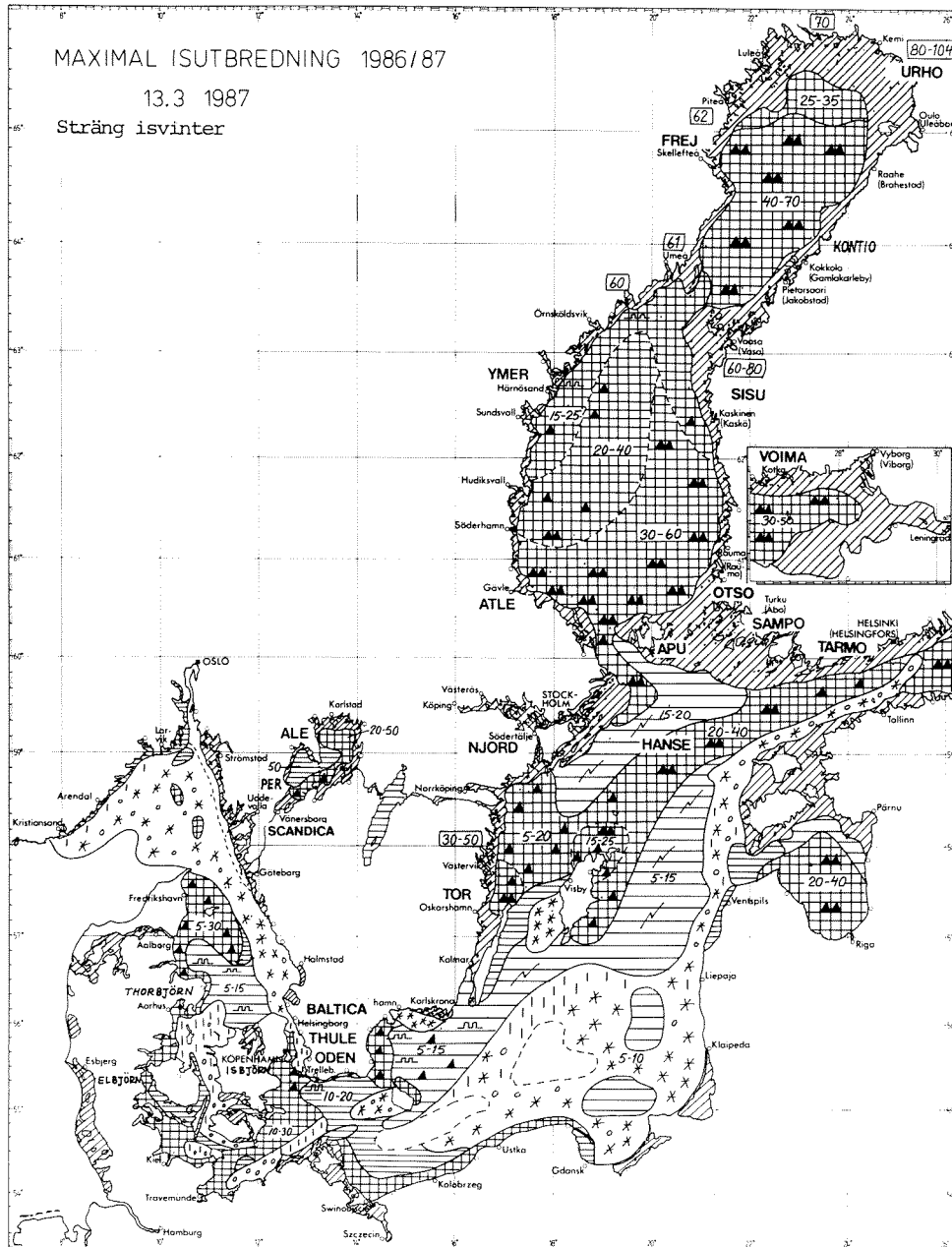
Areal
(km²)



Figur 12 Diagram över isutbredningen för vintrarna 1900-2000

Diagrammet visar den maximala isutbredningen i Östersjön, Kattegatt och Skagerak olika år. Gränsen mellan "lindrig" och "normal" isvinter går vid 98 000 km². Gränsen mellan "normal" och "sträng" isvinter går vid 193 000 km². (Från Sjöfartsverkets hemsida med tillåtelse, även i Lundquist & Gullne, 2001)

Islaster på vindkraftverk till havs



Figur 13 Maximala isutbredning 1986/87. Siffrorna med kursiv stil anger flak- eller fastisens tjocklek i cm. Ur *Sammanfattning av isvintern och isbrytarverksamheten 2000/2001*, Sjöfartsverket och SMHI (Lundquist & Gullne, 2001)

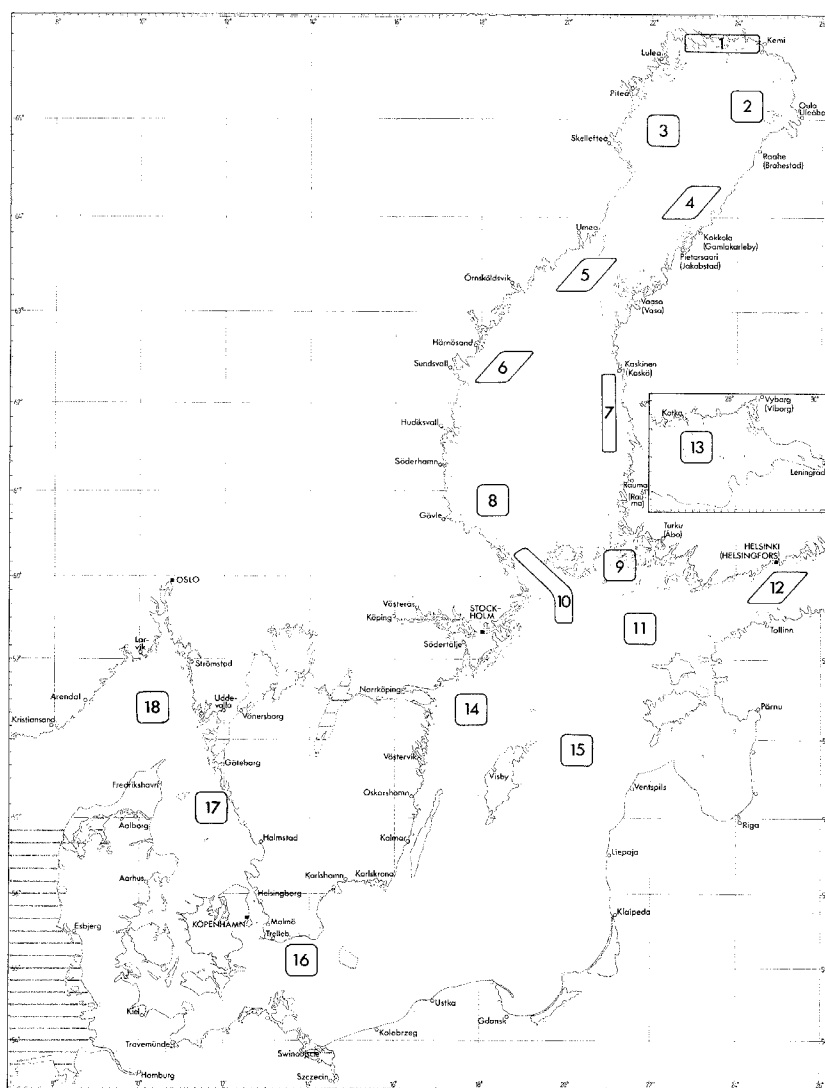
Istjocklekar, isliggetid mm

SMHI och Havsforskningsinstitutets klimatologiska isatlas (1982) omfattar de 16 åren mellan 1963 och 1979 och grundar sig på observationer den 1, 11 och 21 dagen varje månad. Observationsområdena visas i figur 14. De ligger alla kanske litet väl långt ut till havs, och man har, som Thor (2001) påpekar, anledning förmoda att isen är tjockare närmare land, men att den där ligger mer still.

Islaster på vindkraftverk till havs

I tabell 2 nedan sammanfattas lite av tabellerna över flaktjocklek i den klimatologiska atlasen. I tabellen återges 16-årsmedelvärdet av mätt istjocklek för datum med störst medelstjocklek under säsongen och registrerad maximal istjocklek. Ofta uppträder den senare sent på säsongen och man kan misstänka att den består av is något uppluckrad av sol och värme. Som jämförelse återges en tabell, tabell 3, över istjockleken från Svensk Lots (Sjöfartsverket, 1992). De maximala istjocklekarna i tabell 2 motsvarar grovt sett stränga vintrar inomskärs i tabell 3, medan medelstjocklekarna motsvarar normala vintrar inomskärs.

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



Figur 14 Områden för vilka istjockleksfördelningar har beräknats. (SMHI och Havsforskningsinstitutet, 1982)

Tabell 2 Istjocklek och isfrekvens till havs i en del av de områden som visas i figur 13. (Egen bearbetning av uppgifter från SMHI och Havsforskningsinstitutet, 1982)

| Plats | Område | Medelvärde av mätt istjocklek för datum med störst istjocklek under säsongen (cm) | Max. (cm) | Antal år is förekommit på platsen av totalt 16 år |
|--------------------------|--------|---|-----------|---|
| ONO Skellefteå | 3 | 52 | > 73 | 16 |
| SSO Umeå | 5 | 28 | 57-72 | 16 |
| O Sundsvall | 6 | 30 | 31-42 | 12 |
| ONO Gävle | 8 | 28 | > 73 | 12 |
| Mellan Åland och Sverige | 10 | 28 | > 73 | 9 |
| O Bråviken | 14 | 27 | 43-56 | 6 |
| ONO Gotland | 15 | 16 | 21-30 | 3 |
| S Ystad | 16 | 11 | 21-30 | 3 |
| V Varberg | 17 | 11 | 21-30 | 4 |

Tabell 3 Istjocklek. Isens medeltjocklek (cm) vid sträng, normal, respektive mild isvinter. (Sjöfartsverket, 1992)

| | Stränga vintrar | | Normala vintrar | | Milda vintrar | |
|----------------------------------|--|-----------|-----------------|-----------|---------------|-----------|
| | Utomskärs | Inomskärs | Utomskärs | Inomskärs | Utomskärs | Inomskärs |
| Bottenviken | 70-80 | 80-90 | 40-60 | 60-70 | 20-40 | 40-50 |
| Norra Bottenhavet | 40-60 | 60-70 | 20-30 | 40 | 10-20 | 20 |
| Södra Bottenhavet | 30-50 | 40-60 | 20 | 20-30 | isfritt | 10-15 |
| Norra Östersjön | 30-50 | 30-50 | 10-20 | 20-30 | isfritt | isfritt |
| Södra Östersjön | 10-30 | 20-30 | isfritt | 10-20 | isfritt | isfritt |
| Skagerack & Kattegatt | 10-20 | 20-30 | isfritt | 10-15 | isfritt | isfritt |
| Vänern | 20-50 | 40-60 | 10-20 | 30-40 | isfritt | 10-15 |
| Mälaren | Överensstämmer i stort sett med Vänerns skärgårdar | | | | | |

VATTENSTÅNDSVARIATIONER

I Svensk Lots del A (Sjöfartsverket, 1992) finns en sammanfattande beskrivning av vattenstånd och landhöjning, vilken rekommenderas till närmare studium. Här skall bara återges en tabell över karakteristiska vattenstånd och refereras mycket kort orsakerna till vattenståndsvariationerna.

På grund av stora lokala variationer bör de uppgifter som lämnas för orterna i tabellen nedan tolkas med försiktighet. Av tabellen framgår att vattenstånd från 1 m över medelvattenståndet till 1 m under medelvattenståndet inte är ovanliga, och det får konsekvenser för lyftkrafter från istäcket och placering av isbrytande koner på fundamenten.

Tabell 4 Karakteristiska vattenstånd. (Sjöfartsverket, 1992)

HHW = Högsta högvatten = högsta registrerade vattenstånd
 MHW = Medelhögvatten = medeltal av samtliga årsmaxima
 MW = Medelvatten = medelvärdet av hela observationsserien
 MLW = Medellågvatten = medeltal av samtliga årsmåxima
 LLW = Lägsta lågvatten = lägsta registrerade vattenstånd

| Karakteristiska vattenstånd | | | | | |
|------------------------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| Angivna i cm | | | | | |
| Station | HHW | MHW | MW | MLW | LLW |
| Kalix (1974-1983) | + 181 | + 100 | 0 | - 80 | - 140 |
| Furuögrund (1916-1981) | + 153 | + 79 | 0 | - 70 | - 120 |
| Ratan (1892-1983) | + 137 | + 78 | 0 | - 70 | - 122 |
| Draghällan/Spikarna (1898-1983) | + 132 | + 68 | 0 | - 56 | - 90 |
| Björn (nedlagd) (1892-1975) | + 136 | + 73 | 0 | - 52 | - 81 |
| Forsmark (1889-1983) | + 160 | + 75 | 0 | - 55 | - 90 |
| Stockholm (1889-1983) | + 120 | + 61 | 0 | - 46 | - 68 |
| Landsort (1887-1983) | + 99 | + 54 | 0 | - 44 | - 68 |
| Marviken | + 101 | + 60 | 0 | - 45 | - 75 |
| Visby | + 88 | + 48 | 0 | - 40 | - 70 |
| Ölands norra udde (1887-1983) | + 135 | + 65 | 0 | - 42 | - 80 |
| Kungsholmsfort (1887-1983) | + 133 | + 74 | 0 | - 65 | - 94 |
| Simrishamn | + 160 | + 85 | 0 | - 85 | - 135 |
| Ystad (1887-1983) | + 167 | + 90 | 0 | - 93 | - 144 |
| Klagshamn | + 140 | + 86 | 0 | - 74 | - 102 |
| Viken | + 160 | + 90 | 0 | - 70 | - 120 |
| Varberg (nedlagd) (1887-1980) | + 145 | + 96 | 0 | - 64 | - 116 |
| Ringhals | + 145 | + 95 | 0 | - 65 | - 120 |
| Göteborg/Torshamnen | + 150 | + 100 | 0 | - 70 | - 120 |
| Smögen (1911-1983) | + 148 | + 94 | 0 | - 69 | - 112 |
| Kungsvik | + 150 | + 100 | 0 | - 70 | - 120 |

Islaster på vindkraftverk till havs

Vattenståndsvariationernas orsaker är lufttrycket, vinden och tidvattnet. Lufttrycket har ett direkt inflytande på vattenståndet: högt lufttryck pressar ner vattenytan och lågt lufttryck lyfter vattenytan. Sambandet är dock mycket komplicerat på grund av att framför allt lågtrycken passerar så snabbt att vattenytan inte hinner ställa in sig. Lufttrycksskillnaderna ger upphov till vindarna och när vinden blåser ihållande över ett havsområde ger den upphov till strömmar som i allmänhet höjer vattenståndet vid den kust vinden blåser mot. Särskilt i södra Östersjön, Öresund och de danska farvattnen är vattenstånden beroende av vindarna. Tidvattenvariationerna är i svenska vatten ganska obetydliga jämfört med övriga effekter. I norra Bohuslän är t ex den maximala tidvattenskillnaden ca 40 cm mellan låg- och högvatten och i Östersjön saknar tidvattnet all praktisk betydelse.

Ett speciellt fenomen är sjösprång, som har registrerats på några platser runt kusterna. De karakteriseras av mycket snabba och kraftiga vattenståndsvariationer med ibland mer än 1 m höjdvariationer med en period på 5 – 15 min. Särskilt nämns Ystad i Svensk Lots (Sjöfartsverket, 1992). Sjösprång uppträder oregelbundet och är svåra att förutse. Två faktorer verkar vara nödvändiga för deras uppkomst: En kallfront rör sig över havsområdet och djupet i området är måttligt (några tiotal meter) med slät bottenprofil. Orsaken kan vara att fronten rör sig med en hastighet som ligger nära fashastigheten för ”långa” vågor relativt vattendjupet, \sqrt{gh} , där h är vattendjupet och g jordaccelerationen. Fronten får inte gå fortare eller alltför långsamt, då uppstår inte sjösprång.

STRÖMMAR

I Svensk Lots del A (Sjöfartsverket, 1992) finns en välskriven sammanfattning av svenska farvattens hydrografi dvs. salthalt, vattenbalans, strömmar och vågor. Här skall bara mycket kort refereras orsakerna till strömmarna och återges en tabell över vanligen förekommande strömhastigheter.

Havsströmmarna bildas genom ett komplicerat samspel mellan olika krafter. I svenska farvatten är de främsta drivande krafterna

- a) vindkraften
- b) horisontella densitetsskillnader
- c) vattenytans lutning
- d) tidvatten och
- e) lufttrycksskillnader.

Sambanden är mycket komplicerade och diskuteras inte vidare här. Dock kan sägas att tidvattenströmmarna är obetydliga i Östersjön.

Under isliggetiden kan vinden inte verka direkt på vattenytan, men vinden kan i stället få istäcket i drift, likaväl som de strömmar som verkar på isens undersida.

Tabell 5 Strömhastigheter i knop (Sjöfartsverket, 1992)
(1 knop = 0,5 m/s)

| Område | Normal | Maximal |
|--------------------|-----------|---------|
| Bottenviken | 0,2 – 0,3 | 1,2 |
| Kvarnen | 0,4 – 0,5 | 2,0 |
| Bottenhavet | 0,2 – 0,3 | 1,2 |
| Ålands hav | 0,4 – 0,5 | 2,0 |
| Östersjön | 0,2 – 0,3 | 1,2 |
| Öresund | 0,5 – 1,5 | 5,0 |
| Kattegatt | 0,4 – 0,7 | 4,0 |
| Skagerack | 0,5 – 1,0 | 4,0 |

DIMENSIONERINGSREKOMMENDATIONER¹

Allmänna råd

Iskrafternas storlek uppskattas med hänsyn till lokala is-, vattenstånds- och isdriftsförhållanden, samt till fundamentens form och storlek. Följande iskrafter skall värderas:

- horisontell last från fast istäcke på grund av temperaturfluktuationer (termiskt istryck)
- horisontell last från fast istäcke på grund av vattenståndsvariationer och valvverkan.
- horisontell last från drivande is
- tryck från packis (isvallar) och
- vertikal kraft från fast istäcke.

Allmänt

Maximala iskrafter från rörlig is skall anses verka samtidigt och i samma riktning som som för årstiden maximal vindkraft.

Maximala iskrafter antas kunna verka i godtyckligt höjdläge mellan MHW och MLW. Om risk för upptorning av is intill fundamentet bedöms föreligga antas angreppshöjden höjas med 0,2 ggr vattendjupet.

Vindkraftsfundamenten förutsätts i denna dimensioneringsrekommendation vara vertikala enkeltorn och sammansatta av cirkulära cylindrar eller koner.

Inomskärs eller nära kusten, där fastisen erfarenhetsmässigt ligger still efter att frusit till en viss tjocklek, kontrolleras last från rörlig is för denna mindre istjocklek, medan lasten från den senare tillväxta tjockare isen kontrolleras m a p temperaturspänningar, valvverkan och lyftkraft.

I områden där normalt isdrift försiggår kontrolleras alltid last från rörlig is.

Beteckningar

| | |
|-----|--|
| H | Horisontell iskraft mot fundamentet |
| f | kraft per breddenhet av fundamentet |
| V | Vertikal iskraft mot fundamentet |
| D | Diametern. Vid koniska uppåtriktade fundament mäts diametern på nivån 1/3 från fastisens undersida. Vid nedåtriktade koner används diametern på nivån 1/3 från fastisens överyta |
| h | fastisens tjocklek. |

¹ Där inte annat anges speciellt bygger dimensioneringsformler i detta avsnitt på erfarenhetsunderlag redovisat av Löfquist (1987). Detta och annat material har kortfattat refererats i kapitlet Lastmekanismer och material i Appendix.

Val av istjocklek

Istjockleken väljes utomskärs till motsvarande Stränga vintrar utomskärs i tabell 3. Inomskärs väljs den rörliga isens tjocklek till motsvarande normala vintrar inomskärs och den fasta isen till stränga vintrar inomskärs.

Horisontell last från fast istäcke på grund av temperaturfluktuationer

Ensidigt termiskt istryck blir i regel störst för de yttre vindkraftfundamenten i en grupp av fundament, och skall antas verka från land ut mot öppet vatten eller från centrum av en grupp och radiellt utåt. Den termiska iskraften kan sättas till

$$H_t = f_t D \quad \dots 1$$

där diametern D sätts till 4 m för torn med mindre diameter.

Värdet på f_t sätts till 300 kN/m för ensamma fundament eller yttre fundament i en grupp. För bakomliggande eller inre fundament sätts f_t till 100 kN/m.

Värdet 300 kN/m kan under ogynnsamma förhållanden uppträda redan vid 30 cm istjocklek på Ostkusten. Utomskärs på Västkusten norr om Öresund behöver det termiska istrycket inte beaktas.

Observera att om man bryter en ränna genom en grupp vindkraftfundament där istäcket är under allsidigt termiskt tryck, så kommer isen att expandera mot den öppna rännan, och krafter enligt ekvation 1 kan uppträda.

Horisontell last från fast istäcke p.g.a. vattenståndsvariationer och valvverkan.

Ensidigt horisontellt tryck genom valvverkan mellan vindkraftfundament eller mellan dessa och land kan uppskattas på liknande sätt som med ekvation 1. Denna iskraft antas kunna uppstå ensidigt från grannfundament även centralt i en grupp vindkraftfundament.

$$H_v = f_v D \quad \dots 2$$

där diametern D sätts till 4 m för torn med mindre diameter, och f_v sätts till 200 kN/m.

Horisontell last från drivande is

Krafter från stora drivande isfält och istäcken uppskattas enligt evation 3.

$$H_d = k_1 k_2 k_3 k_4 h D \sigma . \quad \dots 3$$

Här är k_1 en formfaktor för formen på fundamentet på lovartsidan,
 k_2 en kontaktfaktor för isens anliggning mot fundamentet,
 k_3 en faktor som varierar med kvoten mellan istjocklek och fundamentets diameter,
 k_4 en faktor för lutande fundament,

Islaster på vindkraftverk till havs

- h fastisens tjocklek i området,
- D fundamentets bredd vinkelrätt isens rörelseriktning och
- σ isens krosshållfasthet.

Diametern D

Vid koniska uppåtriktade fundament mäts diametern på nivån 1/3 från fastisens undersida. Vid nedåtriktade koner används diametern på nivån 1/3 från fastisens överyta.

Isens krosshållfasthet σ

Värdena på isens krosshållfasthet väljs enligt nedan². (Haapanen m fl. 1997 utom nedersta punkten som har tagits från Löfquist 1987)

- $\sigma = 3,0$ MPa för fastis som rör sig av vind och ström vid den kallaste tiden på året
- $= 2,5$ MPa för fastis som rör sig mycket långsamt t ex av termisk expansion eller krympning
- $= 1,5$ MPa för fastis på våren och vid temperaturer nära smältpunkten
- $= 1,0$ MPa för delvis försvagad, smältande is vid temperaturer nära smältpunkten och
- $= 0,5$ MPa för saltvattenis på svenska västkusten.

Formfaktorn k_1

Om fundamentet kan klyva istäcket i stället för att enbart krossa det vid kontaktpunkten ges formfaktorn nedanstående värden. Plogformad nos förutsätter att istäcketets rörelseriktning är väl känd.

- $k_1 = 1$ för rektanguär nos
- $= 0.9$ för rundad nos
- för plogformad nos enligt tabell

| Nosvinkel | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|-----|
| 2β (°) | 45 | 60 | 75 | 90 | 120 | 180 |
| $k_1 =$ | 0.54 | 0,59 | 0,64 | 0,69 | 0,77 | 1 |
| | | | | | | |



Figur 15 Definition av nosvinkeln β och lutningsvinkeln α .
(Efter Löfquist, 1987)

² De ovan angivna värdena stämmer överens med de kanadensiska bronormerna (1978), som anger en skala från 2,8 – 0,7 MPa, medan däremot de sovjetiska normerna (1976) ger en skala 1,47 – 0,44 MPa liksom Vägverket (1987) 1,4 – 0,7 MPa för älvar och Östersjön men 0,5 MPa för saltvattenis på svenska västkusten. De angivna värdena kan därför anses något väl tilltagna. Jämför dock det uppskattade istrycket på Björnklacken ovan.

Kontaktfaktorn k_2

Kontaktfaktorn tar hänsyn till att isen under kontinuerlig krossning inte är i kontakt med konstruktionen över hela den nominella anliggningsytan Dh utom då den vid begynnande rörelse är helt fastfrusen vid fundamentet.

- $k_2 = 0,5$ när istäcket rör sig kontinuerligt.
 - $= 1$ när istäcket är fastfruset vid fundamentet när isen börjar röra sig.
 - $= 1.5$ när det fastfrusna istäcket är lokalt förtjockat kring fundamentet.
- Alternativt kan i det sista fallet tjockleken h sättas till tjockleken på isen intill fundamentet i stället för till tjockleken på fastisen

Kvotfaktorn (Indentation or pier factor) k_3

Kvotfaktorn tar hänsyn till det tredimensionella spänningstillståndet i kontaktpunkten. Om pelaren är smal i förhållande till istäcket blir spänningstillståndet närmast tvådimensionellt.

$$k_3 = \sqrt{1 + 5h/D} \text{ och}$$

$$= 3.6 \text{ om } D/h < 0.5.$$

I den kanadensiska bronormen CAN3-S6-M78 (Se t ex Roads and Transportation Association of Canada, 1981) och Vägverkets Istryck mot bropelare (Löfqvist, 1987) anges i tabeller ungefär halva värdet på k_3 , men det förutsätts då att kontaktfaktorn $k_2 = 0.5$ är inkluderad i kvotfaktorn.

Faktor för lutande fundament k_4

k_4 är en faktor som tar hänsyn till lutande eller konisk form på lovartsidan av fundamentet. Lutningsvinkeln α är definierad i figur 15.

| | | | |
|----------------|--------|---------|---------|
| Lutningsvinkel | | | |
| α (°) | 0 - 15 | 15 - 30 | 30 - 45 |
| $k_4 =$ | 1 | 0,75 | 0,50 |

Observera att produkten k_1k_4 inte bör sättas lägre än 0,5.

Teoretiskt sett är det inte korrekt att sammanföra formfaktorn k_4 med de andra, eftersom isen vid lutande front bryts genom böjning kombinerad med krossning varvid andra omständigheter gäller. Med hänsyn till isgångens slumpmässiga karaktär och risken för att isen ändå skall glida upp eller ned och krossas mot de vertikala delarna på fundamentet torde ändå ekvation 3 ge en användbar approximation.³

³ T ex i den sovjetiska normen SNIP 11-57-75 anges för horisontell belastning vid koniska fundament:

$$H_b = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)k_5h^2\sigma_b. \quad \dots 4$$

där $k_5 = 1 + 0.05\frac{D}{h}$ och

σ_b = böjhållfastheten vilken där sätts till 2 MPa.

Se vidare Appendix D för modernare mer avancerade metoder för koniska fundament.

Dynamisk belastning

Vindkraftverken skall kontrolleras mot dynamiska effekter⁴.

Belastningen från rörlig is mot vertikala fundament skall därvid antas variera sinusformat enligt

$$H_{dynv} = H_d \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin(\omega_N t) \right) \quad \dots 5$$

där H_d är horisontallasten från rörlig is ovan t tiden och ω_N vindkraftverkets egenfrekvens.

Belastningen från rörlig is mot koniska fundament ($\alpha \geq 30^\circ$) skall därvid antas variera sinusformat enligt

$$H_{dynk} = H_d \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{f_b}{2\pi} t\right) \right) \quad \dots 6$$

där H_d är horisontallasten från rörlig is ovan t tiden och $f_b = U / 7h$ med isens aktuella drifhastighet U .

Stötblastning bör också kontrolleras med en transient last förslagsvis enligt

$$H(t) = \begin{cases} \frac{Ut}{D} H_d & \text{för } t \leq D/U \\ H_d & \text{för } t > D/U \end{cases} .$$

Tryck från packis (isvallar)

Om man bedömer att konsoliderade packisvallar kan pressa mot fundamenten, kan mycket stora krafter uppstå, eftersom isvallarna kan ha en mäktighet av sammanfrusna isfragment på två till tre meter. De lösa blocken ovanför och under den sammanfrusna delen ger dock inget bidrag till belastningen. Brottmoden bestäms antingen av att isen krossas enligt ekvation 3 eller att isvallen böjs i horisontalplanet till brott. Det torde inte vara aktuellt att placera vindkraftverk i sådana områden.

Vertikal kraft från fast istäcke

Den vertikalkraft som uppstår vid stigande vattenstånd, när ett istäcke är fastfruset vid ett fundament, orsakas av displacementskraften och beror av vattenståndshöjningen

⁴ Ekvation 6 och 7 bygger bl.a. på undersökningarna av Yue och Bi (2000), kommentar av Mättäenen (1999) och fältmätningar av Lennart Fransson i LOLEIF (Personlig kommunikation (2002)).

men begränsas av isens skjuvvidhäftningshållfasthet alternativt av att istäcket bryts ringformat kring fundamentet. Den lägsta av följande två belastningar är dimensionerande.

$$V_{\tau} = A\tau \quad \dots 7$$

där τ är skjuvvidhäftningshållfasthet och
 A kontaktytan. För cirkulärt vertikalt fundamen $A = \pi Dh$.

Skjuvvidhäftningshållfasthet τ kan sättas till 0,1 MPa mot plast, mot stål och 1 MPa för betong.

$$V_b = 0,6A\sqrt{\sigma_b \rho g \Delta z} \quad \dots 8$$

där A är kontaktytan,
 σ_b är böjhållfastheten,
 ρ vattnets densitet,
 g jordaccelerationen och
 Δz vattenståndshöjningen.

Böjhållfastheten σ_b sätts till 2 MPa i Östersjön och 1 MPa vid Sveriges västkust.

REFERENSER

- American Petroleum Institute: Recommended Practice for planning design and construction of fixed platforms, RP 2A
- Ashton, G. (Editor): *River and Lake Ice Engineering*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, 1986.
- Bergdahl, Lars: *Ice pressure against lighthouses*. Meddelande nr 59 Inst. för vattenbyggnad CTH, 1971
- Bergdahl, Lars: Two lighthouses damaged by ice. *IAHR Ice Symposium*. 1972, Leningrad.
- Bergdahl, Lars: *Physics of ice and snow as affects thermal pressure*. Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, 1977. Report Series A:1. Ph.D. thesis
- Bergdahl, Lars: *Thermal ice pressure in lake ice covers*. Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Report Series A:2, 1978. Ph.D. thesis.
- Bergdahl, Lars and Wernersson, Lars: Probabilities of thermal ice pressures in five Swedish lakes. *IAHR Symposium of Ice Problems*, Luleå, Aug. 7-9, 1978.
- Bergdahl, Lars: A theory on the elasticity of sea ice. The 7:th International Symposium on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Espoo, 1983.
- Bureau Veritas: *Evaluation of loads on offshore units and installations*, Recommended practice, Tentative Issue Dec. 1993
- Bureau Veritas: *Detail design of offshore unit steel structures*, Recommended practice, Tentative Issue Dec. 1993
- Det norske Veritas: Environmental conditions and environmental loads, Classification notes, No. 30.5, March 1991
- Department of Energy, HMSO, Offshore Installations: Guidance on design, construction and certification, 4th edition, 1990
- Engelbrektsson, A.: ”Istryck mot utsjöfyrrar”, *Symposium kring isfrågor*, IVA Medd. 190, 1975.
- Engelbrektsson, A.: *Evaluation of Extreme Ice Forces on a Lighthouse in the Bothnian Bay, A study of the Björnklack event in April 1985*, VBB Sjöfartsverket Luleå tekniska universitet, 1987-01-15
- Fransson, Lennart: *Thermal Ice Pressure on Structures in Ice Covers*, PhD Thesis 1988:67D, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology

- Fransson, L. och Danielsson, G.: *Ice conditions and ice properties close to the lightpier Björnklacken shortly after failure due to forces from a moving ice sheet*. Avdelningen för konstruktions teknik, Luleå tekniska universitet, Skrift 85:13, 1985
- Germanischer Lloyd: *Regulations for the Certification of Offshore Wind Energy Conversion Systems*, Hamburg, 1995
- Haapanen, E., Määttänen, M. & Koskinen, P.: *Offshore Wind turbine Foundations in Ice Infested Waters, Proceedings of OWEMES'97 conference, 10-13 April 1997, Sardinia Italy*.
- Hardell, R.: *Sjöbaserade vindkraftverk*, SIKOB, Resultatrapport Nov. 1978
- Kühn, M.: *Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy conversion Systems*, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, June, 2001.
- Kärnä, T., Kamesaki, K. and Tsukuda, H.: *A numerical model for dynamic ice-structure interaction, Computers and Structures*, Vol. 72, 645-658, Aug 1999.
- Lundquist, J-E. och Gullne, U.: *Sammanfattning av isvintern och isbrytarverksamheten 2000/2001*, Sjöfartsverket och SMHI
- Löfqvist, Bertil: *Istryck mot bropelare*, Rapport 1987:43, Vägverket, (Kan laddas ned från Vägverkets hemsida)
- Matthies, H.G. et al.: *Study of Offshore Wind Energy in the EC*, Verlag Natürliche Energie, Brekendorf, 1995.
- Määttänen, 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 1994
- Määttänen, M.: *Moving ice and offshore wind turbines. 15th POAC*, 1999, Helsingfors.
- Norges Skipsforskningsinstitutt, *Marine structures and ships in ice, a joint Norwegian research project*, Ship Research Institute of Norway, Information Department, 1979
Report 79-02: *Ice loads on marine structures*
Report 79-03: *A survey of the mechanical properties of sea ice*
- Oljedirektoratet: *Regelverksamling for petroleumvirksomheten*, Oslo 1.1.94, Bind 2; sid. 659 – 684, *Veiledning om laster og lastvirkninger til forskrift om bærende konstruksjoner i petroleumvirksomheten, utgitt av Oljedirektoratet 7.2.1992*.
- Roads and Transportation Association of Canada, *Ice Effects on Bridges*, Ottawa 1981.
- Sjöfartsverket: *Svensk Lots Del A*, Norrköping 1992.

Sjöfartsverkets hemsida, 2002.

<http://www.sjofartsverket.se/navigering/htm/frameset.htm>

SMHI och Havsforskningsinstitutet: *Climatologic Ice Atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern (1963-1979)*, 1982

Styrelsen för vintersjöfartsforskning Nr 11, 1974: Bottenvikens stålfyrar – Hålfasthetsanalys och förbättringsförslag, Sjöfartsverket, Sverige, och Sjöfartsstyrelsen, Finland,

Timco, G.W., Nwogu, O.G. and Christensen, N.T.: Compliant model tests with the Great Belt West Bridge piers in ice. Part I. Test methods and key results, *Cold Regions Science and Technology*, Vol 23, Issue 2, February 1995, pp149-164

Timco, G.W., Nwogu, O.G. and Christensen, N.T.: Compliant model tests with the Great Belt West Bridge piers in ice. Part II. Analyses of results, *Cold Regions Science and Technology*, Vol 23, Issue 2, February 1995, pp165-182

Thor, S-E.: Litteraturgenomgång – Islaster på fundament till vindkraftverk, FFA V-092, Flygtekniska försöksanstalten, 2000

Vattenbyggnadsbyrån: Rapport 76-05-06 beträffande uppskattade islaster på fyrarna, Fiskarstenarna, Vretbodaklack, Sjöboda och Jungfrugrund, 27847-000 Mälarfyrar.

Wang, Y-S.: Buckling of a half ice sheet against a cylinder, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, EM5, 1978, pp 1131- 1145

Westring, Gustaf: Isförhållanden i svenska farvatten under normalperioden 1961-1990, *SMHI Oceanografi*, Nr 59, 1993.

Yue, Q., & Bi, X.: Ice-Induced Jacket Structure Vibrations in Bohai Sea, *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 14, No. 2, June 2000, ASCE.