

PÅLKOMMISSIONEN
Teknisk PM 1:2020

Islaster mot pålar

Utförd av

Henrik Mayor

Anders Sagemo

Per-Olof Johansson

Sammanfattning

Byggnadsverk i närheten av eller i öppet vatten är ofta grundlagda med pålar som delvis är exponerade för fritt vatten. I klimat med risk för isbildning utsätts dessa pålar för last från isen. I de europeiska dimensioneringsnormerna, Eurokod, är islast väldigt knapphändigt hanterat. Då vägledning saknas i Eurokod får information sökas på annat håll i t.ex. rapporter, handböcker eller särskilda kravdokument.

Detta PM ämnar att utreda hur islast på enskilda pålar hanteras i designarbete nationellt och internationellt. Syftet med arbetet är att klargöra problematiken med att bestämma islast mot pålar och framhäva potentiella beräkningsmetoder för fortsatta studier.

I rapporten studeras åtta riktlinjer från olika länder som alla behandlar islast. Metoderna i riktlinjerna liknar i vissa fall varandra dock visar jämförelseberäkningar att olika stora lastvärden erhålls för samma dimensioneringssituation. Variationen i lastvärden är bl.a. kopplad till stora variationer avseende isens hållfasthet. Last från drivande is behandlas i samtliga riktlinjer däremot skiljer det sig om eller när last från fast istäcke, t.ex. termiskt istryck, ska beaktas. I samtliga riktlinjer saknas erforderlig vägledning för att bestämma islastens storlek. Främst saknas vägledning avseende val av ishållfasthet vilket gör det svårt att likställa riktlinjerna vid en gemensam dimensioneringssituation. Detta medför också att olika lastvärden kan erhållas från samma riktlinje om olika personer tillämpar riktlinjerna.

En nationell riktlinje specifikt för islast mot pålar är nödvändig. En särskild grupp av personer med teoretisk och praktisk erfarenhet från isens verkningssätt föreslås arbeta fram denna riktlinje. I en sådan grupp bör finnas representanter för konstruktörer som ska tillämpa dessa regler. Under rådande situation med avsaknad av tydliga riktlinjer bör beställaren specificera islastens storlek i anbud för att undvika ojämn konkurrens.

Det fortsatta arbetet bör omfatta en beskrivning av tillvägagångssättet för att komma fram till de yttre förutsättningarna som påverkar isens struktur, hållfasthet, varaktighet och inverkan på pålar. Följande punkter avseende islast mot pålar behöver besvaras innan riktlinjer kan tas fram:

- Vilka isförhållanden gäller för merparten av pålarna?
- Vilka typer av islast är aktuella för pålar?
- Vad är effekten av pålarnas eftergivlighet på islastens storlek?
- Hur ska isens hållfasthet och tjocklek bestämmas med hänsyn till lokala variationer?

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Förord

Denna rapport är framtagen av en arbetsgrupp bestående av:

- Per-Olof Johansson (ELU)
- Henrik Mayor (COWI)
- Anders Sagemo (Ramboll)

Arbetet har kommenterats av en referensgrupp bestående av:

- Fredrik Carlsson, Trafikverket
- Lennart Fransson, Luleå tekniska högskola
- Magnus Harrysson, Port Engineering
- Ali Reza Mohammad Zadeh, Göteborgs Hamn
- Petter Eriksson, Stockholms Hamnar
- Lars Wikström, Piteå Hamn

Tara Wood (Ramboll) har varit uppdragsledare hos Pålkommisionen för detta arbete.

Ett tack till Peter Alheid (Hercules och Pålkommisionen) som bidragit med värdefulla synpunkter samt till Leif Jendeby (COWI) och Henrik Wall (Henrik Wall Marine Engineering) som hjälpt till att initiera detta projekt.

Detta projekt har finansierats av Pålkommisionen, COWIfonden och COWI AB Division Samhällsbyggnad. COWIfonden är en dansk fond som årligen donerar pengar till forsknings- och utvecklingsprojekt med syfte att utveckla samhällsbyggnadsbranschen.

Innehållsförteckning

1	INTRODUKTION	10
1.1	Bakgrund	10
1.2	Syfte och mål	10
1.3	Islastens verkningssätt	11
1.4	Andra studier	13
2	RIKTLINJER FÖR ISLASTER	14
2.1	Riktlinjer i Sverige	14
2.1.1	Krav Brobyggande	14
2.1.2	Teknisk Handbok Stockholms Hamnar	15
2.1.3	RIDAS	16
2.1.4	Andra riktlinjer i Sverige	16
2.2	Riktlinjer utanför Sverige	16
3	TILLVÄGAGÅNGSSÄTT FÖR ATT BESTÄMMA ISLAST	18
3.1	Bronorm Sverige: Istryck mot bropelare	18
3.1.1	Horisontell islast	19
3.1.2	Vertikal islast	22
3.2	Bronorm Norge: Håndbok N400 Bruprosjektering	23
3.2.1	Horisontell islast	23
3.2.2	Vertikal islast	25
3.3	Norm Danmark: Tillaeg DK:2015 Islast	25
3.3.1	Horisontell islast	26
3.3.2	Vertikal islast	27
3.4	Handbok Norge: Port Designer's Handbook	27
3.4.1	Horisontell islast	28
3.4.2	Vertikal islast	29
3.5	Bronorm Kanada: CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code	30
3.5.1	Horisontell islast	31
3.5.2	Vertikal islast	33
3.6	Bronorm USA: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	33
3.6.1	Horisontell islast	33
3.6.2	Vertikal islast	34
3.7	Handbok USA: Coastal Engineering Manual	35
3.7.1	Horisontell islast	35
3.7.2	Vertikal islast	36
3.8	Handbok Tyskland: Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012	37
3.8.1	Horisontell islast	38
3.8.2	Vertikal islast	40

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

4	BAKGRUND BERÄKNINGSMETODIK	41
4.1	Horisontell islast	41
4.1.1	Drivande is	41
4.1.2	Termiskt istryck	49
4.1.3	Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar	50
4.1.4	Tryck från stort istäcke genom ström och vind	51
4.1.5	Tryck från packis	51
4.2	Vertikal islast	52
4.3	Isens tjocklek	55
4.4	Isens hållfasthet	56
5	JÄMFÖRELSE RIKTLINJER OCH METODER	58
5.1	Jämförelse riktlinjer – beräkning 1	58
5.1.1	Tillvägagångssätt, antaganden och resultat	58
5.1.2	Sammanställning resultat	61
5.2	Jämförelse riktlinjer – beräkning 2	63
5.2.1	Tillvägagångssätt, antaganden och resultat	64
5.2.2	Sammanställning resultat	66
5.3	Jämförelse metoder	67
5.3.1	Krossning respektive klyvning	68
6	SKADOR PÅ PÅLAR ORSAKAD AV IS	70
7	DISKUSSION	71
7.1	Utförda beräkningar	71
7.2	Isens faktiska påverkan på pålar	71
7.3	Tillämpbarhet riktlinjer	71
7.3.1	Tillämpbarhet Istryck mot bropelare	72
7.4	Isförhållanden	73
7.5	Krossning respektive klyvning	73
7.6	Last från fast istäcke	74
7.7	Isens tryckhållfasthet och tjocklek	74
7.8	Inverkan av eftergivlighet	76
7.9	Vertikal islast	77
7.10	Rekommendationer för fortsatt arbete	77
8	REFERENSER	79

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

BILAGA A – Jämförelse riktlinjer, beräkning 1	A1-A7
BILAGA B – Jämförelse riktlinjer, beräkning 2	B1-B5
BILAGA C – Jämförelse metoder	C1-C4
BILAGA D – Kommentarer till Istryck mot bropelare vid tillämpning för pålar	D1-D2

Teckenförklaring

Latinska bokstäver

A	Faktor kopplad till isens böjhållfasthet vid bestämning av vertikal islast (kPa).
A_i	Istäckets horisontella area (m ²).
a	Längd skivstöd (m).
a_b	Sträckan för den avskurna iskilen enligt Nevel (1972) (m).
B	Det drivande istäckets bredd (m).
b	Bredd pelare/påle alternativt diameter pelare/påle (m).
C_R	Hållfasthetskoefficient (kPa).
c_1	Formfaktor för förhållandet pelarbredd/istjocklek.
c_2	Formfaktor för spetsig framkant på pelare.
c_3	Formfaktor för lutande framkant på pelare.
c_n	Formfaktor vid brottmoden böjning.
c_{fb}	Formfaktor m.a.p. lutning.
c_{fs}	Formfaktor m.a.p. tvärsnittet.
c_{sf}	Ytfriktionskoefficient för is mot vind eller vatten.
d	Istjocklek (m).
d^*	Referensistjocklek (m).
E	Isens elasticitetsmodul (MPa).
F	Frostmängd (h°C)
f_g	Reduktionsfaktor vertikal islast vid närliggande konstruktioner.
g	Gravitationskonstanten (m/s ²).
HHW	Högsta högvattenstånd (högsta av årens högsta vattenstånd).
I_h	Horisontell islast mot pelare/påle (kN).
$I_{h,1}$	Horisontell islast mot pelare/påle vinkelrätt med strömriktningen (kN).
$I_{h,2}$	Horisontell islast mot pelare/påle parallellt med strömriktningen (kN).
$I_{h,k}$	Horisontell islast mot pelare/påle specifikt kopplad till brottmoden krossning (kN).
$I_{h,b}$	Horisontell islast mot pelare/påle specifikt kopplad till brottmoden böjning (kN).
$I_{h,bk}$	Horisontell islast mot pelare/påle specifikt kopplad till en kombination av brottmoderna böjning och krossning (kN).
I_v	Vertikal islast mot pelare/påle (kN).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

i_1	Istryck mot pelare/påle vinkelrätt med strömriktningen (kN/m).
i_2	Istryck mot pelare/påle parallellt med strömriktningen (kN/m).
i_v	Maximal lyftkraft per meter vid lång rak vägg (kN/m).
K_v	Faktor kopplad till koncentrerad last på is.
k	Upptrycksmodul från vatten (kN/m ³).
k_1	Formfaktor för tvärsnittets form i vattenlinjen.
k_2	Kontaktfaktor för kontakt mellan is och konstruktion.
k_3	Dimensionsfaktor för tredimensionellt spänningsförhållande.
k_4	Kontaktfaktor för kontakt mellan is och konstruktion.
k_5	Reduktionsfaktor för mindre vattendrag.
k_6	Kontaktfaktor för kontakt mellan is och konstruktion.
$K^{Adfreeze}$	Koefficient för fastfrysning av is mot konstruktion.
L, L_1, L_2	Pelarakavstånd (m).
LLW	Lägsta lågvattenstånd (lägsta av årens lägsta vattenstånd).
l_c	Karakteristisk längd för istäcke (m).
$l_{c,b}$	Karakteristisk längd m.a.p. böjning (m).
l_p	Tvärsnittets perimeter för en avlång bropelare (exklusive cirkelformade ändar) (m).
MHW	Medelhögvattenstånd (medel av årens högsta vattenstånd).
MW	Medelvattenstånd.
MLW	Medellågvattenstånd (medel av årens lägsta vattenstånd).
m	Empirisk faktor.
n	Empirisk faktor.
r	Radien av en cirkel/pelarnosens radie (m).
r_x	Halva avståndet till närliggande konstruktion (m).
S_B	Isens salinitet (‰).
T	Karakteristiskt värde för lägsta dygnsmedeltemperatur med en returperiod på 50 år (°C).
t_e	Isens medeltemperatur (°C).
t_L	Negativ daglig medeltemperatur (°C).
u	Hastigheten för vind, 10 m ovan isen, eller hastigheten för strömmande vatten, 1 m under isen (m/s).
u_i	Isens drivhastighet (m/s).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Grekiska bokstäver

α	Vinkel spetsig framkant (°)
β	Vinkel lutande framkant (°)
Δh	Vattenståndshöjning (m).
δ	Vinkeln på en avskuren kil m.a.o. där isen är i kontakt med konstruktionen enligt Nevel (1972) (°).
$\dot{\epsilon}$	Isens töjningshastighet (s^{-1}).
ρ	Densitet (kg/m^3).
ρ_G	Globalt istryck (kPa).
τ	Isens skjuvhållfasthet (MPa).
τ_a	Skjuvstyrkan mellan material och is (kPa).
σ_b	Isens böjhållfasthet (kPa).
σ_k	Isens tryckhållfasthet (kPa).
σ_t	Isens draghållfasthet (kPa).
ϕ_B	Isens porositet (‰).
χ	Bredd på isflak (m).

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Byggnadsverk i närheten av eller i öppet vatten är ofta grundlagda med pålar som delvis är exponerade för fritt vatten. Exempelvis kan nämnas påldäckskajer, fasta bryggor, dykdalber, ledverk, förankringar till flytbryggor, bottenförankrade farledsmarkeringar samt broar grundlagda med pålar utan mellanstöd mellan pålar och överbyggnad. I klimat med risk för isbildning utsätts dessa pålar för last från isen.

Islast verkar både horisontellt och vertikalt vilket leder till transversalbelastning samt drag eller tryck i pålen. Under byggnation kan problem uppstå med pålar som på grund av isbildning förskjuts ur sitt planerade läge i plan. Dessutom orsakar islast nötning på pålar, vilket kan generera midjebildning för betongpålar.

I de europeiska dimensioneringsnormerna, Eurokod, är islast väldigt knapphändigt hanterat. I *SS-EN 1991-1-6, kap 4.9 (6)* kan läsas att "Last orsakad av is, inklusive drivis, bör beaktas". Inga ytterligare rekommendationer ges utöver att lasten kan beräknas som utbredd i strömriktningen samt att laster och vattendjup kan hittas i den nationella bilagan. I de svenska tillämpningsdokumenten *EKS 11* (Boverket, 2019) och *TSFS 2018:57* (Transportstyrelsen, 2018) finns ingen ytterligare information om islast. Då vägledning saknas i Eurokod får information sökas på annat håll. Enskilda beställare kan ha egna krav, olika länder kan ha egna branschstandarder och olika handböcker används där islast hanteras. Exempelvis har istryck mot brokonstruktioner sedan 1987 bedömts och beräknats enligt Vägverkets publikation *Istryck mot bropelare* skriven av docent Bertil Löfquist. Istryck direkt mot pålar har dock inte erhållit någon särskild uppmärksamhet i publikationen.

Ett resultat av detta är att konstruktioner innehållande pålar i fritt vatten dimensioneras för vitt skilda laster från is beroende på hur ansvarig konstruktör väljer att bestämma storleken på islasten. Osäkerhet föreligger då gällande både erforderlig lastkapacitet samt kostnad för pålgrundläggningen då olika dimensioner på pålar erhålls.

1.2 Syfte och mål

Detta PM ämnar att utreda hur islast på enskilda pålar hanteras i designarbete nationellt och internationellt. Syftet med arbetet är att klargöra problematiken med att bestämma islast mot pålar och framhäva potentiella beräkningsmetoder för fortsatta studier. Målet är att fortsatta studier ska leda till en branschstandard för islast mot pålar.

Studien ger en överblick över hur islast hanteras internationellt, där bland annat grannländerna Norge och Danmark men även Tyskland samt USA och Kanada inkluderas. Två typfall av pålade konstruktioner beskrivs där islast beräknas med de olika presenterade metoderna för att illustrera variationen i resulterande last.

Under arbetet har frågor skickats till Stockholms Hamnar, Göteborgs Hamn samt Piteå Hamn för att undersöka praktisk erfarenhet av islast mot pålar. Svaren används för att tydliggöra även den praktiska problematiken med islast och inte enbart den dimensioneringstekniska.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Under arbetet konsulteras Lennart Fransson, tidigare verksam vid universitetet i Luleå. Lennart har en lång bakgrund som sakkunnig gällande isens egenskaper och anlitas regelbundet av SMHI gällande dessa frågor.

1.3 Islastens verkningsätt

Islastens storlek begränsas av antingen isens brottlast, de pådrivande krafterna mot isen, isens kinetiska energi eller friktions- och adhesionskrafter mellan is och konstruktion (Burcharth, 2004). Vanligtvis betraktas isens brottlast vara den som är den maximala lasten mot en konstruktion, s.k. "limit stress scenario". Brottlasten motsvarar en högre last än om t.ex. lasten begränsas av isens kinetiska energi (Thoresen, 2014).

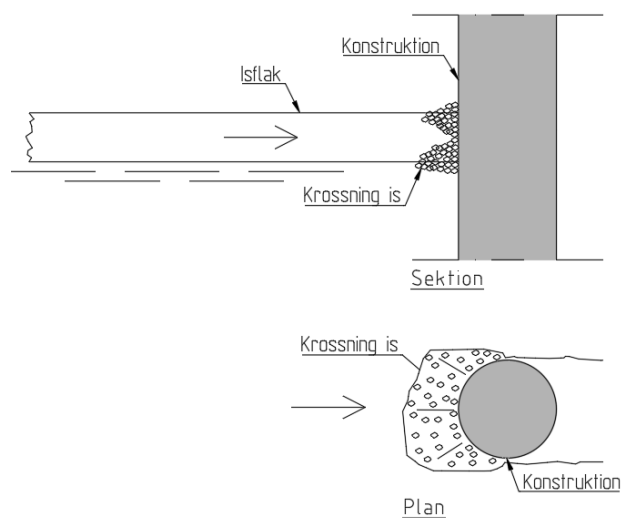
Faktorer som driver på isen och får den att röra sig eller pressas mot en konstruktion kan bl.a. vara:

- Vind.
- Ström.
- Vågor.
- Temperaturändringar.
- Isbrytare/fartyg.

Typ av brottmod hos isen beror bl.a. på isens hållfasthets- och deformationsegenskaper, isens geometri och randvillkor samt av konstruktionens geometri och yta. De viktigaste brottmoderna för is vid interaktion med konstruktioner är (Burcharth, 2004):

- Krossning
- Böjbrott
- Klyvning/spjälkning

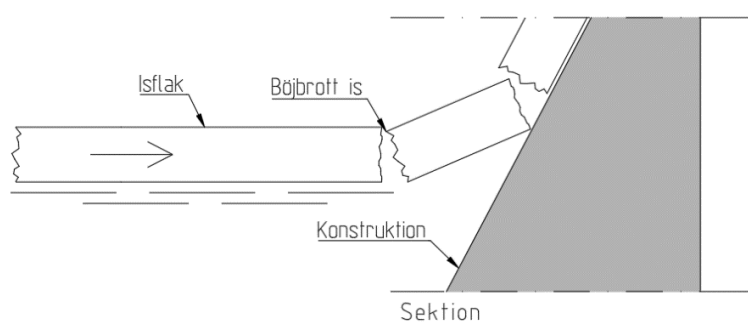
Krossning kan typiskt uppkomma då isflak pressas mot en konstruktion med lodrät front. Böjbrott uppkommer främst mot konstruktioner med en lutande front medan klyvning kan förekomma mot smala konstruktioner. De tre olika nämnda brottmoderna visas i figurerna nedan.



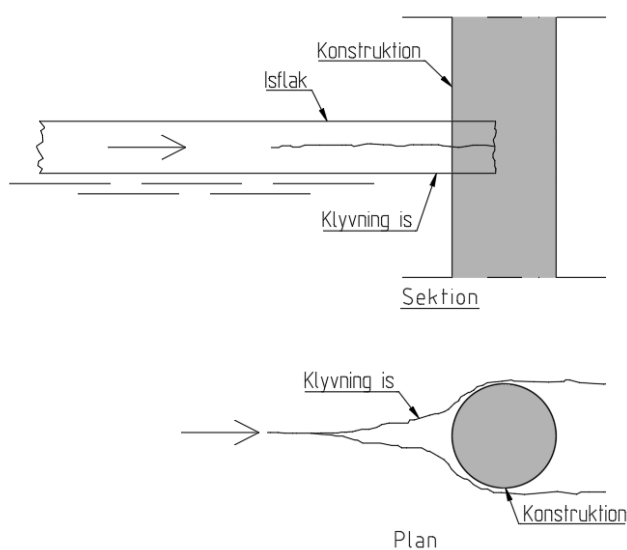
Figur 1. Illustration av krossning is mot konstruktion.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 2. Illustration av böjbrott is mot konstruktion.



Figur 3. Illustration av klyvning is mot konstruktion.

Isens tryckhållfasthet är betydligt högre än dess böjhållfasthet, således blir lasten mot en konstruktion lägre om isen kan gå till böjbrott istället för att krossas (Löset, et al., 2006). Isens hållfasthets- och deformationsegenskaper är starkt beroende av töjningshastigheten, därför har isens drivhastighet i förhållande till konstruktionen betydelse (Burcharth, 2004).

Ibland benämns islasten vara av statisk respektive dynamisk karaktär. Med statisk islast avses en last som förändras långsamt med tiden, t.ex. orsakad av termisk utvidgning. Med dynamisk islast avses en last som kan verka under en kort tidsperiod eller variera under ett tidsspann, t.ex. då drivande is pressas mot en konstruktion.

Isen får olika egenskaper om det är en ettårig is, flerårig is eller glaciär is. I denna rapport behandlas enbart ettårig is. Flerårig is uppträder huvudsakligen i arktiska områden.

I litteratur används både uttrycken isens tryckhållfasthet och isens krosshållfasthet likaså isens böjhållfasthet och isens böjdraghållfasthet. Tryckhållfasthet och krosshållfasthet förutsätts i denna rapport vara samma sak likaså böjhållfasthet och böjdraghållfasthet. Enbart uttrycken tryckhållfasthet och böjhållfasthet används vidare i rapporten.

1.4 Andra studier

I en artikel från 2001 av Määttänen framgår det att det har funnits planer på att ta fram en europeisk norm för islaster som även skulle innefatta marina konstruktioner. Denna standard skulle baseras på resultatet från det EU-finansierade projektet STRICE. Projektet har bl.a. gett upphov till is-avsnittet i *ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures*. Hur arbetet gått med en europeisk isstandard inkluderande marina konstruktioner är dock ej känt.

I en studie av Frederking (2012) jämförs olika riktlinjer för islast med syfte att ta reda på vilken som är mest tillämpbar för hamnkonstruktioner. Studien beaktar istjocklekar mellan 0,2-2 m och konstruktioner med diametern 1 m, 4 m respektive 50 m. Diametern 1 m ska motsvara t.ex. en pålad konstruktion. De riktlinjer som jämförs är:

- *CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code*
- *ISO 19906 Arctic offshore structures*
- *CSA-S471-04*
- *API (American Petroleum Institute) RP 2N*
- *SNiP 2.06.04-82* Loads and effects on hydrotechnical structures.*

CSA-S6-06 är den kanadensiska bronormen, utgiven 2006. *ISO 19906 Arctic offshore structures* är en internationell standard för offshore-konstruktioner medan *CSA-S471-04* och *API RP 2N* är två nordamerikanska riktlinjer för offshore-konstruktioner. *SNiP* är en rysk standard för islast.

Av dessa riktlinjer rekommenderar Frederking (2012) att *CSA-S6-06* används för pålar med diametern 1 m. Han menar att *ISO 19906*, *CSA-S471-04* och *API RP 2N* ej är tillämpbara för denna typ av konstruktion. *SNiP* genererar väsentligt högre värden jämfört med de andra riktlinjerna, speciellt för tunnare is.

En utförlig litteraturstudie över islaster finns publicerat i *Elforsk Rapport 02:03 – Islaster mot hydrauliska konstruktioner* av Ekström (2002). Denna riktar sig dock mot dammkonstruktioner.

2 Riktlinjer för islaster

I detta kapitel presenteras svenska och internationella skrifter som behandlar islast.

2.1 Riktlinjer i Sverige

Istället för lastangivelse i Eurokod kan islast behandlas i kravdokument eller tekniska handböcker som kan åberopas av enskilda beställare. Nedan följer ett antal exempel på väl kända svenska kravdokument och handböcker som behandlar islast mot konstruktioner:

- *Krav Brobyggande (TDOK 2016:0204)* med tillhörande *Råd Brobyggande (TDOK 2016:0203)* – tillämpas för projektering av broar och andra byggnadsverk åt Trafikverket. Åberopas ibland av kommuner och andra beställare.
- *Teknisk Handbok Projektering hamnkonstruktioner*. Stockholms Hamnar – tillämpas vid projektering där Stockholms Hamnar är beställare. Åberopas ibland av kommuner.
- *RIDAS, Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*. Svensk Energi – används vid projektering av dammkonstruktioner.

Det förekommer även att handböcker som t.ex. *Port Designer's Handbook* och *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012* anges som krav i projekt beställda av svenska hamnar.

2.1.1 Krav Brobyggande

Istryck behandlas under avsnitt B.3.2.7.2. Skriften anger uttryckligen att ett brostöd i vatten ska dimensioneras för istryck. Det klargörs även att istrycket ska angripa på en vattennivå mellan MHW och MLW samt att istrycket kan angripa i stödets längd- och tvärriktning. Dock behöver inte istrycket ansättas samtidigt i dessa riktningar.

Det anges att istryckets storlek ska utredas men att istrycket minst ska representeras av en kraft av 200 kN i respektive riktning.

Under avsnitt B.2.3.2 anges ψ -faktorer för istryck som ska användas vid lastkombineringen. Följande ψ -faktorer anges:

- $\psi_0=0,4$
- $\psi_1=0,4$
- $\psi_2=0$

Under avsnitt B.4.2 anges även att istryck ska beaktas vid tillfälliga dimensioneringssituationer. Här hänvisas till B.3.2.7 för istryckens storlek.

I *Bilaga 2 Objektspecifika byggherreval* anges med hänvisning till B.3.2.7.2 att byggherren kan ange större istryck samt att byggherren kan ange regler för fördelningen av istrycket på delarna i ett uppdelat stöd.

I den rådande texten (*Råd Brobyggande*) till avsnitt B.3.2.7.2 anges att minimumvärdena på 200 kN kan användas om:

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- Isen i broläget inte förväntas vara tjock.
- Istäcket inte påverkas av strömmande vatten och drivande is inte förekommer.

I övriga fall ska istryckets storlek utredas med hänsyn till lokala förhållanden och konstruktionens utformning. *Råd Brobyggande* anger sedan att vägledning för att bestämma istryckets storlek ges i *Istryck mot bropelare* (Löfquist, 1987).

Under avsnitt B.4.2 ges också rådet att inverkan av istryck kan vara väsentligt i byggskedet, t.ex. då ett stöd står utan överbyggnad. I ett sådant scenario kan stödet förskjutas ur dess planerade läge.

Trafikverkets sätt att hantera islasten i form av minsta värden på 200 kN och med uppmaning till ytterligare utredning med hänvisning till *Istryck mot bropelare* har varit densamma en längre tid. I princip identisk kravställande och rådgivande text finns i de äldre bronormerna:

- TRVK Bro och TRVR Bro (2011); avsnitt B.3.2.7.2.
- TK Bro och TR Bro (2009); avsnitt B.3.4.7.2.
- Bro 2004; avsnitt 21.282
- Bro 94; avsnitt 21.282

I Bronorm 88 anges inte minsta värden om 200 kN men läsaren hänvisas till *Istryck mot bropelare* för att bestämma dimensionerande istryck. I Bronorm 1976 anges inte hur islasten ska bestämmas däremot anges specifika utformningskrav för mellanstöd i vatten som bl.a. ska beakta isgång.

De krav som omnämns i *Krav Brobyggande*, att istrycket ska antas verka på nivåer mellan MHW och MLW samt att trycket i längd- respektive tvärriktning ej behöver kombineras framgår även i den betydligt äldre svenska bestämmelsen *SOU 1961:12 Statliga belastningsbestämmelser av år 1960 för byggnadsverk*.

2.1.2 Teknisk Handbok Stockholms Hamnar

Teknisk Handbok Projektering hamnkonstruktioner är framtagen av Stockholms Hamnar. Den har både syftet att användas vid projekteringen när Stockholms Hamnar är beställare samt utgöra en kunskapsbas för hamnkonstruktioner.

Istryck behandlas i avsnitt 2.3.6.7 i *Teknisk Handbok Projektering hamnkonstruktioner*. Här anges att islasten kan verka i godtyckligt läge mellan vattennivåerna MHW och MLW. Handboken anger att istrycket ska utredas från fall till fall utifrån lokala förhållanden men karakteristiska värden anges som riktvärden. För kajer och pir som grundläggs med pålar, pelare eller skivor i vatten ska varje stöd (påle, pelare eller skiva) dimensioneras för:

- Horisontellt i riktning mot kaj: 200 kN/m.
- Horisontellt parallellt med kaj: 100 kN/m.
- Vertikal lyftande kraft: 20 kN/m.

Islast i olika riktningar ska inte kombineras med varandra och ψ -faktorer bestäms enligt TRVK Bro B.2.3.2. Dessa värden är desamma som anges i *Krav Brobyggande*, se kap. 2.1.1.

Under avsnitt 1.3.4 finns en förteckning över bra litteratur i form av andra handböcker, rapporter samt utländska och äldre regelverk. Notera att här omnämns *Port Designer's*

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Handbook (Thoresen, 2014), se kap. 3.4, och *Islaster på vindkraftverk tillhavs* (Bergdahl, 2002). Rekommendationerna i Bergdahls rapport från 2002 uppdaterades i den senare rapporten *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* (Fransson & Bergdahl, 2009).

Notera att i den äldre svenska lastbestämmelsen *SOU 1961:12 Statliga belastningsbestämmelser av år 1960 för byggnadsverk* framgår att storleken av istrycket från ett fast istäcke i allmänhet kan uppskattas till 10-20 ton/m påverkad konstruktion. Dessa värden är jämförbara med de som anges i den tekniska handboken från Stockholms Hamnar.

2.1.3 RIDAS

RIDAS är kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Riktlinjerna publiceras av Svensk Energi och används vid projektering av dammkonstruktioner i Sverige. I tillämpningsdokumentet för betongdammar behandlas islast mot dessa konstruktioner.

RIDAS (2011) anger att horisontellt istryck antas med intensiteten 50-200 kN/m dammlängd beroende på geografiskt läge, höjd över havet samt lokala förhållanden vid dammen. Avseende geografiskt läge anges följande vägledning:

- 50 kN/m – södra Sverige (Skåne, Blekinge, Halland, Bohuslän och Västergötland).
- 100 kN/m – Mellansverige (norr om ovan angivna plaster upp till en linje genom Stockholm och Karlstad).
- 200 kN/m – övriga Sverige.

Islasten angriper vid en tredjedel av isens tjocklek räknat från isens överkant. Nivån för isens överkant sätts till dämmningsgränsen. Istjockleken ansätts till 0,6 m upp till vad som ovan benämns Mellansverige. Norr om denna linje ansätts istjockleken till 1 m.

2.1.4 Andra riktlinjer i Sverige

Andra riktlinjer kan förekomma i Sverige. T.ex. finns ett avsnitt om islast i *Riktlinjer för Trafikbryggor i skärdgården* från Waxholmsbolaget (2012).

Riktlinjer för hur bryggor i småbåtshamnar kan utformas m.a.p. islast ges i handboken *Hamnar för fritidsbåtar* (Svenska Båtunionen 2015). I handboken anges att det kan vara fördelaktigt att avsluta pålarna 0,3 m ovan bryggdäck så att dessa lätt kan slås ned igen om de lyfts av is. Här anges även hur system med luftinblåsning och strömbildning kan utformas för att minska isbildning runt pålar.

2.2 Riktlinjer utanför Sverige

Islast behandlas ofta i länders egna bronormer. Några av dessa bronormer är:

- Norge - *Håndbok N400 Bruprosjektering*.
- USA - *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- Kanada - *CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code*.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I Danmark finns ett tillägg till Eurokod publicerat av Vejdirektoratet som behandlar islast; *Tillaeg DK:2015 Islast*. Denna gäller både för bropelare och pålar.

Ett utförligt avsnitt om islaster finns i den internationella standarden *ISO 19906:2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures*. Som namnet anger avses denna standard att tillämpas för offshore-konstruktioner i arktiska förhållanden.

Utöver bronormer och ovan nämnd ISO-standard finns flertalet handböcker som riktar sig mot marina konstruktioner. Nedan är tre handböcker för hamnprojektering som alla behandlar islast:

- *Coastal Engineering Manual* – U.S. Army Corps of Engineers (2002).
- *Port Designer's Handbook* – C.A. Thoresen (2014).
- *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012* - Committee for Waterfront Structures (2012).

Den sist nämnda handboken *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012* har utbredd användning i Tyskland.

3 Tillvägagångssätt för att bestämma islast

I detta kapitel redovisas tillvägagångssätt för hur islast bestäms i några av de normer och handböcker som presenterades i kap. 2. Tillvägagångssättet för islast från följande normer och handböcker redovisas i detta kapitel:

- *Istryck mot bropelare - Rapport nr. 1987:43*. Löfquist (1987)
- *Håndbok N400 Bruprosjektering*. Statens vegvesen (2015).
- *Tillaeg DK:2015 Islast*. Banedanmark & Vejdirektoratet (2015).
- *Port Designer's Handbook*. 3:e upplagen. C.A Thoresen (2016).
- *CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code*. Uppdatering 2. CSA Group (2017).
- *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 9:e upplagan. American Association of State Highway and Transportation Officials (2020).
- *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers (2002).
- *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012*. Committee for Waterfront Structures (2012)

Då *Istryck mot bropelare* används i Sverige för att bestämma islast mot pålar bedöms det intressant att studera även andra länders bronormer. De tre hamnböckerna för marina konstruktioner beskrivs som giltiga för pålar.

Notera att i denna rapport har tecken i formler ändrats från originalskrifterna för att ge en enhetlig presentation. Teckenförklaring på s. 7 gäller. Gällande den amerikanska skriften *AASHTO LRFD* har enheterna ändrats till SI-enheter i denna rapport.

Notera att i bronormerna avser benämningen "pelare" huvudsakligen skivstöd, m.a.o. har den avsedda pelaren olika bredd respektive längd.

3.1 Bronorm Sverige: Istryck mot bropelare

I första kapitlet av *Istryck mot bropelare* ges riktlinjer för hur islasten ska ansättas. I efterföljande kapitel ges en problemöversikt avseende islast.

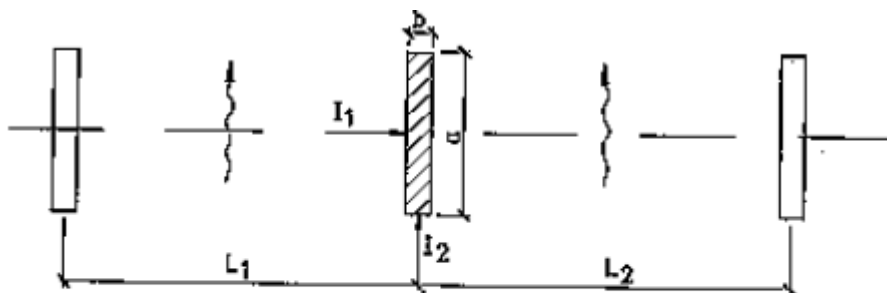
Islasten i *Istryck mot bropelare* är beskriven utifrån sex huvudtyper av påverkan från is. Fem av dessa avser horisontell påverkan och en av dessa avser vertikal påverkan. Dessa sex huvudtyper är följande:

- Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar (termiskt istryck).
- Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar.
- Dynamiskt tryck från drivande is.
- Tryck från stort istäcke genom ström och vind.
- Tryck från packis.
- Vertikala krafter från fast istäcke.

I övrigt gäller följande lastförutsättningar:

- Maximal islast vinkelrätt och parallellt brolinjen behöver ej antas verka samtidigt.
- Islasten kan verka i godtycklig punkt mellan MHW och MLW.

Istryck mot bropelare hänvisar till Figur 4 avseende geometri och lastriktning.



**Figur 1.1 Horisontalsektion genom bropelare.
Beteckningar.**

Figur 4. Figur som hänvisas till i Istryck mot bropelare. Bropelarens geometri definieras med parametrarna a och b . Pelarnas avstånd definieras med parametrarna L_1 och L_2 . Den horisontella islastens (I_1 och I_2) riktning och position, i förhållande strömriktning och pelarnas riktning framgår av figuren. Figur från Istryck mot bropelare.

3.1.1 Horisontell islast

Termiskt istryck

Termiskt istryck beräknas enligt:

$$I_{h.1} = i_1 * a \quad \text{Ekv. 1}$$

där

i_1 är ett istryck (kN/m).

a är bropelarens längd (m).

i_1 varierar normalt mellan 50-300 kN/m för sötvattenis. Något värde för istrycket i saltvatten är ej angivet, ej heller riktlinjer för hur val av i_1 ska utföras i sötvattenis med hänsyn till lokala förhållanden. I Istryck mot bropelare anges att om längden, a , är mindre än 4 m sätts $a = 4$ m.

Möjlighet ges att reducera islasten mot bakomliggande bropelare. En bakomliggande bropelare kan dimensioneras för $i_1/3$ (dock minst 50 kN/m) om ett högt värde på i_1 används.

Enligt Istryck mot bropelare blir ensidigt termiskt istryck störst för bropelare intill eller i närheten av en bruten isränna eller öppen strömfåra.

Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar

Denna islast uppkommer genom spännverkan eller valvverkan mellan bropelare. Islasten bestäms med samma ekvation som för termiskt istryck, Ekv.1. Istrycket i_1 sätts till max 200 kN/m. Islasten beskrivs uppträda ensidigt mot bropelare i ett eller flera fack.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Dynamiskt tryck från drivande is

Last från drivande is som är sönderbruten i mindre stycken kan uppskattas genom:

$$I_{h,2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2 \quad \text{Ekv. 2}$$

där

i_2 är istryck mot brolinje (kN/m) och varierar normalt mellan 10-30 kN/m.

L_1 och L_2 är pelaravstånd (m), se *Figur 4*.

Där stora drivande isflak kan förekomma uppskattas islasten alternativt genom:

$$I_{h,2} = c_1 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 3}$$

där

c_1 är en formfaktor för förhållandet pelarbredd/istjocklek. Se *Tabell 1*.

σ_k är isens tryckhållfasthet (kPa).

d är istjocklek (m).

b är pelarbredd (m).

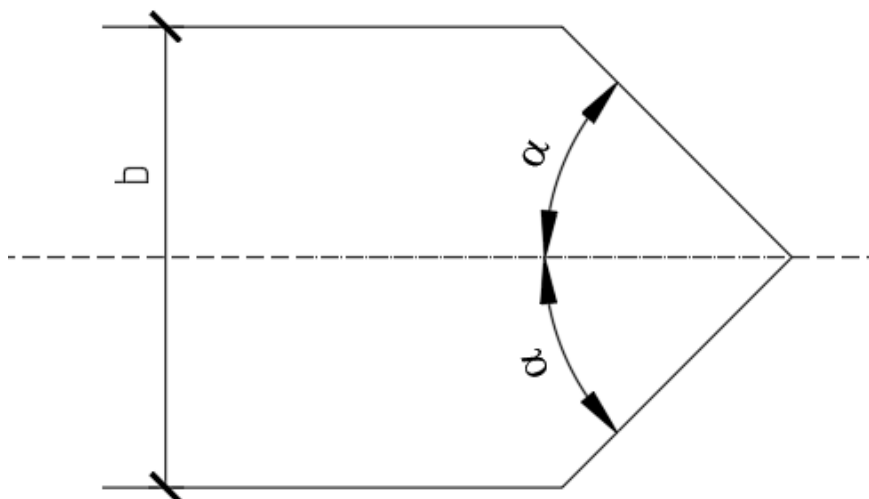
För bropelare med spetsig och/eller lutande framkant kan islasten uppskattas genom:

$$I_{h,2} = c_1 * c_2 * c_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 4}$$

där

c_2 är en formfaktor för spetsig framkant. Se *Figur 5* och *Tabell 2*.

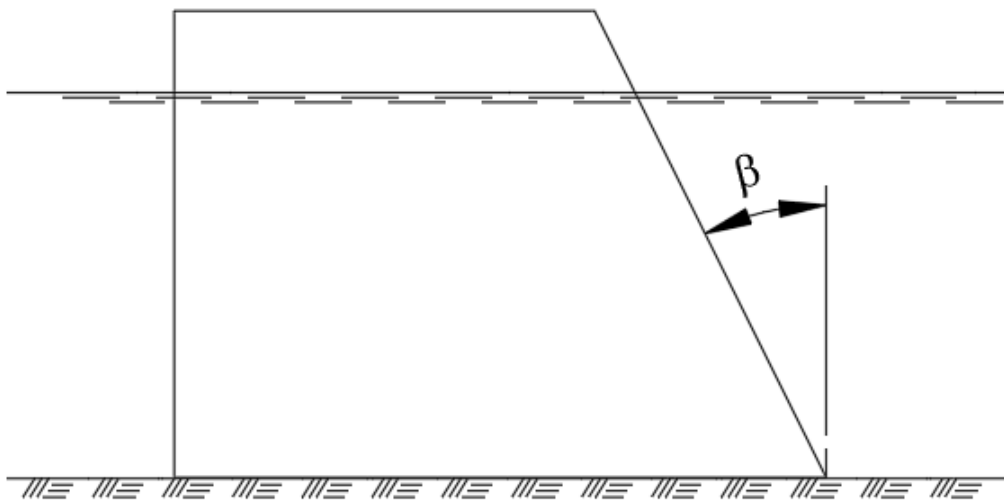
c_3 är en formfaktor för lutande framkant. Se *Figur 6* och *Tabell 3*.



Figur 5. Plan pelare. Definition av vinkel α för spetsig framkant på pelare.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 6. Elevation bropelare. Definition av vinkel β för lutande framkant på pelare.

Tabell 1. Formfaktor, c_1 .

b/d	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	$\geq 4,0$
c_1	1,8	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8

Tabell 2. Formfaktor, c_2 .

$2 * \alpha$	45°	60°	75°	90°	120°	180°
c_2	0,54	0,59	0,64	0,69	0,77	1,00

Tabell 3. Formfaktor, c_3 .

β	0 – 15°	15 – 30°	30 – 45°
c_3	1,00	0,75	0,50

Produkten $c_2 * c_3$ bör inte sättas lägre än 0,5.

För isens tryckhållfasthet, σ_k , anges följande värden som vägledning:

- 500 kPa. För saltvattenis vid Sveriges västra kust.
- 700 kPa. Exempelvis för reglerade älvar i mellersta och norra Sverige.
- 1400 kPa. Vid starkare isgång eller där mycket stora flak av kärnis kan förekomma samtidigt med hög strömhastighet.

För Ekv. 2 till Ekv. 4 gäller att:

- Utöver kraften $I_{h,2}$ verkar en kraft vinkelrätt mot strömriktningen i framkanten av bropelaren som motsvarar 15-20% av $I_{h,2}$.
- Strömriktningen är parallell med pelarens längdaxel. Om strömriktningen är vinklad mot bropelarens längdaxel kan kraften delas upp vektoriellt. Om vinkeln överstiger 30° krävs särskild utredning.
- Vid pelare med låg styvhet bör hänsyn tas till det dynamiska istryckets vibrerande karaktär med höga momentana tryck och eventuella resonanseffekter. Notera att vad som betraktas som låg styvhet definieras inte.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Tryck från stort istäcke genom ström och vind

Islasten, $I_{h,2}$, av tryck från stort istäcke genom ström och vind beaktas genom att använda Ekv. 2 och ansätta i_2 till mellan 10-30 kN/m. Detta värde innefattar i regel även verkan av oliksidigt termiskt istryck. Notera att ingen vägledning till val av storlek på denna linjelast med hänsyn till lokala förhållanden ges.

Tryck från packis

Effekten av tryck från packis innefattas i regel genom att dynamiskt tryck från drivande is och tryck från stort istäcke genom ström och vind beaktas.

3.1.2 Vertikal islast

Två olika metoder anges i *Istryck mot bropelare* för att bestämma vertikal islast. Den ena metoden gäller för brostöd och den andra gäller för enskild påle, dykdalb eller liknande. Metoderna gäller för att bestämma den vertikala lyftkraften.

För istäcke fastfruset i brostöd kan lyftkraften uppskattas till:

$$I_v = 2 * (a + b) * i_v \quad \text{Ekv. 5}$$

där

a och b framgår av *Figur 4*.

i_v är maximal lyftkraft per meter vid lång rak vägg (kN/m).

i_v beräknas enligt:

$$i_v = 0,6 * d * \sqrt{\sigma_b * \Delta h * k} \quad \text{Ekv. 6}$$

där

σ_b är isens böjhållfasthet (kPa).

Δh är vattenståndshöjningen (m).

k är vattnets uppträcksmodul, $k = 10 \text{ kN/m}^3$.

Följande maximala värden anges för isens böjhållfasthet, σ_b :

- 2000 kPa för sötvattenis.
- 1000 kPa för saltvattenis vid Sveriges västra kust.

För istäcke fastfruset i pålar kan lyftkraften uppskattas till:

$$I_v = A * d^2 \quad \text{Ekv. 7}$$

där

A är en faktor kopplad till isens hållfasthet (kPa).

Följande värden anges för faktorn A :

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- 1600 kPa för sötvattenis,
- 800 kPa för saltvattenis vid Sveriges västra kust.

Om $d > 0,6 \text{ m}$ ansätts $d = 0,6 \text{ m}$ i Ekv. 6 och 7.

Istryck mot bropelare anger att den vertikala islasten kan uppgå till maximalt 1/3 av den horisontella lasten som kan uppkomma p.g.a. vattenståndsväxlingar. Se kap. 3.1.1 för bestämning av denna last. Det är ej uppenbart hur den lasten förhåller sig till den vertikala lasten beräknad med Ekv. 5 och Ekv. 7.

3.2 Bronorm Norge: Håndbok N400 Bruprosjektering

Håndbok N400 gäller både broar samt färjekajer. Vid uppdateringen till *Håndbok N400* skedde stora förändringar i avsnittet för islaster. I den några år äldre norska bronormen *Håndbok 185* (2011) behandlades islast på ett sätt som var mycket likt *Istryck mot bropelare*.

Islast behandlas i kap. 5.4.7 i *Håndbok N400*. Tre huvudtyper av islast behandlas i riktlinjen:

- Last från drivande is.
- Horisontal last från termisk expansion och vattenståndsväxlingar.
- Vertikala islaster vid vattenståndsväxlingar.

Håndbok N400 anger att konstruktionen ska utformas efter lokala förhållanden så att islasten reduceras så mycket som möjligt.

Islastens angreppspunkt i hav ska sättas till den mest ogynnsamma positionen mellan HHW och LLW. I reglerade sjöar ska de reglerade vattennivåerna beaktas. I floder ska isens angreppsnivå utvärderas från fall till fall.

3.2.1 Horisontell islast

Last från drivande is

Last från krossning mot konstruktionen verkar som en linjelast mot konstruktionens bredd. Lasten beräknas enligt:

$$I_h = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,16} * d * b_{eff} \quad \text{Ekv. 8}$$

där

C_R är en hållfasthetskoefficient (kPa). Anges till 1800 kPa.

d^* är en referensistjocklek, 1 m.

n är en empirisk faktor.

b_{eff} är effektiv bredd på konstruktionen (m).

Den empiriska faktorn n beräknas på följande sätt:

$$n = \begin{cases} -0,50 + d/5 & \text{för } d \leq 1,0 \text{ m} \\ -0,30 & \text{för } d > 1,0 \text{ m} \end{cases} \quad \text{Ekv. 9}$$

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Den dimensionerande istjockleken ska beräknas fram efter frostmängd enligt:

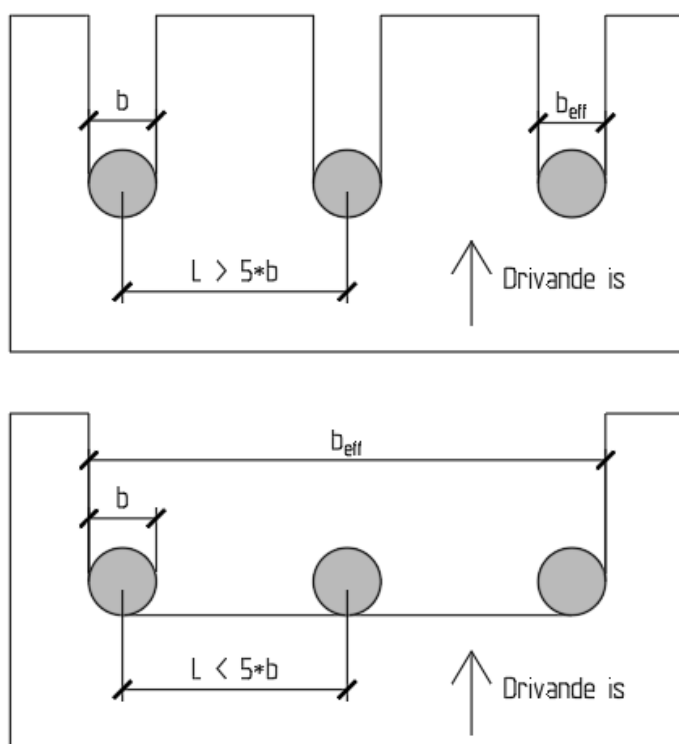
$$d = \frac{\sqrt{F}}{175} \quad \text{Ekv. 10}$$

där

F är frostmängd ($h^{\circ}C$).

Frostmängden erhålls från *Håndbok N200 Vegbyggning*. För permanenta konstruktioner ska en returperiod på 100 år beaktas. För temporära konstruktioner beaktas en returperiod på 10 år.

Konstruktionens effektiva bredd ska beaktas p.g.a. eventuell isansamling mellan konstruktionsdelarna. Den effektiva bredden bestäms enligt figur nedan.



Figur 7. Konstruktionens effektiva bredd vid iskrossning.

Ekv. 8 ska ge en övre gräns för islast från ett plant istäcke. Det framgår att lokala utvärderingar kan utföras för att uppnå ett bättre lastestimat. I mindre sjöar och floder kan de drivande krafterna vara begränsande för islastens storlek.

I områden där packis kan förekomma ska ytterligare utvärderingar utföras.

Om konstruktionen har en lutande front där $\beta > 30^{\circ}$ enligt Figur 6 begränsas islasten av isens böjhållfasthet. För detta fall hänvisas läsaren till ISO 19906:2010; kap. A.8.2.4.4.3.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Horisontal last från termisk expansion och vattenståndsvariation

Ensidig last från fast istäcke verkar som en jämnt utbredd last och beräknas enligt:

$$i_1 = 300 * d + 2,5 * |T| < 250 \text{ kN/m} \quad \text{Ekv. 11}$$

där

T är lägsta dygnsmedeltemperatur (°C) med en returperiod på 50 år. Läsaren hänvisas till *NS-EN 1991-1-5*.

Istjockleken, d , ska maximalt ansättas till 0,5 m.

Det ska utvärderas från fall till fall om denna last kan uppkomma.

3.2.2 Vertikal islast

För istäcke fastfruset i pelare kan lyftkraften beräknas enligt:

$$I_v = L_i * i_v \quad \text{Ekv. 12}$$

där

L_i är tvärsnittets perimeter (m).

i_v beräknas enligt:

$$i_v = 0,6 * \sqrt{d * 0,7 * C_R * \Delta h * k} \quad \text{Ekv. 13}$$

Upptrycksmodul ansätts till $k = 9,81 \text{ kN/m}^3$.

För fristående pelare kan den lyftande lasten förenklat beräknas enligt *Ekv. 7*.

Håndbok N400 anger att vid vattenståndsväxlingar kan en vertikal last uppkomma där dess storlek uppgår till maximalt 1/3 av den horisontella islasten från fast istäcke. Det är ej uppenbart hur den lasten förhåller sig till den vertikala lasten beräknad med *Ekv. 7* och *Ekv. 13*.

3.3 Norm Danmark: Tillaeg DK:2015 Islast

Det danska tillämpningsdokumentet *Tillaeg DK:2015 Islast* kan användas för att bestämma islasten i inre farvatten, floder, sjöar och större vattendrag. För större broar över inre farvatten och floder ska reglerna kompletteras med mer detaljerade analyser av islastens storlek. *Tillaeg DK:2015 Islast* tydliggör att det är bestämning av karakteristisk last från is som avhandlas i dokumentet.

Islasten kategoriseras på följande sätt:

- Islast från krossning av is.
- Islast från termisk rörelse.
- Islast från vattenståndshöjning.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Isens angreppspunkt motsvarar normalt nivån för årligt medelvattenstånd i månaderna januari-april. Om det finns risk att is ansamlas runt konstruktionen ska isens angreppspunkt höjas.

Tillaeg DK:2015 Islast hänvisar till relevant speciallitteratur i följande fall:

- För reduktion av horisontell islast p.g.a. att konstruktionen har lutande framkant.
- För dynamisk islast. Detta ska beaktas i en utmattningsanalys.
- För packis.

3.3.1 Horisontell islast

Islast från krossning av is och islast från termisk rörelse avser islast i horisontell riktning.

Islast från krossning

För en styv lodrät konstruktion kan islasten från drivande is och fastfruset istäcket pådrivet av vind och ström beräknas enligt:

$$I_h = k_1 * k_2 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 14}$$

där

k_1 är en formfaktor. Se *Tabell 4*.

k_2 är en kontaktfaktor. Se *Tabell 5*.

k_3 är en dimensionsfaktor. Se *Tabell 6*.

Tabell 4. Formfaktor k_1 , avser konstruktionens tvärsnitt i vattenlinjen.

Tvärsnittsform	k_1
Rektangulärt	1,0
Cirkulärt	0,9

Tabell 5. Kontaktfaktor k_2 , tar hänsyn till isens kontakt med konstruktionen.

Issituation	k_2
För is i rörelse	0,5
För is fastfruset till konstruktionen	1,0
För ökning av istjocklek omkring konstruktionen	1,5

Dimensionsfaktorn, k_3 , tar hänsyn till det tredimensionella spänningstillståndet i isens angreppspunkt på konstruktionen. Faktorn beräknas enligt:

$$k_3 = \sqrt{1 + 5 * d/b} \quad \text{Ekv. 15}$$

Tillaeg DK:2015 Islast anger värden som kan användas för istjocklek, tryckhållfasthet och böjhållfasthet. Dessa värden gäller både för sötvatten- och havsvattensis. Värdena anges i *Tabell 6*. Isens böjhållfasthet används vid bestämning av den vertikala islasten, se kap. 3.3.2.

Tabell 6. Värden för isparametrar.

Tryckhållfasthet, σ_k	1900 kPa
Böjhållfasthet, σ_b	500 kPa
Istjocklek, d	0,57 m

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Värden i *Tabell 6* är korrelerade värden och avser en returperiod på 50 år. *Tillaeg DK:2015 Islast* anger att istjockleken varierar och att tjockleken lokalt kan vara mindre än vad som anges i tabellen. Lokala uppgifter bör inhämtas om istjocklek.

Islast från termisk rörelse

Det termiska istrycket i brons längdriktning verkar ensidigt och på pelarens långsida. Trycket beräknas till:

$$i_1 = 0,04 * \sigma_k * d \quad \text{Ekv. 16}$$

Trycket antas vara jämnt fördelat över brostödet.

3.3.2 Vertikal islast

Den vertikala islasten beror på vattenståndshöjningar. För en lång, lodrät vägg bestäms lyftkraften per meter på följande sätt:

$$i_v = 0,4 * d * \sqrt{k * \sigma_b * \Delta h} \quad \text{Ekv. 17}$$

Upptrycksmodulen, k , sätts till 9,81 kN/m³. Vattenståndshöjningen, Δh , ska maximalt sättas till 1,0 m.

Notera att metoden är densamma som *Ekv. 6* med skillnaden att första koefficienten är 0,4 istället för 0,6.

Isens lyftkraft på pålar och mindre konstruktioner bestäms enligt:

$$I_v = 0,8 * \sigma_b * d^{1,75} * b^{0,25} \quad \text{Ekv. 18}$$

Ekv. 18 är giltig för $0,5 \leq b/d \leq 7$. För $b/d \geq 7$ kan lyftkraften bestämmas på följande sätt för cirkulära tvärsnitt (där b är diametern):

$$I_v = \pi * b * i_v \quad \text{Ekv. 19}$$

Tillaeg DK:2015 Islast anger att den vertikala nedåtriktade kraften är mindre än lyftkraften. Förenklat kan den nedåtriktade kraften ansättas till halva värdet av lyftkraften, både för pålar och väggar.

3.4 Handbok Norge: Port Designer's Handbook

I *Port Designer's Handbook* anges att studier om islaster mot kajkonstruktioner ej har haft hög prioritet. Trots detta behöver islaster beaktas för konstruktioner som exponeras för is.

Port Designer's Handbook anger att horisontell islast kan verka mot konstruktionen både i längdriktning och tvärriktning. För drivis finns flera scenarion när isen träffar konstruktionen. T.ex. kan drivkrafterna från vind och strömmar vara så pass små att isflaket stannar. Fallet när drivkrafterna är så pass stora att isen går till brott via krossning eller böjning orsakar dock störst lasteffekt på konstruktionen och är det scenario som behandlas i handboken.

3.4.1 Horisontell islast

Islast från drivande is

Med avseende på drivande is anger *Port Designer's Handbook* tre möjliga metoder för att beräkna islasten.

Islasten i strömmande riktning kan beräknas på samma sätt som *Ekv. 2* alternativt enligt:

$$I_{h.2} = i_2 * \chi \quad \text{Ekv. 20}$$

där

χ är bredden på isflaket (m).

Följande riktvärden anges för istrycket per meter, i_2 :

- 10-20 kN/m i floder eller för kajkonstruktioner med båttrafik.
- 30 kN/m i fjordar och smala vikar.
- 50-100 kN/m för platser som är hårt utsatta för is.

Den tredje metoden för drivis ska motsvara ett oändligt stort istäcke som krossas mot en vertikal konstruktion:

$$I_h = \rho_G * d * b \quad \text{Ekv. 21}$$

där

ρ_G är ett globalt istryck (kPa).

Det globala istrycket ρ_G beräknas enligt:

$$\rho_G = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^m \quad \text{Ekv. 22}$$

där

m är en empirisk faktor. Värdet på faktorn anges till -0,16 (anges till 0,16 i *Port Designer's Handbook*. Troligtvis en felaktighet, jämför med *ISO 19906:2010*).

Den empiriska faktorn n beräknas enligt *Ekv. 9*. Referensistjockleken är densamma som för *Ekv. 8*, $d^* = 1 \text{ m}$.

Följande värden anges för hållfasthetskoefficienten C_R :

- 2800 kPa för Beauforthavet.
- 1800 kPa för Östersjön.

För pelare som lutar 45° kan den horisontella islasten reduceras med 1/3. Detta beror på att isen går till brott i böjning istället för krossning. Se *Figur 2* för illustration av brottmoden.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Enligt *Port Designer's Handbook* kan islasten bli större än *Ekv. 21* p.g.a. två anledningar:

- Om isen är fastfrusen i konstruktionen och börjar röra sig. Då drar och trycker isen på konstruktionen.
- Om isen fryser fast mot konstruktionen och medför att den får en större effektiv bredd. Detta beror på konstruktionens termiska konduktivitet och är t.ex. mer vanligt förekommande för stålplåtar.

Följande modifikation av *Ekv. 21* för att beakta dessa effekter presenteras:

$$I_h^{Adfreeze} = I_h * K^{Adfreeze} \quad \text{Ekv. 23}$$

där

$K^{Adfreeze}$ är en koefficient för fastfrysning.

Koefficienten, $K^{Adfreeze}$, varierar mellan ca 1,75-2,9 och beror på förhållandet b/d . Ingen mer vägledning ges för hur koefficienten bestäms.

Om konstruktionen består av flera intilliggande pålar behöver risken för isansamling beaktas. Isansamling kan medföra att pålens effektiva bredd påverkas. Risken för isansamling beror på förhållandet mellan pålavstånd och påldiameter. Om $L_1/b > 5$ behöver inte ansamling av is beaktas.

Islastens storlek i tvärriktning vid drivande is uppgår till 20% av lasten i längdriktning.

Termiskt istryck

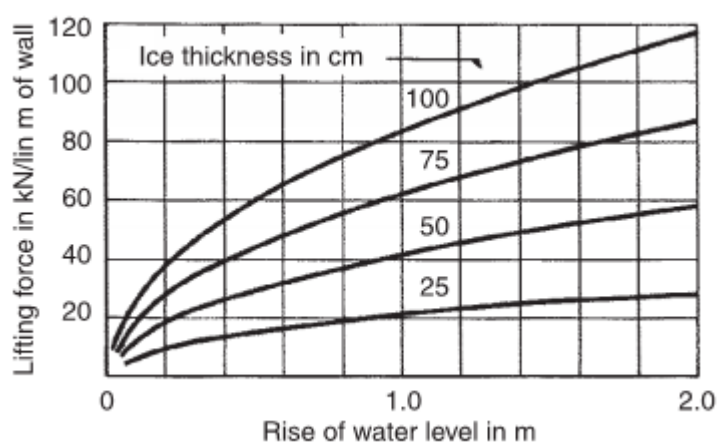
Termiskt istryck beaktas med *Ekv. 1*. Följande värden anges för istrycket, i_1 :

- 100-300 kN/m om det är öppet vatten på andra sidan av pelaren.
- 25-75 kN/m om det är fast istäcke på båda sidor av pelaren.

3.4.2 Vertikal islast

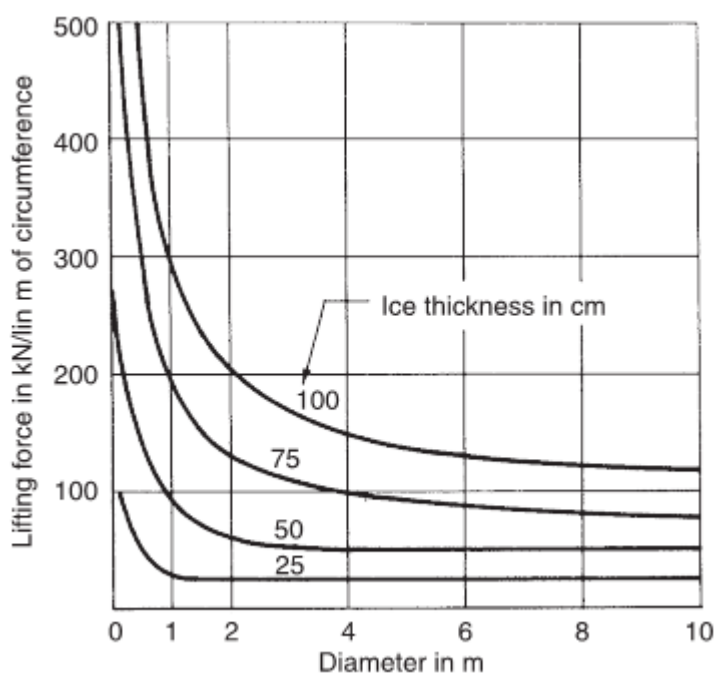
För vertikala islaster presenteras i *Port Designer's Handbook* en metod där islasten bestäms utifrån figurer. Figurerna baseras på en is med en böjhållfasthet på 2000 kPa. Den vertikala islasten beskrivs enbart som en lyftkraft.

För vertikala väggkonstruktioner bestäms islasten per meter utifrån *Figur 8*. Lasten är en funktion av möjlig vattenhöjning och istjockleken.



Figur 8. Lyftkraft per meter för en vägg som funktion av istjocklek och möjlig vattenhöjning. Figur från Port Designer's Handbook.

För pelare bestäms islasten per meter utifrån Figur 9. Lasten är en funktion av istjockleken och pelarens diameter.



Figur 9. Lyftkraft per meter för en pelare som funktion av istjocklek och pelarens diameter. Figur från Port Designer's Handbook.

3.5 Bronorm Kanada: CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code

I CAN/CSA-S6-14 behandlas islaster i kapitel 3.12. Enligt den kanadensiska bronormen ska följande lastfall beaktas:

- Dynamiska krafter p.g.a. av kollision från drivande isflak.
- Statiska krafter p.g.a. termisk rörelse i fast istäcke.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- Horisontellt tryck p.g.a. välvning orsakat av isansamling.
- Vertikala krafter orsakade av vattenfluktuationer eller kollision från drivande is.

CAN/CSA-S6-14 anger att den presenterade metoden enbart gäller för sötvattenis i floder och sjöar. För saltvattenis hänvisas läsaren till experthjälp.

Notera att CAN/CSA-S6-14 anger att för slanka pelare, som t.ex. pålar, behöver en specialist inom ismekanik kontaktas.

3.5.1 Horisontell islast

Dynamiska krafter

Drivande is kan antingen gå till brott via krossning, böjning eller en kombination av krossning/böjning. Dessa krafter bestäms enligt Ekv. 24 till Ekv. 26.

Krossning:

$$I_{h,k} = k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 24}$$

Böjning:

$$I_{h,b} = c_n * \sigma_k * d^2 \quad \text{Ekv. 25}$$

Krossning/böjning:

$$I_{h,bk} = \left((c_n + \sqrt{66}) / 72 \right) * \sigma_k * b^2 \quad \text{Ekv. 26}$$

där

c_n är en faktor för lutande framkant.

Faktorn c_n beräknas på följande sätt:

$$c_n = 0,5 * \tan(90^\circ - \beta + 15^\circ) \quad \text{Ekv. 27}$$

där uttrycket $(90^\circ - \beta + 15^\circ)$ begränsas till $(90^\circ - \beta + 15^\circ) < 90^\circ$ enligt tillhörande råddokument.

Nedanstående villkor gäller vid val av dimensionerande islast.

När $I_{h,k} < I_{h,b}$

$$I_h = I_{h,k}$$

När $I_{h,k} > I_{h,b}$

$$I_h = I_{h,k} \text{ om } I_{bk} \geq I_{h,k}$$

$$I_h = I_{h,b} \text{ om } I_{bk} \leq I_{h,k}$$

$$I_h = I_{h,bk} \text{ om } I_{h,k} > I_{h,bk} > I_{h,b}$$

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Om inte mer precis data finns tillgänglig för isens tryckhållfasthet rekommenderas följande värden:

- 400 kPa. Islossning sker runt smältpunkten och isen är mycket sönderdelad.
- 700 kPa. Islossning runt smältpunkten och isen är delvis sönderdelad.
- 1100 kPa. Islossning, eller isrörelser, sker runt smältpunkten och isen är invändigt stabil och rör sig i stora delar.
- 1500 kPa. Islossning, eller isrörelser, sker vid temperaturer betydligt lägre än smältpunkten.

I mindre vattendrag där det inte är troligt med större isflöden kan islasten reduceras med upp till 50%. Det framgår dock ej hur denna reduktion bör utföras.

Om brostödet längdriktning är parallell med isens drivriktning blir islasten i stödets längdriktning $I_{h,2} = I_h$. I tvärriktningen sätts islasten antingen till 15% av lasten i längdriktningen eller till:

$$I_{h,1} = \frac{I_{h,2}}{2 * \tan(\alpha + \theta_f)} \quad \text{Ekv. 28}$$

där

θ_f är en friktionsvinkel (°). I brist på mer exakt data sätts friktionsvinkeln, $\theta_f = 6^\circ$.

Två olika lastfall ska beaktas:

- a) $I_{h,2}$ kombinerat med $I_{h,1} = 0,15 * I_{h,2}$.
- b) $0,5 * I_{h,2}$ kombinerat med $I_{h,1}$ från Ekv. 28.

Om pelarna står i vattnet med en vinkel mot vattnets flöde ska kollisionskrafterna verka på en projicerad yta och delas upp i komponenter. Kraften i tvärled ska minst utgöra 20% av den totala kraften.

Om bropelarens sektion är cirkulär behöver inte lastkomponenten i tvärriktningen beaktas. Då antas lasten I_h enbart verka i flödets riktning.

Termiskt istryck

Om risken finns för ojämn frysning runt pelaren ska termiskt istryck beaktas. Ekvationerna ovan används men tryckhållfastheten sätts till minst 1500 kPa när istemperaturen är väsentligt lägre än fryspunkten.

Isansamling

Kraften verkar samtidigt i längdriktning och tvärriktning. Trycket som ger upphov till kraften sätts till 10 kPa om pelaravståndet är mindre än 30 m och till 5 kPa om pelaravståndet är över 30 m. Trycket antas verka längs hela tjockleken av isansamlingen på en nivå ovanför vattennivån.

3.5.2 Vertikal islast

Det framgår ej explicit om den vertikala islasten gäller både i uppåtgående och nedåtgående riktning eller i enbart en riktning.

För cirkulära pelare beräknas lasten enligt:

$$I_v = 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75}) \quad \text{Ekv. 29}$$

där

r är pelarnosens radie (m).

För avlånga pelare beräknas lasten enligt:

$$I_v = 15 * l_p * d^{1,25} + 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75}) \quad \text{Ekv. 30}$$

där

l_p är tvärsnittets perimeter för en avlång bropelare (exklusive cirkelformade ändar).

3.6 Bronorm USA: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Islaster behandlas i kapitel 3.9 i *AASHTO LRFD*. Kapitlet om islaster i *AASHTO LRFD* har stora likheter med *CAN/CSA-S6-14*. Även i *AASHTO LRFD* klargörs det att avsnittet enbart gäller för sötvatten i floder och sjöar. Islast i havsvatten ska bestämmas med hänsyn till platsspecifika förhållanden.

I *AASHTO LRFD* finns tillhörande rådande text som ger läsaren god insikt i metodernas bakgrund. I *ASSHTO LRFD* anges att avsnittet om islast huvudsakligen baseras på Montgomery, et al. (1984) med kompletteringar från Neill (1981).

I USA sker den mest allvarlig islossningen vid plötsligt töväder i januari när lufttemperaturen är runt 10°C medan medelstemperaturen fortfarande är under 0°C p.g.a. ett isolerande snötäcke.

Notera att *AASHTO LRFD* anger att slanka pelare, inklusive pålar, inte ska användas i regioner där islasterna är signifikanta såvida inte en isspecialist konsulteras. Inget gränsvärde anges för vad som bör beaktas som en slank pelare.

3.6.1 Horisontell islast

Dynamiska krafter

Den horisontella lasten bestäms enligt *Ekv. 24* och *Ekv. 25*. Dock beräknas faktorn c_n enligt:

$$c_n = 0,5 / \tan(\beta - 15^\circ) \quad \text{Ekv. 31}$$

Samma rekommenderade värden för isens tryckhållfasthet som i *CAN/CSA-S6-14* gäller.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Nedanstående villkor gäller vid val av dimensionerande islast.

Om $b/d \leq 6$

$$I_h = \min(I_{h,k}, I_{h,b})$$

Om $b/d > 6$

$$I_h = I_{h,k}$$

Om $\beta \leq 15^\circ$ ska inte brottmoden böjning beaktas. I sådana fall är den horisontella lasten $I_h = I_{h,k}$.

Islasten får reduceras i mindre vattendrag där större isflöden ej är troliga. I den tillhörande rådande texten i *AASHTO LRFD* anges en metod för att reducera islasten, beräknad enligt *Ekv. 24* och *Ekv. 25*, i mindre vattendrag. Tanken med reduktionen bygger på att isflak i mindre vattendrag inte har erforderlig rörelseenergi för att krossas när de stöter mot konstruktionen. Vattendraget ska ha en bredd på mindre än 90 m vid vattennivå MW för att reduktionen ska kunna tillämpas. Reduktionsfaktorn bestäms enligt nedanstående tabell.

Tabell 7. Bestämning av reduktionsfaktor k_5 för konstruktioner i mindre vattendrag.

A_i/r^2	k_5
1000	1,0
500	0,9
200	0,7
100	0,6
50	0,5

där

A_i är istäckets horisontella tvärsnittsarea (m^2).

Den tillhörande transversala lastkomponenten bestäms på samma sätt som i *CAN/CSA-S6-14*. För *Ekv. 28* anges dock inget rekommenderat värde för friktionsvinkeln θ_f . Den transversella lastkomponenten får heller inte försummas om pelaren har ett cirkulärt tvärsnitt. Istället ska vinkeln α ansättas till 50° .

Termiskt istryck

Det framgår att termiskt istryck enbart ska beaktas om risken finns för ojämn frysning runt pelaren eller i situationer där krafterna är obalanserade. Till skillnad från *CAN/CSA-S6-14* beskrivs ingen metod för hur detta ska gå till.

Valvverkan och isansamling

Valvbildning mellan pelare kan antas medföra ett tryck på 10-1000 kPa mot pelaren medan isansamling kan antas medföra ett tryck på 1-10 kPa mot pelaren. Notera att ingen vägledning ges hur värdena i intervallet ska väljas. Dock kommenteras de stora intervallen med att kunskap saknas inom området.

3.6.2 Vertikal islast

Den vertikala islasten bestäms på samma sätt som i *CAN/CSA-S6-14* med *Ekv. 29* och *Ekv. 30*.

3.7 Handbok USA: Coastal Engineering Manual

Coastal Engineering Manual är tillämpbar för de flesta marina konstruktioner och uttryckligen för pålar i vatten. I handboken delas den horisontella islasten upp i tre kategorier:

- Sammanhängande istäcke.
- Lokala krafter orsakade av iskrossning.
- Termiska iskrafter.

Krafterna från sammanhängande istäcke orsakas av bl.a. vind och vatten som trycker is mot en vertikal konstruktion. Om isflaket kommer i kontakt enbart med några enstaka punkter hos konstruktionen är det iskrossning eller andra brottmoder i isen som avgör lastens storlek. För vida konstruktioner eller små isblock kan den maximala kraften som uppkommer mot konstruktionen begränsas av rörelseenergin. I sådana fall bör lasten egentligen betraktas som en impulslast, det är dock praktiskt svårt p.g.a. problematiken att bestämma isblockets hastighet.

3.7.1 Horisontell islast

Sammanhängande iskrafter

Ett fast istäcke som utsätts för vågor och/eller vind orsakar laster på konstruktionen. Denna islast beräknas på följande sätt:

$$I_h = c_{sf} * \rho * A_i * (u - u_i)^2 \quad \text{Ekv. 32}$$

där

c_{sf} är ytfriktionskoefficient för is mot vind eller vatten.

ρ är densiteten för luft eller vatten (kg/m^3).

A_i är istäckets horisontella area (m^2).

u är hastigheten för vind, 10 m ovan isen, eller hastigheten för strömmande vatten, 1 m under isen (m/s).

u_i är isens hastighet i samma riktning som u .

När ett istäcke vilar mot en konstruktion är hastigheten $u_i = 0 \text{ m/s}$. Kraften fördelas sedan ut vektoriellt mot konstruktionens kontaktpunkter.

Lokala krafter orsakade av iskrossning

Coastal Engineering Manual anger flera uttryck för krossning av is mot konstruktioner. För mindre pålar föreslås att den horisontella islasten bestäms enligt:

$$I_h = k_1 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 33}$$

Notera likheten i Ekv. 33 med Ekv. 13 och Ekv. 24.

I *Coastal Engineering Manual* finns ett tillägg för koefficienterna k_1 och k_3 . Värden i Tabell 4 gäller för k_1 med ett tillägg för spetsiga tvärsnitt:

$$k_1 = 0,85 * \sqrt{\sin(\alpha)} \quad \text{Ekv. 34}$$

Se Figur 5 för definition av vinkeln α .

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

För k_3 gäller *Ekv. 14* förutsatt att $b/d > 1$. För $0,1 < b/d < 1$ gäller att:

$$k_3 = 4,17 - 1,72 * (b/d) \quad \text{Ekv. 35}$$

Enligt *Coastal Engineering Manual* kan produkten $k_1 * k_3$ antas till 1 för större pålar och bropelare och därmed kan uttrycket i *Ekv. 33* förenklas.

För isens tryckhållfasthet anges följande värden:

- 700 kPa. Islossning sker runt smältpunkten och isen är mycket sönderdelad.
- 1400 kPa. Islossning sker runt smältpunkten men isen rör sig i större delar som är stabila.
- 2100 kPa. Islossningen utgörs av en initial rörelse av hela istäcket eller större stabila isflak som trycker mot pelaren.
- 2800 kPa. Islossning sker vid temperaturer betydligt lägre än smältpunkten och isrörelsen utgörs av stora isflak.

Termiska islaster

Enligt *Coastal Engineering Manual* är det svårt att bestämma alla parametrar som behövs för att bestämma termisk expansion av is (lufttemperatur, lufttryck, vind mm.). Istället anges följande värden som är baserat på mätningar:

- 145-220 kN/m för fasta konstruktioner som t.ex. dammar.
- 73 kN/m för eftergivliga konstruktioner.

3.7.2 Vertikal islast

Enligt *Coastal Engineering Manual* kan den vertikala iskraften både orsaka att en påle lyfts upp alternativt knäcks av en nedåtriktad kraft.

En metod baserad på studier av Kerr (1975) presenteras. Metoden gäller för cirkulära pålar. Den gäller både för uppåt- och nedåtriktade krafter och förutsätter att isen inte går till skjuv- eller böjbrott innan den maximala kraften mot pålen uppnås. Metoden presenteras i figuren nedan där symbolerna har följande betydelse:

P är iskraft (ton).

a är pålens radie (cm).

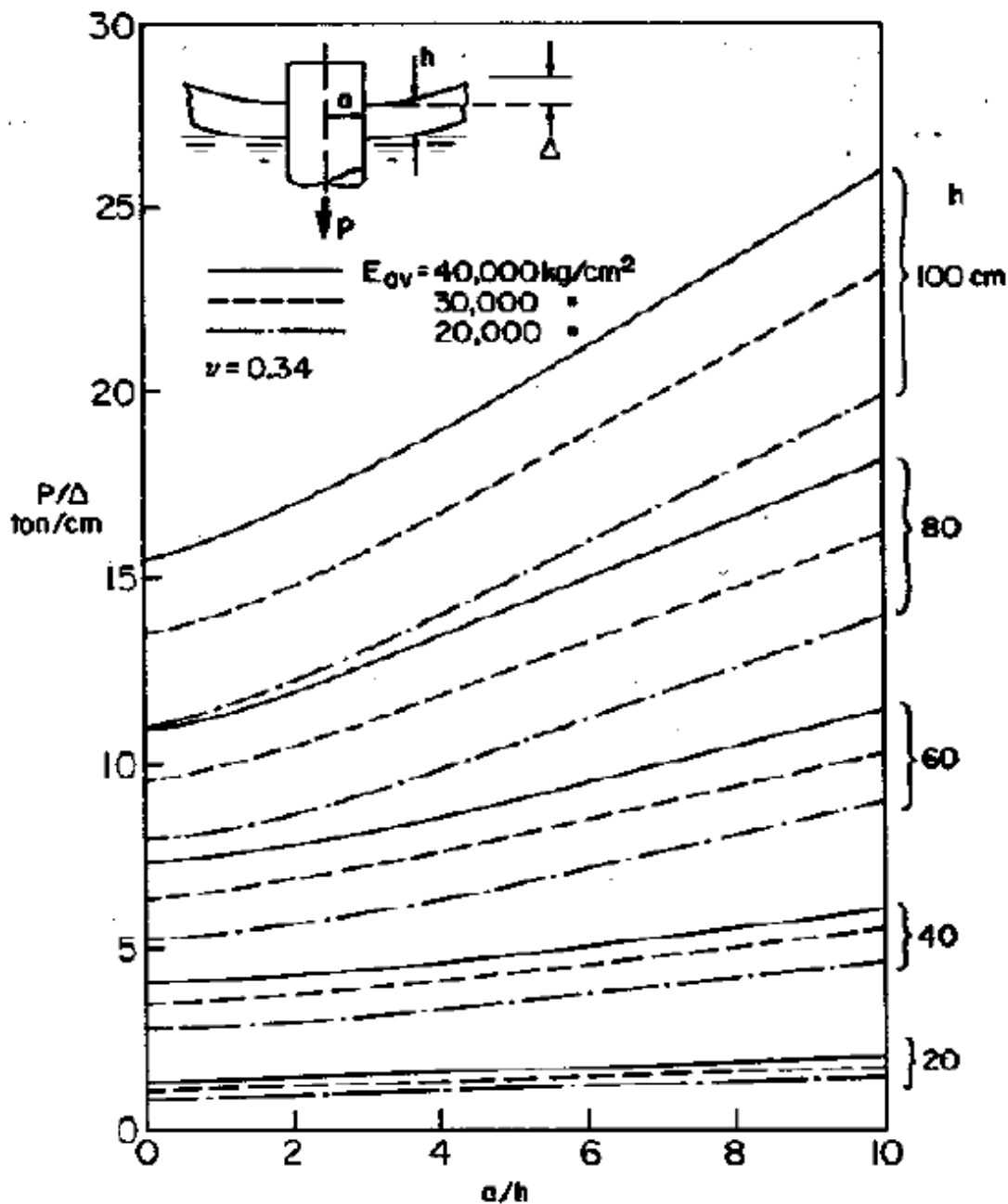
h är istjocklek (cm).

E_{av} är genomsnittlig elasticitetsmodul för is (kg/cm²).

Δ är vattnets stigning (cm). Uppgår maximalt till isens tjocklek.

ν är Poissons tal

Symbolerna är specifikt kopplade till *Figur 10*.



Figur 10. Kerrs (1975) grafiska lösning för att bestämma vertikal islast på cylindriska pålar. Figur från Coastal Engineering Manual.

I Coastal Engineering Manual ges ett exempel där isen har en genomsnittlig elasticitetsmodul, E_{av} , på 30 000 kg/cm². Ingen riktlinje ges för hur isens elasticitetsmodul väljs.

3.8 Handbok Tyskland: Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012

Metoderna i avsnitt 5.15 och 5.16 i Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012 gäller uttryckligen för pålar. Enligt EAU 2012 ansätts

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

vanligtvis islasten upp till 0,5-1,5 m ovanför MHW. *EAU 2012* förtydligar att de beskrivna metoderna gäller för tyska förhållanden.

Islasten kan reduceras signifikant i skyddade områden, som t.ex. hamnbassänger, om reducerande åtgärder beaktas som t.ex.:

- Vattenströmmens effekt.
- Användning av ett system med luftbubblor.
- Användning av värmesystem.

Om islasten mot dykdalber är väsentligt större än förtöjnings- och stötlaster kan det enligt *EAU 2012* vara värt att undersöka om konstruktionen kan överbelastas ibland i syfte att få en mer ekonomisk lösning.

3.8.1 Horisontell islast

Oberoende av pålens tvärsnitt kan islasten mot pålar beräknas enligt:

$$I_h = k_6 * \sigma_k * b^{0,5} * d^{1,1} \quad \text{Ekv. 36}$$

där

k_6 är en kontaktfaktor i enheten $m^{0,4}$ som bestäms enligt *Tabell 8*.

Isen tryckhållfasthet σ_k som ska användas i formeln ska bestämmas för en specifik töjningshastighet på $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$.

För att *Ekv. 36* ska vara giltig gäller följande förutsättningar:

- Konstruktionen kan maximalt vara 2 m bred.
- Förhållandet mellan istjocklek och konstruktionsbredd ska uppfylla $b/d \leq 12$.
- Istäcket ska vara horisontellt.
- Pålen ska ha en vinkel mot horisontalplanet på minst 80°.

Tabell 8. Kontaktfaktor k_6 bestäms enligt tabell nedan.

Issituation	$k_6 \text{ (m}^{0,4}\text{)}$
Isrörelse där isen inte är nära omsluten runt konstruktionen (drivande is)	0,564
Isrörelse där isen är nära omsluten runt konstruktionen (fastfrusen is)	0,793

För pålgrupper ansätts islasten till summan av islasten mot de enskilda pålarna. Det är vanligtvis tillräckligt att enbart beakta islast mot de pålar som är närmast det strömmande vattnet.

För havsvatten anger *EAU 2012* en metod för att bestämma isens tryckhållfasthet. Metoden är giltig för Östersjön och Nordsjön. Tryckhållfastheten bestäms enligt:

$$\sigma_k = 2700 * \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} * \phi_B^{-1} \quad \text{Ekv. 37}$$

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

där

$\dot{\epsilon}$ är specifik töjningshastighet, anges till 0,001 (s^{-1}).

ϕ_B isens porositet (%)¹.

Metoden gäller förutsatt att saliniteten inte understiger 5%¹. Isens porositet bestäms på följande sätt:

$$\phi_B = 19,37 + 36,18 * S_B^{0,91} * |t_e|^{-0,69} \quad \text{Ekv. 38}$$

där

S_B är isens salinitet (%)¹.

t_e är isens medeltemperatur (°C).

Medeltemperaturen beräknas genom att anta en linjär temperaturfördelning i istäcket. Temperaturen på isens ovansida sätts lika med lufttemperaturen. Temperaturen på isens undersida sätts lika med -1°C vid tyska delen av Östersjön och lika med -2°C vid tyska delen av Nordsjön. EAU 12 hänvisar att metoden är hämtad från Kovacs (1996).

I EAU 2012 finns tabellerade värden för salinitet för olika platser längs den tyska kusten. I Nordsjön varierar isens salinitet från 14-18%¹. I Östersjön varierar isens salinitet mellan 5-12%¹.

En annan metod används för att beräkna isens tryckhållfasthet i sötvatten. För $0^\circ\text{C} > t_e > -5^\circ\text{C}$ gäller:

$$\sigma_k = 1100 + 350 * |t_e| \quad \text{Ekv. 39}$$

För $t_e < -5^\circ\text{C}$ gäller:

$$\sigma_k = 2850 + 450 * |t_e + 5| \quad \text{Ekv. 40}$$

EAU 12 hänvisar att metoden är hämtad från Schwarz (1970).

Istjockleken i saltvatten bestäms med tabellerade värden längs den tyska kusten. Dessa värden avser maximal istjocklek. Vid Nordsjökusten varierar istjockleken mellan 30-80 cm medan den vid Östersjökusten varierar mellan 32-60 cm.

För sötvatten anges en metod för att beräkna istjockleken, som utgår från att beräkna summan av dagliga temperaturer under 0°C :

$$d = \sqrt{\sum |t_L|} \quad \text{Ekv. 41}$$

där

¹Enheten för porositet och salinitet bedöms vara skrivfel. Dessa ska antagligen anges i ‰ istället för %. Detta har korrigerats i ett utkast till EAU 2020. Notera att det även finns ett antal felaktiga källhänvisningar i EAU 2012, vilka också korrigerats i utkastet till EAU 2020.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

$\sum |t_L|$ är summan av absolutvärdena för de negativa dagliga medeltemperaturerna (°C) under en betraktad period med is. Istjockleken d erhålls i cm.

Om information inte finns tillgänglig avseende temperatur kan vanligtvis istjockleken ansättas till maximalt 30 cm i inlandsområden.

3.8.2 Vertikal islast

För att bestämma den vertikala islasten, både i uppåtgående och nedåtgående riktning används Ekv. 42.

$$I_v = \left(0,6 + \frac{0,15 * b}{d}\right) * 0,4 * \sigma_k * d^2 \quad \text{Ekv. 42}$$

Metoden gäller för individuella pålar. EAU 2012 anger även en metod för hur den vertikala islasten kan minskas när pålen har omkringliggande konstruktioner. Lasten kan reduceras när dessa konstruktioner finns inom sträckan av den karakteristiska längden för isen, l_c , som motsvarar 17 gånger istjockleken. I sådana fall kan lasten reduceras för pålen genom att multiplicera lasten med faktorn f_g .

$$f_g = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2}{4 * l_c^2} \quad \text{Ekv. 43}$$

där

r_1 - r_4 är halva avståndet från pålen till nästa konstruktion i fyra olika riktningar. Finns ingen konstruktion inom l_c sätts $r_x = l_c$.

l_c är isens karakteristiska längd, $l_c = 17 * d$.

4 Bakgrund beräkningsmetodik

I kap. 3 presenteras hur islaster hanteras i åtta olika skriftter. Här nedan ges en mer djupgående beskrivning av de huvudsakliga beräkningsmetoderna i föregående kapitel.

4.1 Horisontell islast

4.1.1 Drivande is

I metoderna presenterade i kap. 3 finns det huvudsakligen fyra olika metoder för hur drivande is mot konstruktioner beaktas. Nedan beskrivs dessa metoder.

4.1.1.1 Metod baserad på pelaravstånd

Metoden tillämpas i:

- *Istryck mot bropelare*
- *Port Designer's Handbook*.

Denna metod beskrivs av *Ekv. 2*:

$$I_{h.2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2 \quad \text{Ekv. 2}$$

I *Port Designer's Handbook* anges en något modifierad version i *Ekv. 20*.

Metoden bygger på att ett isflak med en viss utbredning verkar som en jämnt utbredd last. Den jämnt utbredda lasten fördelas till konstruktionens kontaktpunkter. Om isen går till brott vid de angivna istrycken, i_2 , framgår ej.

Enligt *Istryck mot bropelare* bygger metoden delvis på ett förslag från Nordiska Vägtekniska Förbundet (NVF) från 1978. Ett utkast av förslaget är publicerat i *Istryck mot bropelare; Bilaga 4*. Motsvarande text finns publicerad i *Lastbestemmelser for Vegbruer Rapport nr 4:1980* (Nordisk Vegtetnisk Forbund, 1980).

Förslaget innebar höjda istryck jämfört med då gällande svenska normer, *SOU 1961:12 Statliga belastningsbestämmelser av år 1960 för byggnadsverk*. I förslaget antas 20-30 kN/m istryck, vilket innebar större istryck än vad som tillämpats för många, speciellt äldre, befintliga broar. Löfquist (1987) ser inget starkt skäl till en höjning av antagna istryck. I *Istryck mot bropelare* har istrycket således modifierats något utifrån NVF:s förslag och sätts istället till 10-30 kN/m.

I *SOU 1961:12 Statliga belastningsbestämmelser av år 1960 för byggnadsverk* framgår att istrycket i strömriktningen kan antas ha en storlek av 0,5-1,5 ton/m broöppning vid strömmande vatten med isgång. Värdena innefattar även trycket från strömmande vatten.

Enligt *Istryck mot bropelare* innefattar metoden, förutom effekten av drivis, även:

- Tryck från packis.
- Ensidigt termiskt istryck.
- Ensidigt horisontalt tryck genom spännverkan eller valvverkan.
- Tryck från stort istäcke genom ström och vind.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Ingen ytterligare bakgrund till metoden har återfunnits. Metoden verkar vara analog med reaktionskraft i ett stöd för en kontinuerlig balk med många stöd utsatt för en jämnt utbredd last på hela balken. Dock anges i *Istryck mot bropelare* att metoden ska användas för is sönderbruten i mindre stycken.

4.1.1.2 Korzhavins och Afanasevs metod

I fem av åtta skrifter presenterade i kap. 3 beskrivs en metod för drivande is som beaktar lokal krossning av isen vid konstruktionen. Dessa är:

- *Istryck mot bropelare*
- *Tillaeg DK:2015 Islast*
- *CAN/CSA-S6-14*
- *AASHTO LRFD*
- *Coastal Engineering Manual*

Metoden varierar något beroende på vilka koefficienter som används. Denna metod presenteras i olika former i Ekv. 3, 4, 14, 24 och 33.

Metoden baseras ursprungligen på ett teoretiskt uttryck publicerat i en rysk publikation från 1962 skriven av K. N. Korzhavin (USACE, 2002, pp. VI-5-280). En engelsk översättning av Korzhavins publikation finns tillgänglig från U.S. Joint Publications Research Service (1971).

Korzhavins ursprungliga formel beskrivs på följande sätt (USACE, 2002) (Löset, et al., 2006):

$$\frac{I_h}{b * d} = m_k * i_k * k_k * x_k * \sigma_k \quad \text{Ekv. 44}$$

där

i_k är en faktor som huvudsakligen beaktar förhållandet mellan konstruktionens bredd och isflakets bredd.

m_k är en faktor som beaktar formen på konstruktionen och är densamma som k_1 .

k_k är en faktor som beaktar att isen inte är i perfekt kontakt med konstruktionen. Koefficienten är beroende av den drivande isens hastighet. Värdet varierar mellan 0,4-0,7.

x_k är en töjningskoefficient som beror av den drivande isens hastighet.

Faktorn i_k bestäms enligt:

$$\begin{aligned} i_k &= \sqrt[3]{B/b} \quad \text{för } B/b < 15 \\ i_k &= 2,5 \quad \text{för } B/b \geq 15 \end{aligned} \quad \text{Ekv. 45}$$

där

B är det drivande istäckets bredd (m).

Faktorn x_k bestäms enligt:

$$x_k = \sqrt[3]{\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}} = \sqrt[3]{\frac{u_{i,0}}{u_i}}$$

Ekv. 46

där

$u_{i,0}$ är den drivande isens referenshastighet, 1 m/s.

Afanasev, et al. (1972) presenterade den metod som återges i Ekv. 33. Metoden bygger på modellförsök i saltvattenis. Koefficienterna $m_k (=k_1)$ är densamma i Afanasev och Korzhavins metoder. Afanasev införde skalfaktorn k_3 som funktion av konstruktionens bredd och isens tjocklek, en faktor som bekräftats giltig i andra studier (Ashton, 2004).

Kopplingen mellan Korzhavins och Afanasevs studier är av författarna till denna rapport okänt. Dock benämns metoder i litteratur ofta för Korzhavins metod även när det egentligen är den av Afanasev som presenteras.

I *Istryck mot bropelare* presenteras Korzhavins/Afanasevs metod, dock med andra formfaktorer, se Ekv. 4. Dessa faktorer ska huvudsakligen grunda sig på modellförsök. Enligt *Istryck mot bropelare* är det teoretiskt fel att sammanföra alla tre formfaktorer men det ger en användbar approximation.

I både Ekv. 4 och Ekv. 14 finns en formfaktor som berör förhållandet mellan isens tjocklek och konstruktionens bredd, c_1 respektive k_3 . Faktorerna genererar dock olika värden för samma förhållande mellan istjocklek och konstruktionsbredd. Nedan ges en sammanställning av olika värden vid samma förhållanden:

Tabell 9. Jämförelse mellan formfaktor c_1 och k_3 .

b/d	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	≥4,0
c_1	1,8	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
k_3	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6	1,5

Som framgår av tabellen ovan ger c_1 betydligt lägre värden än k_3 .

Faktorerna c_2 och k_1 behandlar båda tvärsektionens form. Faktorn k_1 skiljer på rektangulär respektive cirkulär form och ger värdet 1,0 respektive 0,9. Faktorn c_2 reducerar istrycket om konstruktionen har en spetsig form och har värden i intervallet 0,54-1,0. Faktorn c_2 korrelerar väl med Ekv. 34 som används i *Coastal Engineering Manual* för att beräkna k_1 för ett spetsigt tvärsnitt.

Faktorerna c_3 och k_2 skiljer sig dock helt ifrån varandra. Faktorn c_3 tar hänsyn till om konstruktionen har lutande framkant. Faktorn k_2 beaktar hur isens rörelse påverkar kontaktytan mot konstruktionen.

Den rådande texten i *AASHTO LRFD* anger att Ekv. 24 och Ekv. 25 baseras på fältförsök på två bropelare i Alberta av Lipsett & Gerard (1980) samt att modellfaktorn i Ekv. 24 är hämtad från Afanasev (1972). Den övre gränsen $b/d = 6$ ska vara en approximation för när is som går till brott i böjning kan transporteras bort från brostödet. Ingen faktor för pelarnosens form finns med i Ekv. 24 och Ekv. 25. Enligt *AASHTO LRFD* visar studier både på att en spetsig pelarnos kan minska islasten samtidigt som den kan orsaka vibrationer i konstruktionen.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Till skillnad från *AASHTO LRFD* finns i *CAN/CSA-S6-14 Ekv. 26*. Ekvationen används för att beskriva en övergång mellan krossning och böjning. Denna har tillförts riktlinjen p.g.a. att det annars blir ett stort hopp i islastens storlek vid övergången $b/d = 6$.

Korzhavins arbete (1971) fokuserar huvudsakligen på brostöd i floder och för scenariot då islossning sker i floden. Formeln för att bestämma islasten bygger främst på teoretiska koncept som jämförts med experiment. Deformationen för brostöd anses försumbar, metoden är således giltig för styva konstruktioner (Korzhavin, 1971).

Korzhavin (1971) slår fast att isens hållfasthet är starkt beroende av töjningshastigheten. I floder kan töjningshastigheten kopplas till isflödets hastighet. I rapporten särskiljs på begreppen tryckhållfasthet och krosshållfasthet. Med tryckhållfasthet menas den hållfasthet iskuber har vid enaxiella tryckförsök. Med krosshållfasthet avses den hållfasthet isen har vid interaktion med en konstruktion. Följande samband ges mellan isens krosshållfasthet och tryckhållfasthet:

$$R_{cm} = R_0 * \sqrt[3]{B/b} \quad \text{Ekv. 47}$$

där

R_{cm} är isens lokala krosshållfasthet.

R_0 är isens tryckhållfasthet i enaxiellt test.

B är isflakets bredd.

b är konstruktionens bredd som isen verkar mot.

Som syns av Ekv. 47 ovan är det således isens enaxiella tryckhållfasthet som ska användas i Ekv. 44 och inte den av Korzhavin beskriven som isens krosshållfasthet.

Isflakets bredd bedöms maximalt uppgå till 15 gånger konstruktionens bredd. Detta medför att förhållandet mellan lokal krosshållfasthet och uppmätt tryckhållfasthet maximalt uppgår till:

$$R_{cm} = R_0 * \sqrt[3]{\frac{15 * b}{b}} \approx 2,5 * R_0 \quad \text{Ekv. 48}$$

Vid istemperaturer runt 0°C och flödes hastighet 0,5 m/s rekommenderar Korzhavin (1971) själv följande värden för isens tryckhållfasthet:

- 650 kPa för floder i norra Ryssland (f.d. Sovjetunionen) och Sibirien.
- 400 kPa för floder i den europeiska delen av Ryssland (f.d. Sovjetunionen).

Dessa värden motsvarar en is hastighet på 0,5 m/s vilket ska motsvara en töjningshastighet på $0,062 \text{ s}^{-1}$.

Korzhavin/Afanasevs metod har en mycket bred tillämpning. I Sverige används den bl.a. vid dimensionering av:

- Vindkraft till havs – enligt *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* (Fransson & Bergdahl, 2009).
- Fyrar – enligt *Handboken Bygg V* (Avén, 1985).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* presenteras metoden på liknande sätt som i *Tillæg DK:2015 Islast* enligt Ekv. 14 med två undantag:

- k_3 begränsas till 2,5 om $d/b > 1$.
- Andra värden på isens tryckhållfasthet redovisas. Dessa varierar mellan 500-3000 kPa och ska bl.a. vara baserade på den kanadensiska bronormen.

Även i *Handboken Bygg V* presenteras metoden på liknande sätt som i *Tillæg DK:2015 Islast* enligt Ekv. 14 men med två undantag:

- Kontaktfaktorn k_2 varierar mellan 0,3-1,0. Värdet 0,5 anges som typiskt dimensioneringsvärde för svenska förhållanden och spröd krossning.
- En ekvation anges för att beräkna isens enaxiella tryckhållfasthet.

4.1.1.3 ISO-metod

I två skrifter förekommer en metod som är hämtad från *ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures*. Dessa skrifter är:

- *Håndbok N400*
- *Port Designer's Handbook*

ISO-standarden är en relativt ny internationell standard och gäller specifikt för offshore-konstruktioner i arktiska förhållanden. Islasten bestäms utifrån det globala trycket ρ_G :

$$\rho_G = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^m \quad \text{Ekv. 22}$$

Det globala trycket bestäms med en hållfasthetskoefficient och empiriska faktorer. *ISO 19906:2010* anger att globalt istryck, ρ_G , är den viktigaste parametern att bestämma vid dimensionering för islast. Parametern beror på:

- Istemperatur.
- Nominell kontaktyta.
- Form och förhållande av kontaktytan.
- Stötens natur.
- Relativ hastighet mellan is och föremål.
- Konstruktionens eftergivlighet.

Metoden för att bestämma ρ_G , enligt Ekv. 22, baseras på fältmätningar i Cook Inlet, Beauforthavet, Östersjön och Bohaihavet (ISO 19906, 2010. Version 1.0). Trycket gäller när is verkar mot en vertikal konstruktion och gäller både för förstaårs is och flerårig is. Data från fältförsöken har använts för att analysera hur istjocklek och konstruktionens bredd påverkar det globala istrycket.

Ekv. 22 gäller för styva konstruktioner där deformationen vid vattenytan p.g.a. islast är mindre än 10 mm (ISO 19906, 2010. Version 1.0). Förhållandet mellan istjocklek och konstruktionsbredd ska uppfylla $b/d > 2$.

Angivna värden på hållfasthetskoefficienten, C_R , baseras på fältförsök (ISO 19906, 2010. Version 1.0). Värdet 1800 kPa gäller för icke-arktiska områden, som t.ex. Östersjön. Parametern C_R kan

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

skalas upp eller ned om det finns indikationer på att ishållfastheten varierar mot referensvärdet. En metod för att skala referenshållfasthetsparametern är att skala den linjärt mot uppmätt ishållfasthet i område av intresse. Istryckhållfastheten som korrelerar med C_R för Östersjön är $\sigma_k = 2070 \text{ kPa}$. Skalning mellan olika värden ska dock ske med stor försiktighet. T.ex. kan värden uppmätta för oeftergivliga konstruktioner ej användas till eftergivliga konstruktioner. Enligt ISO 19906:2010 kan tryck mot eftergivliga konstruktioner bli större än tryck mot oeftergivliga konstruktioner.

Enligt text ovan framgår att ISO-metodens tillämpning för pålar i svenskt vatten är tveksam. Följande tveksamheter finns:

- Förhållandet $b/d > 2$ täcker enbart in ett begränsat antal pålar i vissa isförhållanden.
- Metoden är framtagen på mätningar huvudsakligen i havsvatten.
- Pålars deformation kan vara större än 10 mm.
- Pålar kan betraktas som eftergivliga konstruktioner.

Enligt Määttänen & Kärnä (2011) är det en begränsning även för offshore-konstruktioner att formeln inte täcker in förhållanden lägre än $b/d > 2$. De menar även på att tillämpning av metoden för förhållanden $b/d < 10$ skulle kunna ge en dimensionering som ej är på säkra sidan. Enligt dem baseras Ekv. 22 huvudsakligen på mätningar för istryck mot breda konstruktioner. Uttrycken underskattar således det tredimensionella spänningsförhållandet. Määttänen & Kärnä (2011) föreslår en modifiering av uttrycket i Ekv. 22 där de väljer att inkludera bredd-/tjockleksförhållandet från Afanasev (1972). Deras formulering för att bestämma det effektiva istrycket ser ut enligt följande:

$$\rho_G = C_R * \left(\left(\frac{d}{d^*} \right)^n * \left(\frac{b}{d} \right)^m + e^{-\frac{b}{3*d}} * \sqrt{1 + 5 * \frac{d}{b}} \right) \quad \text{Ekv. 49}$$

Denna formel har ersatt Ekv. 22 i version två av ISO-standard, ISO 19906:2019. Där framgår att formeln är giltig för förhållandet $b/d > 1$. Om förhållandet är $b/d > 5$ kan uttrycket förenklas och beräknas på motsvarande sätt som i Ekv. 22.

4.1.1.4 Schwarz, et al:s metod

I EAU 2012 presenteras en metod som ej används i de andra skrifterna. Metoderna för att bestämma islast i EAU 2012 baseras huvudsakligen på publikationen *Effect of Ice Thickness on Ice Forces* (Schwarz, et al., 1974) och *An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures* (Hirayama, et al., 1974).

I Schwarz, et al. (1974) framgår hur Ekv. 36 erhållits.

$$I_h = 0,564 * \sigma_k * b^{0,5} * d^{1,1} \quad \text{Ekv. 36}$$

Notera att koefficienten 0,564 är 3,6 i Schwarz, et al. (1974) p.g.a. att andra enheter används.

Metoden är framtagen utifrån modelltester hos Iowa Institute Hydraulic Research. Testerna har utförts för att utreda kraften från is mot vertikala pålar. Pålarna representeras i modellen av cirkulära strukturer med diametern 0,6-11,2 cm. Istjockleken är 0,8-3 cm. Isen pressas mot strukturerna med en hastighet motsvarande så att töjningshastigheten i isen är $0,003 \text{ s}^{-1}$. Isen är skapad med sötvatten och har en temperatur på 0°C .

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Sambandet mellan islast och $b^{0,5}$ visade sig giltigt upp till förhållandet $b/d < 12$. Efter detta gränsvärde blir isen instabil och går till brott via knäckning. Detta genererar dock lägre kraft än när isen går till brott via krossning.

Schwarz, et al. (1974) lyfter fram att det har funnits få fältmätningar att jämföra deras resultat mot. De har jämfört resultaten med Afanasev, et al. (1972) som utfört liknande modellförsök, dock med saltvattenis. Resultaten stämde bra överens. De lyfter dock fram att fler fältmätningar behövs för att jämföra resultaten.

Enligt Schwarz, et al. (1974) kan *Ekv. 36* användas som bas för att bestämma islasten mot vertikala konstruktioner med följande restriktioner:

- Istemperatur runt 0°C.
- Cirkulära pålar
- $b/h \leq 12$

Utöver restriktionerna kan följande aspekter skilja sig mellan modellförsöken och faktiska fall (Schwarz, et al., 1974):

- Kontakt mellan påle och konstruktion. *Ekv. 36* förutsätter att isen driver mot pålen och att full kontakt ej råder mellan påle och is. Om ett istäcke är fastfruset till pålen och därefter börjar driva är islasten uppskattningsvis 50% större.
- Den drivande isens hastighet har inte betraktats som en variabel i metoden. Isens drivhastighet påverkar isens töjningshastighet. Denna är satt till $0,003 \text{ s}^{-1}$ vilket bedöms vara den töjningshastighet som orsakar störst last.
- Skaleffekter är ej beaktade i metoden. Om skaleffekter har betydelse för islasten på pålar är enligt författarna okänt. Skaleffekten beror på förhållandet mellan påldiameter och iskristallernas diameter. Författarna anger att, i brist på information, bör skaleffekten beaktas om förhållandet mellan påldiameter och medeldiameter på iskristallerna är mindre än 10.
- Saltvatten. Metoden är framtagen för sötvatten men enligt Schwarz, et al. (1974) är metoden troligtvis tillämpbar för saltvattenis där ett lägre värde på isens tryckhållfasthet ansätts.

I Hirayama et al. (1974) lyfts fram att metoden även är tillämpbar för rektangulära tvärsnitt. Hirayama et al. (1974) särskiljer på att pålen penetrerar isen jämfört med att pålen bryter isen. När pålen penetrerar isen har pålens tvärsnitt liten betydelse för isens kraft mot konstruktionen. De menar att faktorerna i Korzhavin (1971) och Afanasev (1972) som beaktar tvärsnittets form baseras på brytning av isen istället för penetration av isen.

Hirayama, et al. (1974) menar att det inte är tryckbrott som är den avgörande brottmekanismen för isen. De menar att dragtöjningar uppkommer vinkelrätt mot istäckets plan. Dessa töjningar leder till att isen spricker.

Således finns det en principiell skillnad mellan Korzhavins (1971) och Afanasevs (1972) studier jämfört med Schwarz, et al. (1974) och Hirayama, et al. (1974) då brottmekanism skiljer sig. Korzhavin och Afanasev beskriver brottmekanismen krossning medan Schwarz, et al. och Hirayama, et al. beskriver klyvning som brottmekanism. Detta uppmärksammas bl.a. i Ashton (2004).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I en japansk studie från Hokkaido University av Saeki, et al. (1976) har liknande modellförsök utförts för saltvattenis. Saeki, et al. (1976) kommenterar att deras resultat liknar Schwarz, et al. (1974). Saeki, et al. (1976) föreslår dock en mindre modifikation av uttrycket och föreslår istället följande formel:

$$I_h = 5 * \sigma_k * b^{0,5} * d \quad \text{Ekv. 50}$$

där

I_h är islast i kg.

b är pålens diameter i cm.

d är isens tjocklek i cm.

σ_k är isens tryckhållfasthet i kg/cm².

Skrivs formeln om till de enheter som i övrigt används i denna rapport (b och d i m samt σ_k i kPa) ser den ut på följande sätt:

$$I_h = 0,5 * \sigma_k * b^{0,5} * d \quad \text{Ekv. 51}$$

I modellförsöken av Saeki, et al. (1976) har isen också en töjningshastighet på 0,003 s⁻¹. De anger att isens hållfasthet ska bestämmas i trycktester med cylindriska provkroppar som har diametern 10 cm och höjden 20 cm och med en töjningshastighet på 0,003 s⁻¹. I modellförsöken har objekt med diametern 3-15 cm använts för att återspegla pålar och isen har haft en tjocklek på 3-18 cm. Enligt Saeki, et al. (1976) kan Ekv. 50 användas vid dimensionering av konstruktioner till havs och vid kusten.

Saeki, et al. (1976) har jämfört deras resultat med fältmätningar från Neill (1970) och Schwarz (1970). Mot dessa värden är Ekv. 50 konservativ, se Figur 11. Saeki, et al. (1976) jämförde även Ekv. 50 med Ekv. 36, se Figur 12.

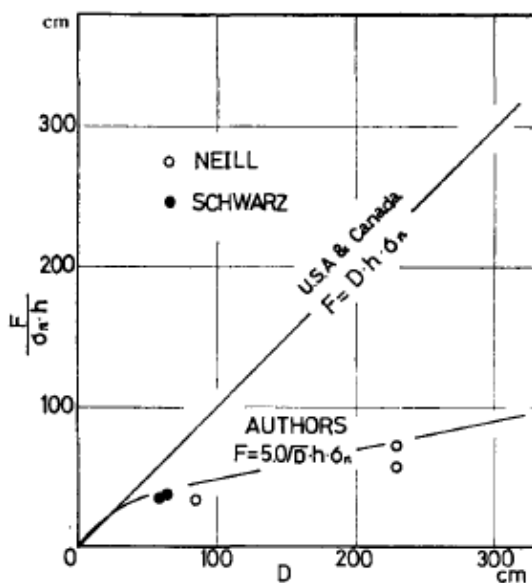
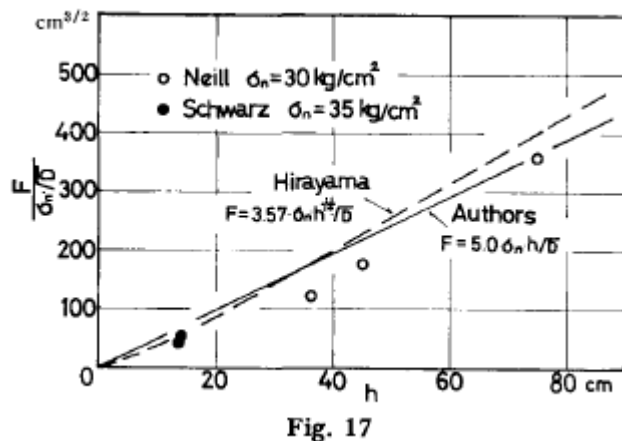


Fig. 16

Figur 11. Jämförelse mellan Ekv. 46 och fältdata från Neill (1970) och Schwarz (1970) samt tidigare metod från kanadensiska och amerikanska bronormerna. Figur från Saeki, et al. (1976).



Figur 12. Jämförelse mellan Ekv. 50 och Ekv. 36. Figur från Saeki, et al. (1976).

4.1.2 Termiskt istryck

Termiskt istryck benämns i samtliga skrifter i kap. 3. I *EAU 2012* behandlas termiskt istryck men det behöver inte tillämpas vid bestämning av islast mot pålar. I *AASHTO LRFD* ges ingen metod för att bestämma termiskt istryck utan skriften hänvisar istället läsaren till att utvärdera detta om det finns risk för stora obalanserade krafter mot bropelaren. I tre av skrifterna ges riktvärden för det termiska istrycket, dessa är:

- *Istryck mot bropelare*: 50-300 kN/m
- *Port Designer's Handbook*: 25-75 kN/m (jämnt fruset istäcke), 100-300 kN/m (ojämnt fruset istäcke).
- *Coastal Engineering Handbook*: 145-200 kN/m (fasta konstruktioner), 73 kN/m (eftergivliga konstruktioner).

I *Håndbok N400*, Ekv. 11, och *Tillaeg DK:2015 Islast*, Ekv. 16, ges metoder för att beräkna det termiska istrycket. Metoderna i sig skiljer sig helt åt. I *CAN/CSA-S6-14* används samma ekvationer som för drivande is dock med ett minsta värde på isens tryckhållfasthet på 1500 kPa.

Enligt *Istryck mot bropelare* är termiskt istryck komplext p.g.a. att isens deformations- och flytegenskaper är variabla samt att det är svårt att definiera de yttre förutsättningarna. Det uppges finnas en klyfta mellan teori och praktiska erfarenheter. Följande faktorer påverkar alla storleken på det termiska istrycket:

- Istjocklek
- Snöfrihet
- Temperatur
- Termiska sprickor
- Mothåll
- Anliggning
- Knäckning

Enligt Korzhavin (1971) har termiskt istryck huvudsakligen påverkan på dimensioneringen av dammar, vallar och andra större konstruktioner medan dynamiskt istryck (drivande is) ofta är dimensionerande för mindre konstruktioner som pålar.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I första kapitlet av *Istryck mot bropelare*, innehållandes riktlinjer, anges att det termiska istrycket kan variera mellan 50-300 kN/m. I det andra kapitlet med fördjupande text kring islast anges att värdet 200 kN/m endast undantagsvis tillämpats. Medelvärde för antaget sidotryck för 14 norrlandsbroar ligger på 32 kN/m. *Istryck mot bropelare* anger dock även att högsta värdet kan uppnås redan vid 0,3 m sötvattenis. Ensidigt istryck blir i regel störst för konstruktioner nära eller intill en öppen strömfåra. Varför intervallet således uppgår till 300 kN/m är ej känt.

Värdena som anges i *Istryck mot bropelare* gäller för sötvattenis. Inga riktvärden ges för saltvattenis. Enligt *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* behöver termiskt istryck bara beaktas i sjöar och i hav med bräckt vatten och sötvatten. I öppet hav med saltvatten kan termiskt istryck försummas för vindkraftverk.

I både *Istryck mot bropelare* och *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* anges att konstruktionens bredd ska sättas till minst 4 m när det termiska istrycket bestäms. Detta minimimått anges inte i NVF:s utkast (se kap. 4.1.1) eller deras publikation *Lastbestemmelser for Vegbruer Rapport nr 4:1980*.

Istryck mot bropelare anger att sötvattenis har en värmeutvidgningskoefficient som är fem gånger större än ståls värmeutvidgningskoefficient vilket leder till stora rörelser eller spänningar vid temperaturändringar. Saltvattenis har en negativ värmeutvidgningskoefficient och således sväller saltvattenis vid avkylning.

Fransson (2009) beskriver processen för termiskt istryck i sötvatten på följande sätt:

1. Sprickor uppkommer när ett begränsat istäcke kyla ned.
2. Sprickorna vattenfylls och fryser under kalla perioder.
3. Istäcket expanderar på ovansidan proportionellt mot temperaturändringen.
4. Iexpansionen orsakar tryck mot alla fasta stöd (strandlinje, öar, konstruktioner).
5. Isen rör sig mot svaga områden (öppet vatten, kanaler, tunn is, breda sprickor).

Denna process kan få istäcken att expandera flera meter under vintern.

Således är termiskt istryck inte enbart kopplat till värmeutvidgningskoefficient och temperaturändringen. Isrörelsen orsakad av temperaturvariationer kan således bli betydligt större utifrån ovan beskriven process.

4.1.3 Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar

Denna typ av islast beaktas i:

- *Istryck mot bropelare*
- *Håndbok N400*.

I båda skrifterna behandlas denna last inom ramen för termiskt istryck.

Enligt *Istryck mot bropelare* är istryck vid vattenståndsväxlingar ett mycket utforskat område. Detta beror på att termiskt istryck ensamt har varit dimensionerande för bropelarens tvärriktning, vilket antagligen i de flesta fall är korrekt. Det uppges vara lätt att bestämma

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

storleken på iskraften för dessa fall med olika modeller av spänn- och valvverkan. Figuren nedan illustrerar hur denna last uppträder.



Figur 13. Illustration av sidokrafter p.g.a. spännverkan vid vattenståndsväxling.
Figur från *Istryck mot bropelare*.

Enligt Lennart Fransson¹ är teoretiska modeller för valvverkan ej relevant i praktiken. På grund av isens viskoelastiska beteende uppkommer ej dessa krafter. Däremot kan vattenståndsväxlingar orsaka att isen spricker. Sprickorna kan vattenfyllas och därefter frysa och därmed orsaka krafter mot konstruktionen. Denna typ av fenomen behandlas inom termiskt istryck.

4.1.4 Tryck från stort istäcke genom ström och vind

Ett större istäcke som är fastfrusen till konstruktionen och som drivs av ström och vind beaktas i:

- *Istryck mot bropelare*
- *Coastal Engineering Handbook*

I *Istryck mot bropelare* beaktas denna last inom samma metod som gäller för drivande is, Ekv. 2. I *Coastal Engineering Handbook* finns en specifik metod, Ekv. 32. Dock anges att lasten mot mindre konstruktioner, som t.ex. pålar, begränsas av lokal krossning, Ekv. 33. En liknande metod som Ekv. 32 finns i *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads*.

Enligt *Istryck mot bropelare* är denna typ av islast i regel inte dimensionerande för bropelare till skillnad från t.ex. fyrar. För fyrar i öppen sjö kan istäcket i sin helhet försättas i rörelse och krossas mot fyren.

4.1.5 Tryck från packis

I engelskspråkig litteratur används uttrycken "ice ridge" och "ice jam". Fenomenet "ice jam" är troligtvis den typ av packis, eller isansamling, som beaktas i *Istryck mot bropelare*. Fenomenet "ice ridge" är en typ av packis som främst förekommer i öppet vatten där isblock lägger sig på varandra och i princip bildar isberg.

I text nedan används benämningen "isansamling" för "ice jam" samt "packis" för "ice ridge".

Enligt *Istryck mot bropelare* innefattar uttrycken för drivande is även trycket från isansamling. Det rekommenderas dock att placera broöverbyggnaden på en nivå så att denna inte kan nås av den ansamlade isen.

¹ Lennart Fransson, isexpert, LTU, telefonsamtal, 2020-04-16.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

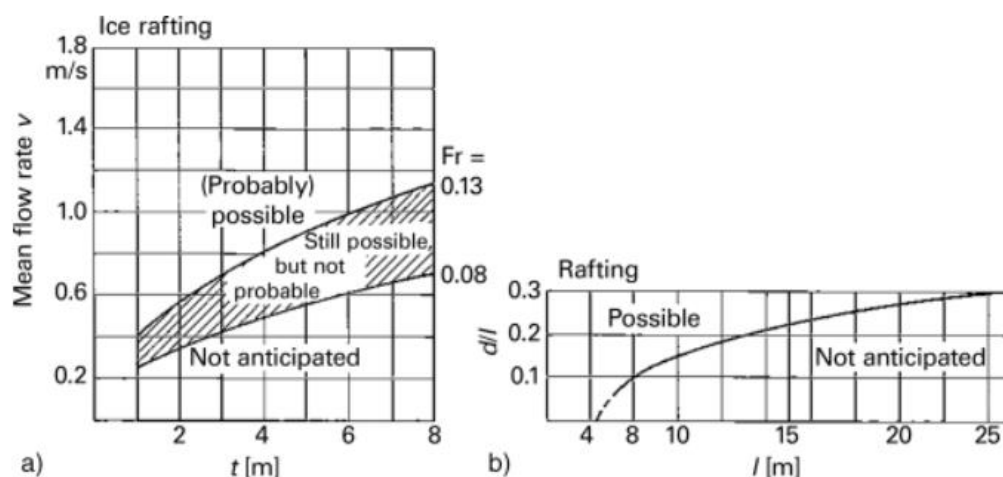
I *CAN/CSA-S6-14* beaktas isansamling genom att dimensionera konstruktionen för ett tryck på 10 kPa (5 kPa vid längre spann än 30 m). Trycket ska placeras på en nivå ovanför vattennivån och verka på en sträcka motsvarande förväntad tjocklek på isansamlingen. Motsvarande metod anges i *AASHTO LRFD*.

I *EAU 2012* framgår att om risken för packis eller isansamling finns ska islastens storlek dubblas. I *Tillæg DK:2015 Islast* beaktas isansamling genom att kontaktfaktorn, k_z , kan sättas till 1,5.

Korzhavin (1971) lyfter även fram vikten av att konstruktioner ska utformas så att isansamling förhindras. För t.ex. broar i floder ska stöden placeras på ett sådant avstånd att ansamling av is inte uppkommer.

I *Håndbok N400* är utformningen av konstruktionen direkt kopplad till islastens storlek. Om $L/b < 5$ blir den effektiva bredden betydligt större och således ökas islasten mot konstruktion, där L är avstånd mellan konstruktioner och b är pelarens bredd.

I *Port Designer's Handbook* framgår det att en enskild påle inte påverkas av omkringliggande pålar om dess avstånd/bredd-förhållande uppfyller $L/b > 5$. Om förhållandet underskrids påverkas dock inte islastens storlek i beräkningarna. I *EAU 2012* presenteras diagram som kan användas för att bedöma risken för isansamling, se *Figur 14*.



Figur 14. Diagram från EAU 2012. Diagrammen kan användas för att bedöma risken för isansamling. Diagram a) presenteras risken utifrån flödeshastighet (v) och vattendjup (t) medan diagram b) presenteras risken utifrån pelarbredd (d) och pelaravstånd (l).

I *ISO 19906:2019* anges att isansamling kan förväntas om $L/b < 4$.

En utförlig beskrivning om packis finns presenterad i *ISO 19906:2019; A.8.2.4.5* samt *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads; 2.3*.

4.2 Vertikal islast

I samtliga riktlinjer presenterade i kap. 3 finns metoder för att bestämma vertikal uppåtriktad islast.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Metoderna för att bestämma vertikal islast är liknande i *Istryck mot bropelare* som *Håndbok N400*. Metoderna gäller enbart för lyftkraft. Ingen metod anges för nedåtriktad vertikal kraft. I *Port Designer's Handbook* framgår det att de presenterade figurerna bygger på personlig kommunikation med Löfquist. Värdena i *Figur 8*, som gäller för *Port Designer's Handbook*, erhålls med *Ekv. 6*, som gäller för *Istryck mot bropelare*. Dock är kopplingen mellan *Figur 9* och *Ekv. 7* ej lika uppenbar.

Enligt *Istryck mot bropelare* baseras islasten mot väggar, *Ekv. 5* och *6*, på teorin om balkar/plattor på en elastisk bädd. Där kraften mot väggen beräknas utifrån istäckets förskjutning i förhållande till den fastfrusna delen mot väggen.

För ensamstående pålar eller dykdalber är, enligt *Istryck mot bropelare*, lyftkraften nästan identisk med isens bärförmåga för en koncentrerad last. *Ekv. 7* är en omskrivning av nedanstående formel:

$$I_v = K_v * \sigma_b * d^2 \quad \text{Ekv. 52}$$

där

K_v är en faktor för koncentrerad last som varierar mellan 0,3-0,8.

P.g.a. osäkerheten i faktorerna K_v och isens böjhållfasthet, σ_b , används den sammanslagna faktorn A som baseras på $K_v = 0,8$ och $\sigma_b = 2000 \text{ kPa}$ för sötvattenis och $\sigma_b = 1000 \text{ kPa}$ för saltvattenis.

En annan metod för att bestämma den vertikala lyftkraften anges i *Tillaeg DK:2015 Islast*. Metoden som anges i *Ekv. 18* baseras på Tryde (1983). Det noteras i *Istryck mot bropelare* att om $b = d$ i *Ekv. 18* erhålls *Ekv. 52* med $K_v = 0,8$.

Enligt ovan resonemang finns det en klar likhet mellan *Ekv. 7* och *Ekv. 18*. Dock är det stor skillnad i vilken böjhållfasthet som rekommenderas att användas. Som ovan nämnt motsvarar A -värdet i *Istryck mot bropelare* en böjhållfasthet på 2000 kPa (sötvattenis) respektive 1000 kPa (saltvattenis) medan *Tillaeg DK:2015 Islast* rekommenderar en böjhållfasthet på 500 kPa både för söt- och saltvattenis.

Notera att för pålar med förhållandet $b/d > 7$ rekommenderar *Tillaeg DK:2015 Islast* en metod, *Ekv. 19*, som är snarlik med *Ekv. 5*.

Tryde (1983) anger att hans formel är delvis empirisk. Den bygger bl.a. på statistik från en studie gällande lyftna pålar vintern 1978/1979. I studien deltog 93 danska hamnar som totalt omfattar ca 30 500 st pålar. Av dessa hade ca 4000 st lyft och ca 230 st var förstörda. Genom att använda isförhållandena från den vintern och statistiken från hamnarna har Tryde kommit fram till sin föreslagna formel. Notera att Tryde (1983) anger att medelvärde för isens böjhållfasthet i danskt vatten är 500 kPa. I *Tillaeg DK:2015 Islast* anges 500 kPa som isens karakteristiska böjhållfasthet med en återkomstperiod på 50 år.

Både *Ekv. 7* och *Ekv. 18* gäller uttryckligen för pålar. Även uttrycket i *EAU 2012, Ekv. 42*, gäller uttryckligen för pålar. Metoden är hämtad från den ryska standarden *SNiP*. I *EAU 2012* framgår det att två tyska rapporter stödjer att denna metod ska tillämpas för pålar.

Ekv. 29 och *Ekv. 30* används för att beräkna den vertikala islasten mot cirkulära respektive avlånga bropelare i *CAN/CSA-S6-14* och *AASHTO LRFD*. Likt *Ekv. 6* baseras dessa metoder på att

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

isen representeras av en platta på ett elastiskt underlag. Utifrån denna modell kan en brottlast deriveras fram. Ekvationerna baseras på Nevel (1972) som använder följande uttryck för att beskriva en maximal vertikal kraft på ett kilformat istäcke:

$$I_v = \frac{\tan\left(\frac{\delta}{2}\right) * \sigma_t * d^2}{3} * \left(1,05 + 2 * \left(\frac{a_b}{l_{c,b}}\right) + 0,5 * \left(\frac{a_b}{l_{c,b}}\right)^3\right) \quad \text{Ekv. 53}$$

där

δ är vinkeln på den avskurna kilen m.a.o. där isen är i kontakt med konstruktionen (°).

σ_t är isens draghållfasthet (kPa).

a_b är sträckan för den avskurna iskilen, för en cirkulär pelare motsvarar detta radien (m).

$l_{c,b}$ är karakteristisk längd m.a.p. böjning (m).

Den karakteristiska längden för böjning beräknas enligt:

$$l_{c,b} = \left(\frac{10^9 * E * d^3}{12 * \rho_w * g}\right)^{0,26} \quad \text{Ekv. 54}$$

där

E är isens elasticitetsmodul (MPa).

ρ_w är vattnets densitet (kg/m³).

g är gravitationskonstanten (m/s²).

Ekv. 29 erhålls genom att summera fyra iskilar, alla med en vinkel $\delta = 90^\circ$. Isens draghållfasthet antas vara 0,84 gånger en tryckhållfasthet på 1100 kPa. Förhållandet $a_b/l_{c,b}$ antas vara mindre än 0,6. Uttrycket förenklas också något genom att försumma termen $\left(\frac{a_b}{l_{c,b}}\right)^3$.

Ett motsvarande tillvägagångssätt används för att bestämma Ekv. 30. Dock används ett annat uttryck längs pelarnas raka sidor.

Metoden bygger på de konservativa antagandena att isen är helt fastfrusen runt pålen och att ingen krypning sker vid långsamt stigande vatten. Dock bygger metoderna på det icke-konservativa antagandet att isen går till brott då första sprickan uppkommer (AASHTO LRFD, 2018). Hur väl dessa ekvationer lämpar sig för pålar istället för bropelare är ej känt.

Kerrs (1975) metod som presenteras i *Coastal Engineering Handbook* gäller specifikt för cirkulära pålar. Även denna metod är framderiverad och bygger på att isen beter sig elastiskt fram till brott. Det finns en praktisk problematik att använda denna metod då isens elasticitetsmodul behöver bestämmas samt att det inte finns någon övre gräns för vattnets stighöjd.

I en rapport av Christensen & Zabilansky (1985) beskrivs brottmoderna för vertikalt verkande islast mot pålar närmare. Enligt dem kan isen gå till brott på tre möjliga sätt:

- Skjuvbrott mellan is och påle. Brottmoden styrs av isens adhesion mot pålen. Denna uppträder sällan för obehandlade pålar av stål, betong eller trä.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- Skjuv-krypbrott. Denna brottmod liknar skjuvbrottet men uppkommer vid väldigt långsamma vattennivåförändringar.
- Böjbrott. Sker ofta vid snabba vattennivåskillnader och orsakar radiella sprickor från pålen. En iskrage lämnas ofta kvar på pålen vid denna typ av brott.

För vinkraftverksfundament rekommenderas i *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads*, en metod där den vertikala islasten bestäms som det minsta värdet för skjuvbrott, $I_{v,\tau}$, respektive böjbrott, $I_{v,b}$. Böjbrottet bestäms med en metod som i stort är densamma som Nevel (1972):

$$I_{v,b} = 1,5 * \sigma_f * d^2 * \left(1,05 + 2 * \frac{r}{l_{c,b}} + 0,5 * \left(\frac{r}{l_{c,b}} \right)^2 \right) \quad \text{Ekv. 55}$$

Isens böjhållfasthet, σ_f , rekommenderas att inte vara mindre än $0,26 * \sigma_k$. I detta fall bestäms den karakteristiska böjlängden på följande sätt:

$$l_{c,b} = \frac{E * d^3}{12 * (1 - \nu^2) * \rho_w * g} \quad \text{Ekv. 56}$$

Islasten med avseende på skjuvbrott bestäms för ett cirkulärt tvärsnitt som skjuvstyrkan gånger kontaktarean:

$$I_{v,\tau} = 2 * r * \pi * d * \tau \quad \text{Ekv. 57}$$

där

τ är skjuvstyrkan mellan material och is. Den sätts till 800 kPa för stål-sötvatten, 300 kPa för stål-saltvatten och till 1000 kPa för betong-saltvatten.

4.3 Isens tjocklek

I alla riktlinjer som studerats i kap. 3 behövs istjockleken som indata vid bestämning av islastens storlek.

I *Istryck mot bropelare* ges inga direkta rekommendationer kring val av istjocklek. I *Håndbok N400* och *EAU 2012* ges metoder, Ekv. 9 respektive Ekv. 41, för att beräkna istjockleken. I båda fall behövs information för lufttemperaturen i området. *EAU 2012* anger även att islasten ska bestämmas utifrån den maximala istjockleken. I *Tillaeg DK:2015 Islast* presenteras en istjocklek som ska motsvara en återkomstperiod på 50 år, dock betonas att istjockleken ska bestämmas utifrån lokala förhållanden.

Enligt den rådande texten i *AASHTO LRFD* är istjockleken den främsta okända variabeln vid bestämmande av islast. *AASHTO LRFD* menar på att den föredragna metoden för att bestämma istjocklek är att använda sig av maximal istjocklek baserat på mätningar under en längre period. Om denna statistik inte finns tillgänglig kan en formel användas för att beräkna istjockleken. Denna formel liknar dem presenterade i *EAU 2012* och *Håndbok N400*.

I kapitel 3 i *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* finns en utförlig sammanställning om isens förekomst och tjocklek i olika områden i Sverige.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Enligt *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* ska istjockleken bestämmas baserat på tillgänglig statistik. Det anges följande om val av istjocklek; i sjöar och i kustområden rör sig vanligtvis inte istäcken efter att de nått en viss tjocklek. Laster som härrör från is som rör sig ska beaktas med denna tjocklek. Laster från termiskt istryck, bågverkan och vertikalt lyft ska kontrolleras för en större istjocklek p.g.a. senare tillväxt.

Exempelvis för vindkraftverk i öppet hav ska istjockleken väljas för en återkomstperiod på 50 år. För vindkraftverk i skärgården och i sjöar ska istjockleken för is i rörelse motsvara "normala vintrar" medan islaster orsakade av fast istäcke ska motsvara en återkomstperiod på 50 år.

4.4 Isens hållfasthet

Värdena på isens tryckhållfasthet som anges i de olika riktlinjerna varierar mellan 400 kPa och 2800 kPa.

Enligt *Istryck mot bropelare* är isens hållfasthet bl.a. beroende av temperatur, istyp och krafteriktning. Tryckhållfastheten ökar väsentligt vid lägre temperatur, dock blir isen även sprödare vid lägre temperatur. Sötvattenis har generellt högre hållfasthet än saltvattenis.

Den rådande texten i *AASHTO LRFD* resonerar kring de värden som anges för tryckhållfastheten. Värdena som anges är för en effektiv tryckhållfasthet som är till för att stoppa in i formeln för att beräkna iskraften. För andra formler kan andra värden på tryckhållfastheten behövas. Som riktlinje är värdet 400 kPa relevant för pelare i vatten där det finns lång erfarenhet av att islasterna bör vara minimala medan 1500 kPa kan anses vara en rimlig övre gräns, baserat på broar som har motstått islaster under en lång tid. Effektiv ishållfasthet på upp till 2800 kPa har använts vid dimensionering av bropelare i Alaska. Ishållfastheten är till stor del beroende av temperatur och porstruktur. De effektiva tryckhållfastheter som anges i *AASHTO LRFD* är inte representativa med värden som erhållits från laboratorieförsök. I praktiken är isbrott beroende av sprickor och imperfektioner i isen.

Tryckhållfastheterna som anges i de nordamerikanska skrifterna, *AASHTO LRFD*, *CAN/CSA-S6-14* och *Coastal Engineering Manual* är snarlika varandra.

I *EAU 2012* betonas vikten av töjningshastigheten vid bestämmande av isens tryckhållfasthet. Tryckhållfastheten ska bestämmas vid en specifik töjningshastighet på $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$. Denna töjningshastighet ger högst tryckhållfasthet då isen övergår från segt brott till sprött brott. I en äldre version av handboken, *EAU 96*, står det att isens tryckhållfasthet ska bestämmas med en specifik töjningshastighet på $\dot{\epsilon} = 0,003 \text{ s}^{-1}$. Detta är även den töjningshastighet som omnämns i Schwarz, et al. (1974).

Notera att i *CAN/CSA-S6-14* rekommenderas att en högre tryckhållfasthet används för att även beakta termiskt istryck.

I *Tillaeg DK:2015 Islast* framgår det att angiven tryckhållfasthet gäller för en returperiod på 50 år. Enligt COWI (2014) är detta värde interpolerat från dimensioneringsförutsättningarna till Öresundsbron.

Isens böjhållfasthet används som indata för att bestämma den vertikala islasten i *Ekv. 17* och *18* för *Tillaeg DK:2015 Islast* samt i *Ekv. 6* för *Istryck mot bropelare*. Böjhållfastheten används även indirekt i *Ekv. 7*.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

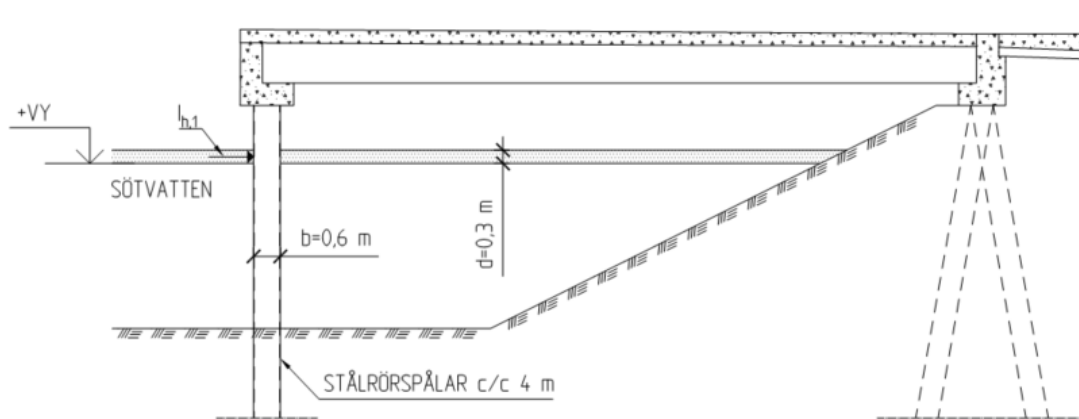
I *Istryck mot bropelare* föreslås att maximala värden på isens böjhållfasthet används. Dessa uppgår till 2000 kPa för sötvattenis och 1000 kPa för saltvattenis. Dessa värden är höga i jämförelse med böjhållfastheten i *Tillæg DK:2015 Islast* som uppgår till 500 kPa och ska gälla både för sötvatten och saltvatten. I *Håndbok N400* sätts isens böjhållfasthet till 70% av tryckhållfastheten.

5 Jämförelse riktlinjer och metoder

I detta kapitel presenteras jämförelseberäkningar mellan de olika riktlinjerna i kap. 3 och två metoder presenterade i kap. 4.

5.1 Jämförelse riktlinjer – beräkning 1

Islasten beräknas fram utifrån de riktlinjer som presenteras i kap. 3. Ett typfall definieras med en påldäckskaj i sötvatten. Kajen antas befinna sig i ett klimat motsvarande Stockholms klimat. Pålarna är stålörspålar med diametern 0,6 m (inklusive eventuellt isskydd) och ett c/c-avstånd på 4 m. Istjockleken uppgår till 0,3 m. Islasten antas enbart verka i en riktning åt gången. Dessa förutsättningar presenteras i *Figur 15*.



Figur 15. Kaj med pålar i vatten. Typfall för jämförelse av riktlinjer.

5.1.1 Tillvägagångssätt, antaganden och resultat

Nedan ges en sammanställning av förutsättningar och resultat för respektive riktlinje. Fullständiga beräkningar presenteras i Bilaga A

Istryck mot bropelare

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Termiskt istryck beräknas enligt *Ekv. 1* där i_1 ansätts till 200 kN/m för att även beakta tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar. Då pålens bredd är mindre än 4 m ansätts b till 4 m för att bestämma lastens storlek.
2. Drivande is beräknas med både *Ekv. 2* och *Ekv. 3*. Högst värde används då det är svårt att avgöra hur sönderdelad isen är. För *Ekv. 2* ansätts i_2 till 20 kN/m (medelvärde). För *Ekv. 3* ansätts isens tryckhållfasthet till 700 kPa då varken saltvattenis eller starkare isgång anses stämma in på detta fall.
3. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 7* där faktorn A ansätts till 1600 kPa. Den bestäms även som 1/3 av värdet beräknat i punkt 1 för att beakta spännverkan/valvverkan.
4. Den vertikala islasten är enbart uppåtriktad.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 800 kN (last från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- Horisontell islast från drivande is: 126 kN.
- Vertikal islast: 267 kN (uppåtriktad).

Håndbok N400 Bruprosjektering

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is bestäms med *Ekv. 8*. Isens hållfasthetskoefficient är bestämd till 1800 kPa.
2. Vid termisk islast beräknas istrycket med *Ekv. 11*. Den lägsta dygnsmedeltemperaturen T med returperiod på 50 år antas vara -25°C .
3. Den vertikala islasten är enbart uppåtriktad och beräknas med *Ekv. 12* och *Ekv. 7*. Lägst värde tillämpas då *Ekv. 7* anges vara en förenklad metod. Vattennivåhöjningen antas lika isens tjocklek, 30 cm (antagande).

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 493 kN (last från drivande is).
- Horisontell islast från drivande is: 493 kN.
- Vertikal islast: 38 kN (uppåtriktad).

Tillaeg DK:2015 Islast

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is beräknas med *Ekv. 14*. Tryckhållfastheten ansätts till 1900 kN enligt *Tabell 6*.
2. Kontaktfaktorn k_2 ansätts till 1,0 (för is fastfruset till konstruktionen). Fast istäcke bedöms kunna uppträda runt pålarna.
3. Termiskt istryck beräknas med *Ekv. 16*.
4. Vertikal islast bestäms med *Ekv. 18*. Böjhållfastheten ansätts till 500 kPa enligt *Tabell 6*. Den nedåtriktade kraften uppgår till halva värdet av uppåtriktad kraft.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 576 kN (last från drivande is).
- Horisontell islast från drivande is: 576 kN.
- Vertikal islast: 43 kN (uppåtriktad), 22 (nedåtriktad).

Port Designer's Handbook

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is beräknas med *Ekv. 2* och *Ekv. 21*. Högst värde tillämpas. *Ekv. 20* används inte då ett utbrett istäcke anses ge samma belastning som *Ekv. 2*.
2. För *Ekv. 22* ansätts hållfasthetskoefficienten till 1800 kPa (Östersjön).
3. Vid bestämning av det termiska istrycket ansätts i_1 till 200 kN/m (medelvärde).
4. Vertikal islast bestäms med *Figur 9*.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 493 kN (last från drivande is).
- Horisontell islast från drivande is: 493 kN.
- Vertikal islast: 132 kN (uppåtriktad).

CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code

Tillvägagångssätt och antaganden:

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 24*. Pålen är vertikal således ska ej *Ekv. 25* och *Ekv. 26* beaktas. Tryckhållfastheten ansätts till 700 kPa (islossning runt smältpunkten, isen delvis sönderdelad).
2. Termiskt istryck beaktas genom att använda samma formler som för drivande is men med en tryckhållfasthet på 1500 kPa.
3. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 29* (cirkulära pelare). Det antas att lasten kan vara både nedåtriktad och uppåtriktad då inget annat anges.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 506 kN (termiskt istryck)
- Horisontell islast från drivande is: 236 kN.
- Vertikal islast: 129 kN (uppåtriktad och nedåtriktad)

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 24*. Pålen är vertikal således ska ej *Ekv. 25* beaktas. Tryckhållfastheten ansätts till 700 kPa (islossning runt smältpunkten, isen delvis sönderdelad).
2. Termiskt istryck beaktas inte då ingen metod för att beräkna islasten anges.
3. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 29* (cirkulära pelare). Det antas att lasten kan vara både nedåtriktad och uppåtriktad då inget annat anges.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 236 kN (last från drivande is).
- Horisontell islast från drivande is: 236 kN.
- Vertikal islast: 129 kN (uppåtriktad och nedåtriktad)

Coastal Engineering Manual

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från sammanhängande istäcke som påverkas av vind eller vågor, *Ekv. 32*, försummas då det framgår att denna ej är dimensionerande för mindre konstruktioner som pålar.
2. Last där isen går till krossning beräknas med *Ekv. 33*. Isens tryckhållfasthet ansätts till 700 kPa (islossning sker runt smältpunkten och isen är mycket sönderdelad).
3. Den vertikala islasten bestäms med *Figur 10*. Isens elasticitetsmodul antas vara 30 000 kg/cm² (medelvärde) och vattennivåhöjningen antas lika isens tjocklek, 30 cm (antagande).

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 212 kN (krossning av istäcke).
- Horisontell islast från drivande is: 212 kN.
- Vertikal islast: 67 kN (uppåtriktad och nedåtriktad).

Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 36*. Kontaktfaktorn k_6 antas till 0,793 (fastfrusen is). Fast istäcke bedöms kunna uppträda runt pålarna.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

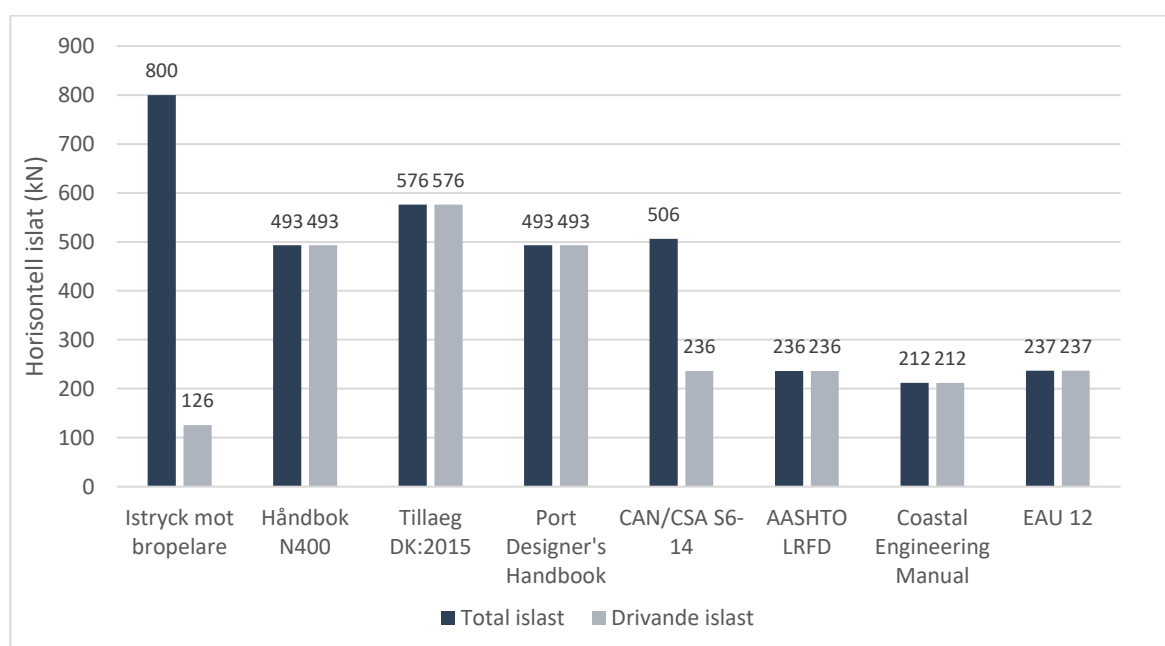
- Isens tryckhållfasthet beräknas med *Ekv. 39*. Temperaturen på isens ovansida antas vara -1°C . Detta ger en tryckhållfasthet på 1450 kPa.
- Den vertikala islasten bestäms med *Ekv. 42*.

Resultat:

- Maximal horisontell islast: 237 kN (drivande is).
- Horisontell islast från drivande is: 237 kN.
- Vertikal islast: 47 kN (uppåtriktad och nedåtriktad).

5.1.2 Sammanställning resultat

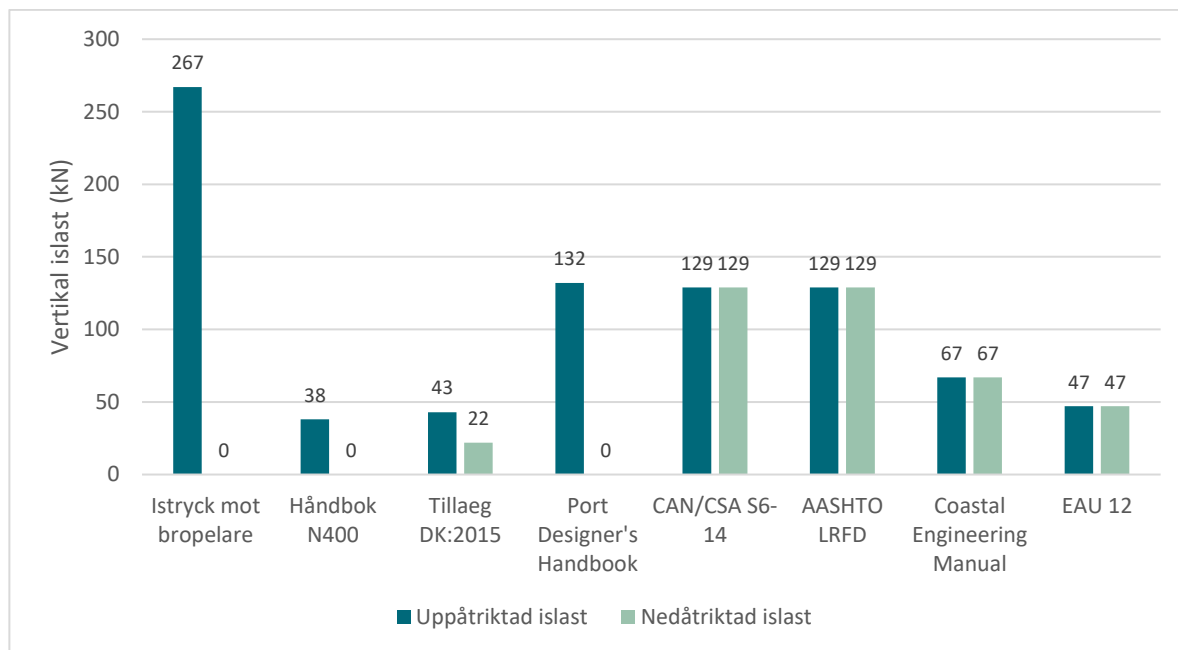
I figurerna nedan redovisas en jämförelse av resultaten.



Figur 16. Jämförelse av horisontell islast. Den totala islasten redovisas i den vänstra stapeln och islasten m.a.p. drivande is redovisas bredvid.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 17. Jämförelse av vertikal islast. Den uppåtriktade islasten redovisas i den vänstra stapeln och den nedåtriktade islasten redovisas bredvid.

Både avseende horisontell och vertikal islast ger riktlinjerna en spridning i värden. Resultatet påverkas stort av vilken tryckhållfasthet som ansätts för isen.

Istryck mot bropelare ger det högsta lastvärdet i horisontell riktning. Detta beror på skrivelsen att pelarens bredd ska sättas till minst 4 m vid tillämpning av *Ekv. 1*. Frångås denna skrivelse och bredden istället sätts till konstruktionens bredd, $b=0,6$ m, sjunker denna last till 120 kN och istället blir den drivande isen dimensionerande (126 kN). *Istryck mot bropelare* blir då istället minst konservativ.

Lika stor horisontell last erhålls från *Håndbok N400* och *Port Designer's Handbook*. Dessa riktlinjer bygger på samma metod och indata.

I sex av åtta riktlinjer är den drivande isen dimensionerande i horisontell riktning. Metoden för drivande is är identisk i *Tillaeg DK:2015 Islast* och *Coastal Engineering Manual* när kontaktfaktorn k_2 ansätts till 1,0 i den danska normen. Den stora skillnaden i erhållna värden mellan dessa riktlinjer beror på olika hållfasthetsvärden på isen.

CAN/CSA-S6-14 genererar högre islast än *AASHTO LRFD* då termiskt istryck beaktas. För drivande is genererar både de nordamerikanska normerna värden som ligger i närheten av *Coastal Engineering Manual* och *EAU 2012*. Metoden i *EAU 2012* skiljer sig från de nordamerikanska riktlinjer men ger i detta fall liknande värden.

I vertikal uppåtriktad riktning genererar *Istryck mot bropelare* den klart största lasten. Återigen påverkas värdet i stor utsträckning av skrivelsen om minsta bredden på 4 m. Försummas denna erhålls fortfarande högst lastvärde men i storleksordning med de andra riktlinjerna. *Håndbok N400* ger lägst värden avseende den lyftande lasten. Metoderna i *Håndbok N400* liknar i stor grad metoderna i *Istryck mot bropelare*. Dock är lasten för cirkulära pelare och pålar ej helt bunden till *Ekv. 7*.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Metoderna i *Tillaeg DK:2015 Islast, Coastal Engineering Manual* och *EAU 2012* för den lyftande lasten skiljer sig åt men ger för detta fall snarlika värden.

Det finns tre tillvägagångssätt för att hantera vertikal nedåtriktad islast. Antingen sätts den till samma värden som den uppåtriktade lasten, eller till halva värdet alternativt försummas helt.

5.2 Jämförelse riktlinjer – beräkning 2

I detta avsnitt studeras ett annat typfall. Detta typfall utgörs av ett ledverk. Ledverk är vanlig marin konstruktion med syfte att hålla fartyg i kurs och skydda bakomliggande konstruktioner från påkörning. Konstruktionen har energiupptagningsförmåga både i fendersystemet och i pålarnas eftergivlighet. Flertalet av denna konstruktion finns t.ex. längs Trollhätte kanal. Farleden hålls isfri vintertid.

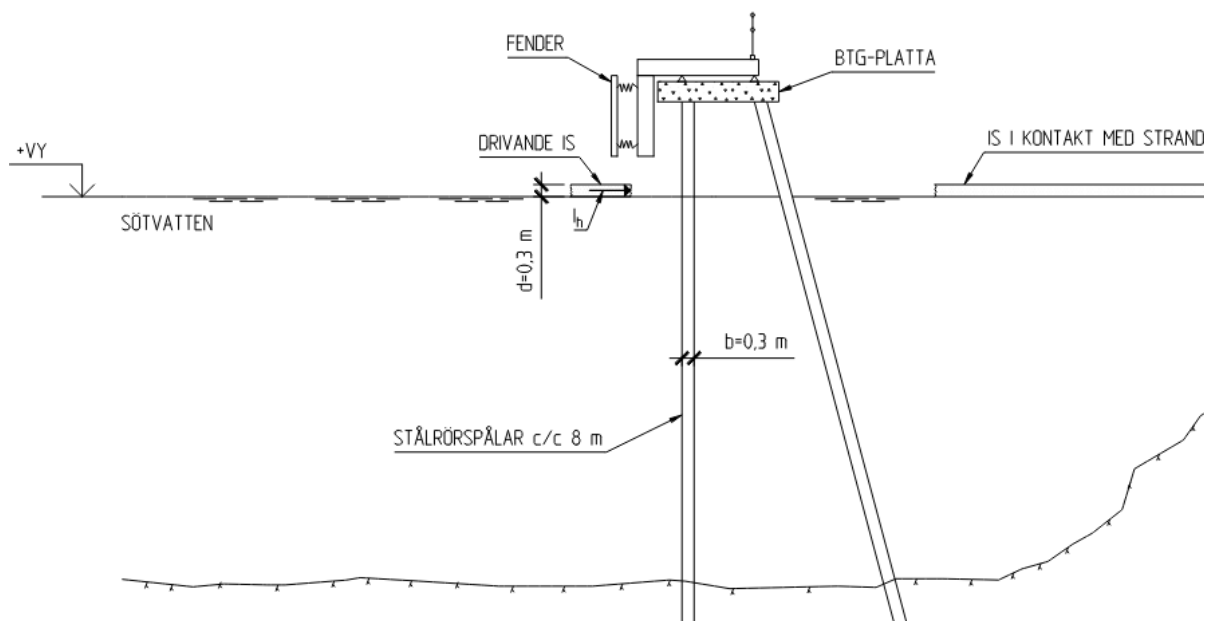
Pålarna har diametern 0,3 m och ett c/c-avstånd på 8 m. Istjockleken uppgår till 0,3 m. Islasten antas enbart verka i en riktning åtgången. Dessa förutsättningar presenteras i *Figur 18*.

Av erfarenhet har i många fall denna typ av konstruktion enbart dimensionerats för drivande is i Sverige. Således antas i denna jämförande beräkning att enbart drivande is är aktuellt.

Att termiskt istryck har försummats för ledverken i Trollhätte kanal har motiverats med att:

- Eftergivligheten i konstruktionen kan ta upp en viss förskjutning p.g.a. termiska rörelser.
- Avståndet till stranden är litet varför isens tvångsförskjutning av pålgruppen blir begränsad och isen fördelar sitt mothåll mot stranden vilket medför att termiskt istryck vinkelrätt farleden blir litet.

Notera att för denna typ av konstruktion är lasten från påtörning betydligt större än islasten.



Figur 18. Ledverk med pålar i vatten. Typfall för jämförelse av riktlinjer.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

5.2.1 Tillvägagångssätt, antaganden och resultat

Fullständiga beräkningar presenteras i Bilaga A. Nedan ges en sammanställning av förutsättningar och resultat för respektive riktlinje.

Istryck mot bropelare

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Drivande is beräknas med både *Ekv. 2* och *Ekv. 3*. Högst värde används då det är svårt att avgöra hur sönderdelad isen är. För *Ekv. 2* ansätts i_2 till 20 kN/m (medelvärde). För *Ekv. 3* ansätts isens tryckhållfasthet till 700 kPa då varken saltvattenis eller starkare isgång anses stämma in på detta fall.
2. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 7* där faktorn A ansätts till 1600 kPa.
3. Den vertikala islasten är enbart uppåtriktad.

Resultat:

- Horisontell islast: 82 kN
- Vertikal islast: 144 kN (uppåtriktad).

Håndbok N400 Bruprosjektering

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is bestäms med *Ekv. 8*. Isens hållfasthetskoefficient är bestämd till 1800 kPa.
2. Den vertikala islasten är enbart uppåtriktad och beräknas med *Ekv. 12* och *Ekv. 7*. Lägst värde tillämpas då *Ekv. 7* anges vara en förenklad metod. Vattennivåhöjningen antas lika isens tjocklek, 30 cm (antagande)

Resultat:

- Horisontell islast: 275 kN
- Vertikal islast: 19 kN (uppåtriktad).

Tillaeg DK:2015 Islast

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is beräknas med *Ekv. 14*. Tryckhållfastheten ansätts till 1900 kN enligt *Tabell 6*.
2. Kontaktfaktorn k_2 ansätts till 0,5 (för is i rörelse).
3. Vertikal islast bestäms med *Ekv. 18*. Böjhållfastheten ansätts till 500 kPa enligt *Tabell 6*. Den nedåtriktade kraften uppgår till halva värdet av uppåtriktad kraft.

Resultat:

- Horisontell islast: 189 kN.
- Vertikal islast: 36 kN (uppåtriktad), 18 (nedåtriktad).

Port Designer's Handbook

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Last från drivande is beräknas med *Ekv. 2* och *Ekv. 21*. Högst värde tillämpas. *Ekv. 20* används inte då ett utbrett istäcke anses ge samma belastning som *Ekv. 2*.
2. För *Ekv. 22* ansätts hållfasthetskoefficienten till 1800 kPa (Östersjön). Inget hållfasthetsvärde finns tillgängligt för västra Sverige kopplat till denna metod.
3. Vertikal islast bestäms med *Figur 9*.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Resultat:

- Horisontell islast: 275 kN.
- Vertikal islast: 85 kN (uppåtriktad).

CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 24*. Pålen är vertikal således ska ej *Ekv. 25* och *Ekv. 26* beaktas. Tryckhållfastheten ansätts till 700 kPa (islossning runt smältpunkten, isen delvis sönderdelad).
2. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 29* (cirkulära pelare). Det antas att lasten kan vara både nedåtriktad och uppåtriktad då inget annat anges.

Resultat:

- Horisontell islast: 154 kN.
- Vertikal islast: 124 kN (uppåtriktad och nedåtriktad)

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 24*. Pålen är vertikal således ska ej *Ekv. 25* beaktas. Tryckhållfastheten ansätts till 700 kPa (islossning runt smältpunkten, isen delvis sönderdelad).
2. Den vertikala islasten beräknas med *Ekv. 29* (cirkulära pelare). Det antas att lasten kan vara både nedåtriktad och uppåtriktad då inget annat anges.

Resultat:

- Horisontell islast: 154 kN.
- Vertikal islast: 124 kN (uppåtriktad och nedåtriktad)

Coastal Engineering Manual

Tillvägagångssätt och antaganden:

1. Lasten från sammanhängande istäcke som påverkas av vind eller vågor, *Ekv. 32*, försummas då det framgår att denna ej är dimensionerande för mindre konstruktioner som pålar.
2. Last där isen går till krossning beräknas med *Ekv. 33*. Isens tryckhållfasthet ansätts till 700 kPa (islossning sker runt smältpunkten och isen är mycket sönderdelad).
3. Den vertikala islasten bestäms med *Figur 10*. Isens elasticitetsmodul antas vara 30 000 kg/cm² (medelvärde) och vattennivåhöjningen antas lika isens tjocklek, 30 cm (antagande).

Resultat:

- Horisontell islast: 139 kN.
- Vertikal islast: 67 kN (uppåtriktad och nedåtriktad).

Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012

Tillvägagångssätt och antaganden:

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

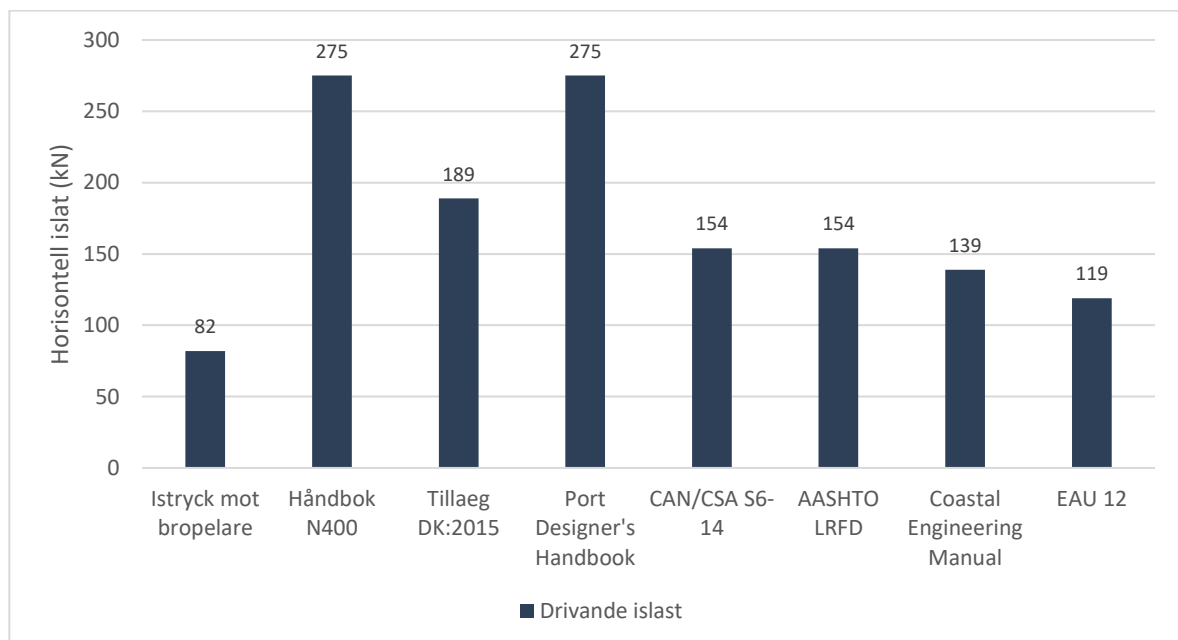
1. Lasten från drivande is beräknas med *Ekv. 36*. Kontaktfaktorn k_6 antas till 0,564 (drivande is).
2. Isens tryckhållfasthet beräknas med *Ekv. 39*. Temperaturen på isens ovansida antas vara -1°C . Detta ger en tryckhållfasthet på 1450 kPa.
3. Den vertikala islasten bestäms med *Ekv. 42*.

Resultat:

- Horisontell islast: 119 kN.
- Vertikal islast: 39 kN (uppåtriktad och nedåtriktad).

5.2.2 Sammanställning resultat

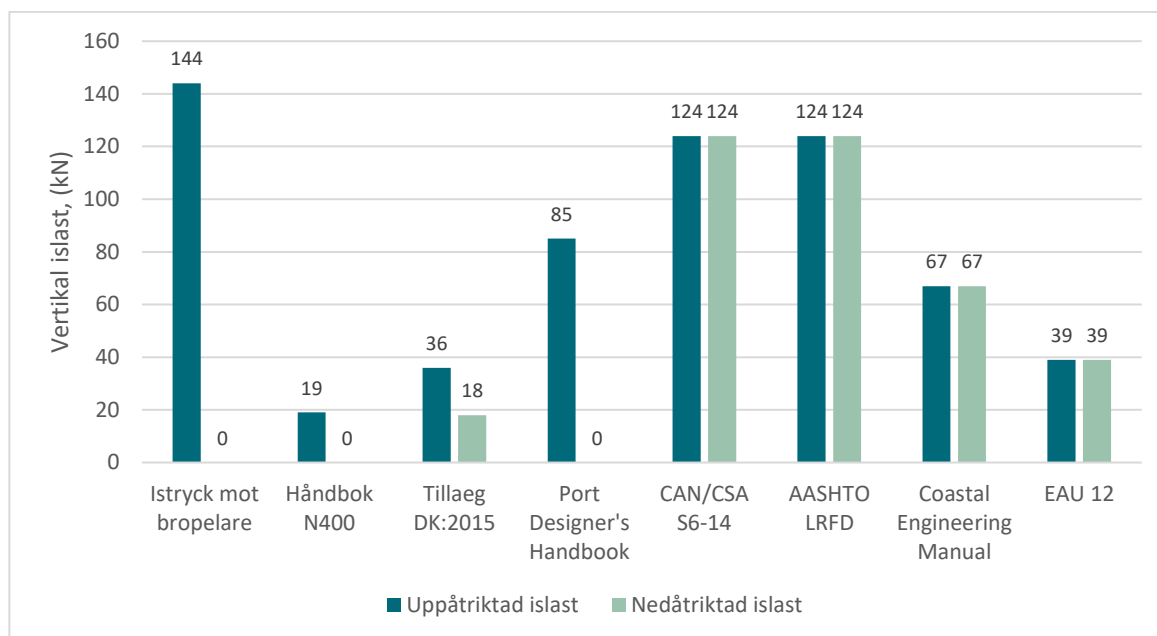
I figurerna nedan redovisas en jämförelse av resultaten.



Figur 19. Jämförelse av horisontell islast.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 20. Jämförelse av vertikal islast. Den uppåtriktade islasten redovisas i en stapel och den nedåtriktade islasten redovisas bredvid.

När enbart drivande is beaktas blir spridningen i lastväden mellan riktlinjerna mindre men fortfarande påtaglig. Värdet i *Istryck mot bropelare* blir ungefär hälften mot värdet i de nordamerikanska bronormerna och *Costal Engineering Handbook*. Som diskuteras i kap 4.1.1 har eventuellt faktorn för förhållandet b/d kombinerats med en kontaktfaktor strax över 0,5 medan de nordamerikanska riktlinjerna baseras på en kontaktfaktor på 1,0. I *Tillaeg DK:2015 Islast* används en kontaktfaktor på 0,5. Dock erhålls ett högt värde p.g.a. det höga värdet på isens tryckhållfasthet.

Port Designer's Handbook och *Håndbok N400* genererar klart högst värde medan *EAU 2012* genererar ett i sammanhanget medelhögt värde.

Återigen bör poängteras att beräkningarna är känsliga för val av tryckhållfasthet respektive lufttemperatur i *EAU 2012*.

Avseende vertikal islast kan noteras att pålens diameter har i flertalet fall liten påverkan på lastens storlek. I denna beräkning är pålen halva bredden mot typfall 1 och lastens värde ändras marginellt. Med undantag för *Håndbok N400* där lasten halveras. Detta beror på att lasten är proportionell mot tvärsnittets perimeter.

Storleken på den lyftande lasten skiljer en faktor 4 mellan *Istryck mot bropelare* och *Tillaeg DK:2015 Islast*. I kap. 4.2 beskrivs att formlerna har en teoretisk koppling men att den svenska riktlinjen baseras på en böjhållfasthet på 2000 kPa medan den danska utgår från 500 kPa. I detta fall (när $b = d$) är det bara böjhållfastheten som skiljer metoderna åt.

5.3 Jämförelse metoder

Som framgår i kap 4.1.1 finns för drivande is både metoder som representerar brottmoden krossning respektive klyvning. I detta avsnittet jämförs två metoder för drivande is som återspeglar de två olika brottmoderna.

5.3.1 Krossning respektive klyvning

I kap 4.1.1 presenteras fyra metoder för drivande is som på ett eller annat sätt används i riktlinjerna. Dessa är:

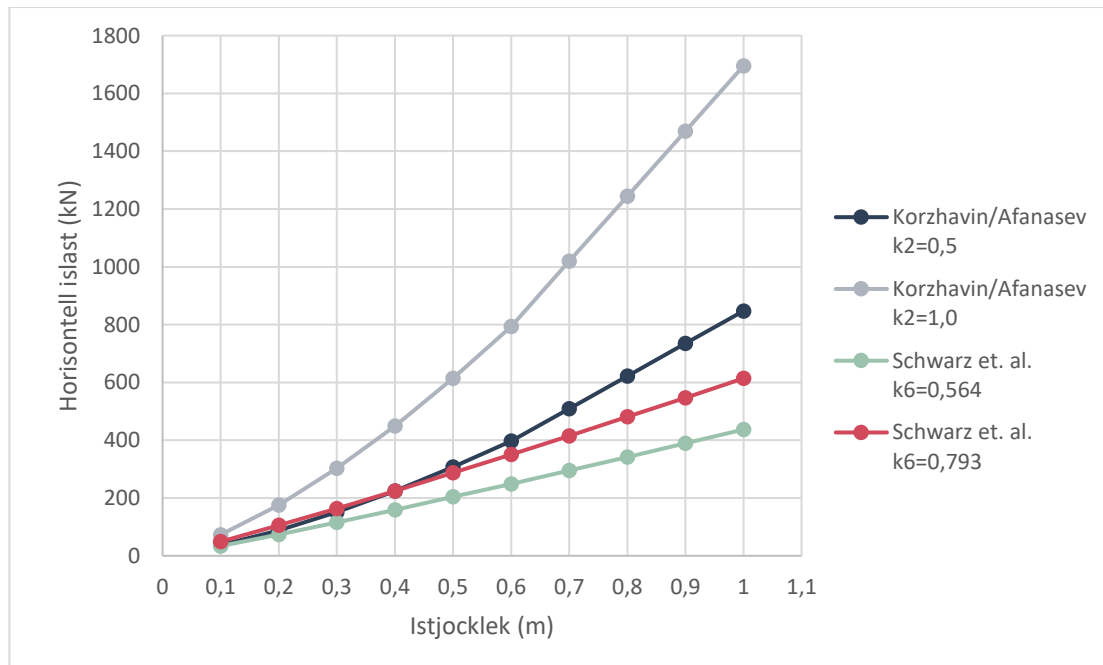
- Metod baserad på pelaravstånd
- Korzhavin/Afanasevs metod
- ISO-metoden
- Schwarz et. al:s metod

För *Metod baserad på pelaravstånd* har det ej gått att klargöra vilken brottmod som beaktas. Både *Korzhavin/Afanasevs metod* och *ISO-metoden* beaktar krossning medan *Schwarz, et al:s metod* avser klyvning.

ISO-metoden gäller uttryckligen bara för oeftergivliga konstruktioner och för ett b/d -förhållande som gör dess användning begränsad för smala konstruktioner. *Korzhavin/Afanasevs metod* har stor utbredning och använts under lång tid. I detta avsnitt jämförs *Korzhavin/Afanasevs metod* med *Schwarz, et al:s metod*.

De två metoderna jämförs med samma tryckhållfasthet för isen (1000 kPa) och en fast konstruktionsbredd ($b=0,6$ m) men med varierande istjocklek.

För *Korzhavin/Afanasevs metod* används Ekv. 14 med tillägget avseende formfaktor k_3 i Ekv. 33. För *Schwarz, et al:s metod* används Ekv. 36. För båda metoderna jämförs olika kontaktfaktorer, för is i rörelse samt fastfusen is. Fullständiga beräkningar redovisas i Bilaga C. I figurerna nedan redovisas en jämförelse mellan de olika metoderna.



Figur 21. Jämförelse mellan Korzhavin/Afanasevs metod och Schwarz et. al:s metod. Islasten plottas som en funktion av istjockleken. Pålbredden är konstant 0,6 m och istryckhållfastheten är konstant 1000 kPa.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Korzhavin/Afanasevs metod ger generellt högre lastvärden än *Schwarz et. al:s metod*. Vid liten istjocklek (høgt b/d -förhållande) är lastvärdena jämförbara men vid större istjocklek (lågt b/d -förhållande) skiljer sig värdena åt i större utsträckning.

6 Skador på pålar orsakad av is

Följande frågor har ställts till Göteborgs Hamn, Stockholms Hamnar och Piteå Hamn:

- Har ni observerat att pålar eller pelare i vatten, skadats av is i er hamn? Om ja, hur (t.ex. nötning, gått till brott eller skjutits ur sin position)?
- Har ni isskydd på era pålar?

Svar har erhållits från Piteå Hamn och Stockholms Hamnar.

Piteå Hamn använder isskydd i armerad betong både för stål- och betongpålar. Nötning har uppstått på flera av pålarna. Själva pålarna klarar sig men nötning uppstår på isskydden, där synlig armering finns på några från 1975. Nötningen uppkommer på den yttersta pålraden. Hamnen har observerat ett tydligt samband mellan nötning vid den position där bogserbåtar och angörande fartyg i regel trycker bort lösa isblock.

Stockholms Hamnar använder alltid isskydd på pålarna som täcker skvalpzonen. Dessa utförs oftast enligt en typskiss från deras tekniska handbok. Isskyddet består av ett cirkulärt stålrör i antingen 3 mm rostfritt stål eller 12 mm svartstål. Mellan påle och stålrör gjuts 50 mm betong. Skyddet fungerar även som korrosionsskydd. Inga skador på pålar från is anges.

Som anges i kap. 4.2, framgår det i Tryde (1983) att 4000 st av 30 500 st pålar lyftes vintern 1978/1979 i danska hamnar. *Istryck mot bropelare* anger också att ensamstående pålar ofta kan lyftas av is.

Enligt Lennart Fransson¹ har det förekommit fall där pålar förskjutits avsevärt ur sin position under byggskedet. För mindre konstruktioner som t.ex. fritidsbryggor är det vanligt förekommande att pålar lyfts upp. Detta problem är vanligast för träpålar. Dessa är lätta och har god vidhäftning mellan konstruktion och is.

¹ Lennart Fransson, isexpert, LTU, telefonsamtal, 2019-10-28.

7 Diskussion

7.1 Utförda beräkningar

Med utgångspunkt från de praxis som tillämpas i de olika ländernas anvisningar har beräkningar utförts för en kajkonstruktion på pålar med diameter 0,6 meter och istjocklek på 0,3 meter. Pålen har härvid betraktats som fast och i en miljö där fast istäcke kan uppträda. Därvid anses den kunna utsättas för termiskt istryck från ett fast istäcke.

Beräkningar av samma omfattning har också utförts för ett eftergivligt ledverk av den typ som kommit till användande i Trollhätte kanal. Härvid har både pålarnas diameter och istäckets tjocklek satts till 0,3 meter. I detta fall har istryck från fast istäcke ej beaktats då fartygstrafik förekommer året om.

Resultaten redovisas i diagramform i *Figur 16-17 och 19-20*. Man finner att det är skillnader mellan de olika riktlinjerna. Till viss del härrör skillnaderna från stora variationer av den ishållfasthet som ska användas. Det har även varit svårt att i beräkningar likställa riktlinjerna då flertalet antaganden behöver göras, där i många fall vägledningen är bristfällig.

7.2 Isens faktiska påverkan på pålar

Den problembild avseende isens påverkan på pålar som noteras i kap. 6 är:

- Nötning i skvalpzon.
- Förskjutning av pålar i byggskedet.
- Upplyft av pålar.

Dessa problem kan minskas med isskydd för nötning respektive system med luftinblåsning och strömbildning vid byggskedet för att förhindra upplyft.

Det finns få dokumenterade fall av knäckta pålar som gått till brott p.g.a. hög islast. Med tanke på den höga osäkerheten vid bestämning av islastens storlek vid dimensionering är detta anmärkningsvärt. Detta kan innebära att den horisontella islasten överskattas vid dimensionering av pålar, alternativt att pålade konstruktioner undviks i vatten med kraftig isbildning. För mindre konstruktioner med lätta överbyggnader, som småbåtsbryggor, verkar det vanligt förekommande att underskatta den vertikala islasten.

7.3 Tillämpbarhet riktlinjer

Av de studerade riktlinjerna är det enbart två som uttryckligen gäller för pålar, dessa är:

- *Coastal Engineering Manual*.
- *EAU 2012*.

AASHTO LRFD och *CAN/CSA-S6-14* talar uttryckligen om att de inte gäller för pålar. Som framgår i kap. 7.8 gäller de studerade metoderna huvudsakligen för oeftergivliga konstruktioner samt i flera fall uppmanas läsaren att beakta dynamiska effekter för slanka konstruktioner.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I samtliga riktlinjer bedöms isens tryckhållfasthet vara en parameter som är svår att bestämma. I riktlinjerna skulle utförligare vägledning behövas för att enklare bestämma tryckhållfastheten med hänsyn till lokala variationer. I samtliga formler där den ingår som indata är den proportionell mot lastens storlek. Detta medför att valet av tryckhållfasthet får stor påverkan på islastens storlek.

I *EAU 2012* råder osäkerhet kring vilket värde som ska sättas på luftens temperatur som indata vid beräkning av isens tryckhållfasthet. Beroende på om istäcket beaktas som fast eller rörligt kan olika temperaturer behöva beaktas.

Om de studerade riktlinjerna tillämpas med ett konservativt tillvägagångssätt erhålls höga värden för den horisontella islasten. Höga lastvärden avseende is behöver inte ha stort utslag vid dimensionering av t.ex. större broar p.g.a. andra stora laster. Dock är vissa pålade konstruktioner mer känsliga i dimensioneringsskedet för höga islaster. Då pålar i vatten är slanka konstruktioner påverkar i stor grad den horisontella lasten dimensioneringen m.a.p. knäckning.

I t.ex. industrihamnar kan det vara väldigt stora yttre laster på pålar där den variabla delen av lasten är markant. Det är diskuterbart hur islasten bör kombineras med andra variabla laster på pålar i hamnar med utgångspunkt från hur hamnen används vintertid.

7.3.1 Tillämpbarhet Istryck mot bropelare

Istryck mot bropelare är med stor sannolikhet den riktlinje som tillämpas oftast i Sverige för att bestämma islast mot pålar. Nedan är en sammanställning av aspekter som bedöms göra just *Istryck mot bropelare* svårtillämpad:

- Svårt att avgöra om alla typer av islast är aktuella för pålar, t.ex. "tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar".
- Värden på istryck i_1 och i_2 anges i intervall utan tydlig vägledning hur värdena ska bestämmas.
- Tveksamhet i om minimimåttet för pelarbredd på 4 m vid bestämning av termisk istryck är relevant för mindre konstruktioner som pålar.
- För drivande is finns två olika metoder, en för is sönderbruten i mindre stycken och en för stora drivande isflak. Det anses svårt att avgöra storleken på isflaken.
- Oklarhet i pelaravstånd för *Ekv. 2* när konstruktionen ej korsar hela vattendraget t.ex. bryggor och kajer.

Sammantaget leder detta till att mycket varierande lastvärden kan erhållas. Ett extremfall uppkommer vid val av termiskt istryck. Exempelvis med en pålbredd på 1 m, om det höga värdet i intervallet väljs i kombination med minimimåttet för pelarbredd i jämförelse med om det minsta värdet i intervallet väljs och minimimåttet för pelarbredd försummas, uppkommer en faktor 24 i skillnad av erhållet lastvärde.

Tillämpningen av minimimåttet för mindre konstruktioner som pålar bedöms mycket tvivelaktigt. Av erfarenhet förbises ofta det när *Istryck mot pålar* tillämpas för pålar i Sverige.

Utöver ovan punkter, går det att ifrågasätta vad metoden för drivande is i *Ekv. 2* baseras på och om denna är giltig för pålar, se kap. 4.1.1. Även metoden i *Ekv. 3* baserat på Korzhavin/Afanasev bedöms vara något omskriven i *Istryck mot bropelare*, detta diskuteras närmare i kap. 7.5.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Då flera aspekter i *Istryck mot bropelare* lämnas till ingenjörsmässig bedömning finns risken att vitt skilda lösningar dimensioneras beroende på vem som utför dimensioneringen. Detta leder bl.a. till svårigheter att bedöma rimlighet och en osäkerhet vid anbud.

Den ovan beskrivna problembilden med *Istryck mot bropelare* bör även vara aktuell när dokumentet tillämpas för brostöd. Som nämns i kap. 7.3 påverkar dock inte det erhållna lastvärdet brostöds dimension i samma utsträckning som för pålar.

I Bilaga D finns en sammanställning av kommentarer till *Istryck mot bropelare* när denna tillämpas för pålar. Kommentarer baseras på erfarenheter erhållna från denna studie.

7.4 Isförhållanden

Samtliga studerade bronormer; *Istryck mot bropelare*, *Håndbok N400*, *CAN/CSA-S6-14* och *AASHTO LRFD* utgår från en dimensioneringssituation där konstruktionen är placerad i ett strömmande vattendrag, t.ex. en flod. Detta är även utgångspunkten för Korzhavin/Afanasevs metod.

Det går att ifrågasätta hur väl denna typ av vattendrag och således isförhållande gäller för merparten av pålarna i vatten. Troligtvis är en stor del av pålarna i Sverige belägna i hamnområden. Hamnområden är ofta placerade i relativt skyddade lägen, ibland även skyddade av vågbrytare. Hamnar kan också hållas isfria under vintern. Fall med islossning under våren där större isflak drivs av kraftigt strömmande vatten mot konstruktionen bör vara mindre vanligt förekommande för pålar än bropelare. Däremot kan en situation där is trycks mot konstruktionen av förbigående fartyg vara relevant, något som ej beaktats i den studerade litteraturen. Hur denna situation skiljer sig från drivande is i strömmande vatten är ej känt.

7.5 Krossning respektive klyvning

Samtliga riktlinjer förutom *EAU 2012* har metoder som beaktar att isen krossas mot konstruktionen. I *EAU 2012* används en metod som istället gäller för brottmoden klyvning. Den mest vedertagna metoden för krossning är Korzhavin/Afanasevs metod. Metoden för klyvning i *EAU 2012* baseras på Schwarz, et al.

Om klyvning på grund av dragpåkänningar vinkelrätt isens tryckriktning uppstår blir belastningen mot pålen åtskilligt reducerad. Om klyvning sker innan krossning beror på flera faktorer bl.a. förhållandet mellan isflakets och pålens bredd, isdriftens hastighet, isens sprödhet och tvärsnittets form.

Som påvisas i kap. 5.3.1 ger Schwarz et. al:s metod betydligt lägre islast än Korzhavin/Afanasev om samma värde på isens tryckhållfasthet används. Som påvisas i kap. 5.2 ger dock inte *EAU 2012* betydligt lägre värden än de andra riktlinjerna. Detta beror på att relativt höga värden på isens tryckhållfasthet erhålls i *EAU 2012*.

En skillnad mellan metoderna är att Schwarz, et al:s metod bygger på modellförsök i laboratorium. I Schwarz, et. al:s metod ska möjligtvis tryckhållfasthet från is tillverkad i laboratorium användas medan för Korzhavin/Afanasevs metod ska tryckhållfasthet erhållen i fält användas. Is tillverkad i laboratorium kan ha en annan porstruktur och färre imperfektioner än is från fält.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

I Korzhavin/Afanasevs metod för krossning finns en faktor som beaktar flerdimensionellt spänningstillstånd. Flera länder rekommenderar en ökning av istrycket på grund av flerdimensionellt spänningstillstånd med en faktor som för påldiameter lika med istjockleken blir 2,4. I *Istryck mot bropelare* anges motsvarande formfaktor till 1,3. Här föreligger således en stor skillnad. En möjlig teori, baserat på presenterade värden i *Tabell 9*, är att faktorn för flerdimensionellt spänningstillstånd har kombinerats med kontaktfaktorn, k_2 , i *Istryck mot bropelare*. Där k_2 ansatts till strax över 0,50.

7.6 Last från fast istäcke

Som framgår av kap. 4.1.2 är termiskt istryck ett komplext ämne och metoderna i de studerade skrifterna skiljer sig mycket åt. Generellt saknas tydlig vägledning om när termiskt istryck ska ansättas och vilken laststorlek som ska ansättas. Om termiskt istryck alltid är relevant att beakta för mindre konstruktioner som pålar är ej självklart.

Av i vissa länder förekommande praxis för beräkningar framgår att termiska istryck vid fast istäcke ger betydligt större islaster än vad som erhålls från drivande is. I vissa fall kan man ifrågasätta om termiskt istryck från fast istäcke behöver beaktas vid eftergivliga konstruktioner. Ett undantag kan vara då successiv uppsprickning och ifrysning förskjuter konstruktionen så att deformationsmöjligheten har bottenat. Se ytterligare diskussion avseende eftergivlighetens inverkan under kap. 7.8.

Övriga typer av islast som är kopplade till fast istäcke, som valvverkan p.g.a. vattenståndsvariationer, isansamling och packis samt tryck från stort istäcke p.g.a. ström och vind bör granskas kritiskt om dessa typer är relevanta för pålar. *Ekv. 32* kan betraktas som ett övre gränsvärde för islasten från ett fast istäcke pådrivet av ström och vind. Hur detta övre gränsvärde förhåller sig i jämförelse med isens brottlast bör tydliggöras.

Då packis främst förekommer i arktisk miljö bör det inte vara intressant att beakta detta vid dimensionering av pålar. Däremot bör eventuellt isansamling beaktas då pålade konstruktioner ofta utgörs av i vattnet flera närliggande pålar. Det finns enkla avståndsregler att tillgå för att undvika isansamling, vilka beskrivs i kap. 4.1.5.

7.7 Isens tryckhållfasthet och tjocklek

Isens tryckhållfasthet och tjocklek är parametrar som behövs i samtliga riktlinjer.

I flera fall bedöms isens tryckhållfasthet vara svår att bestämma. Det har visat sig under arbetet med denna rapport att isens krosshållfasthet i de olika riktlinjerna inte går att direkt jämföra med varandra då hållfastheten är beroende av olika faktorer i de olika riktlinjerna.

I de nordamerikanska riktlinjerna bestäms tryckhållfastheten m.a.p. hur uppdelad isen är och hur stabila isflaken är. Detta bedöms mycket svårt att som konstruktör avgöra i ett projekteringsstadium. Då föredras vägledningen i *Istryck mot bropelare* där riktvärden har en geografisk koppling. Det är dock svårt att i *Istryck mot bropelare* avgöra när 700 kPa respektive 1400 kPa ska användas och om mellanliggande värden ibland bör väljas.

I *EAU 2012* beräknas tryckhållfastheten med formler. Vägledning finns hur indata till formeln ska bestämmas förutom temperatur på ovansida is. Val av temperatur på ovansida is har mycket

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

stor påverkan på beräknad tryckhållfasthet i sötvatten enligt *Ekv. 39* och *Ekv. 40*. Ansätts temperaturer på isens ovansida till -5°C eller lägre erhålls höga värden på isens tryckhållfasthet.

Det rekommenderade värdet i *Tillaeg DK:2015 Islast* på 1900 kPa bedöms vara högt. Detta värde ska motsvara en returperiod på 50 år. I *SS-EN 1991-1-6; Tabell 3.1* finns rekommenderade återkomsttider för bestämning av karakteristiska värden för klimatklasser. Här framgår att:

- Lastvaraktighet ≤ 3 dagar $\rightarrow$ Återkomsttid 2 år.
- Lastvaraktighet ≤ 3 månader (men ≥ 3 dagar) $\rightarrow$ Återkomsttid 5 år.
- Lastvaraktighet ≤ 1 år (men ≥ 3 månader) $\rightarrow$ Återkomsttid 10 år.
- Lastvaraktighet ≥ 1 år $\rightarrow$ Återkomsttid 50 år.

Utifrån dessa riktvärden framstår en returperiod på 50 år som högt då lasten bara verkar under en period under vintern. Att dessutom kombinera detta med en istjocklek med en returperiod på 50 år bör ge en mycket stor säkerhetsmarginal.

Generellt är tryckhållfasthetsvärdena i *EAU 2012* (Tyskland) och *Tillaeg DK:2015 Islast* (Danmark) högre än värdena i riktlinjerna från Sverige, Norge och Nordamerika.

Som framgår i *AASHTO LRFD* bör rekommenderade värden på isens tryckhållfasthet beaktas som indata till formler istället för faktiska hållfasthetsvärden. Detta ses som ett sunt tillvägagångssätt. Det är många faktorer som påverkar isens tryckhållfasthet. En viktig faktor är försöksmetod, om tryckförsök utförs på plats eller i laboratorium eller om isen är tagen på plats eller skapad i laboratorium. Utöver detta tillkommer bl.a. töjningshastighet och temperatur vid tryckförsöket. Tryckhållfastheten bör således vara metodkopplad och således bör inte andra tryckhållfastheter än de som anges i riktlinjerna användas.

Vid bestämning av vertikal islast i *EAU 2012* med *Ekv. 42* används isens tryckhållfasthet medan i flera andra metoder används isens böjhållfasthet vid beräkning av den vertikala lasten. Det är möjligt att metoden i *Ekv. 42* egentligen bygger på isens böjhållfasthet men att uttrycket är förenklat och att böjhållfastheten istället är uttryckt som en andel av tryckhållfastheten. Att uttrycka böjhållfastheten som en andel av tryckhållfastheten bör ske med viss eftertänksamhet. Den vertikala islasten uppkommer vid fast istäcke medan drivande is vanligtvis uppträder vid icke-fast istäcke. Dess scenarion kan kopplas till olika värden på isens tryckhållfasthet p.g.a. olika temperatur och töjningshastighet. Det framgår ej i *EAU 2012* om olika värden på luftens temperatur ska ansättas vid beräkning av tryckhållfasthet m.a.p. horisontell islast respektive vertikal islast.

Det går att diskutera om olika värden på isens tjocklek ska tillämpas när drivande islast beaktas respektive laster från fast istäcke. Det är heller inte klart vilken returperiod som ska beaktas för istjockleken för att uppfylla erforderlig säkerhet i Eurokod. Isens tjocklek bör dock, till skillnad från hållfasthet, vara oberoende av metodval. Istjockleken bör snarare var kopplad till sannolikhet och önskad säkerhet.

För att en riktlinje ska vara tillämpbar får inte isens hållfasthet och tjocklek vara omständliga att bestämma utan ska kunna bestämmas inom ramen av normalt ingenjörsarbete. Dessa parametrar behöver kunna ansättas utifrån den information som finns tillgänglig vid projekterings- liksom anbudsskedet. Parametrarna kan följas upp under byggskedet men en tydlig vägledning behövs för de tidiga skedena.

7.8 Inverkan av eftergivlighet

I flera av de skrifter som studeras i kap. 3 framgår det att islast mot slanka konstruktioner kan ha en annan påverkan än mot rigida konstruktioner:

- I *Istryck mot bropelare* framgår det att för pelare med låg styvhet bör hänsyn tas till det dynamiska istryckets vibrerande karaktär. Där höga momentana tryck och resonanseffekter kan uppkomma.
- I den norska bronormen framgår det att dynamiska effekter kopplade till iskrossning ska utvärderas närmare om deformationen i isens angreppspunkt orsakad av islast överstiger 10 mm.
- I *Tillaeg DK:2015 Islast* framgår det att uttrycket för drivande is uttryckligen gäller för styva konstruktioner. Det framgår även att dynamiska effekter ska beaktas m.a.p. utmattning.
- I den kanadensiska bronormen framgår det att en specialist ska kontaktas om slanka pelare används.
- I den amerikanska bronormen framgår det att slanka pelare, inklusive pålar, inte ska användas i regioner där islasterna är signifikanta såvida inte en isspecialist konsulteras.

De tre studerade handböckerna för marina konstruktioner tar inte upp att påverkan på eftergivliga konstruktioner kan vara annorlunda. Som framgår i kap. 4.1.1 bygger uttrycket i *Coastal Engineering Manual* på Korzhavin/Afanasevs metod. Korzhavins metod är framtagen för brostöd där deformationer p.g.a. islast försumrats. Ekv. 21 i *Port Designer's Handbook* beskrivs närmare i kap. 4.1.1 och benämns för *ISO-metoden*. Där framgår det att metoden uttryckligen gäller styva konstruktioner. Metoden som presenteras i *EAU 2012* beskrivs i kap. 4.1.1 som *Schwarz, et al:s metod*. Metoden är framtagen specifikt för pålar, det är dock oklart hur eftergivligheten beaktats. Metoden bygger på modellförsök, hur väl eftergivligheten har beaktats i modellförsöken är ej känt. Då isens drivhastighet ej behandlats som en variabel går det i alla fall att utesluta att dynamiska effekter beaktats.

Synen på om pålens eftergivlighet bidrar till högre eller lägre islast är tudelad. Korzhavin (1971) diskuterar hur en konstruktions deformation påverkar kraften mot den. Enligt honom är bropelares deformationer obetydliga för islastens storlek. För pålar kan deformationen ha viss betydelse för lastens storlek. Enligt Korzhavin blir dock kraften som verkar mot konstruktionen mindre ju mer den deformeras då isens kinetiska energi tas upp av deformationen.

Löset, et al. (2006) menar att dynamiska effekter bör beaktas för eftergivliga konstruktioner. De menar att stora vibrationer kan uppkomma även vid tunna istäcken (10 cm) och att islasten kan vara större mot eftergivliga konstruktioner än rigida konstruktioner p.g.a. dynamisk amplifikation. Löset, et al. har sammanställt resultat från flera olika studier som visar att en dynamisk förstöringsfaktor för eftergivliga konstruktioner ligger runt 2. Den dynamiska responsen hos eftergivliga konstruktioner är kopplad till den drivande isens hastighet.

Den enda definitionen kring begreppet eftergivlighet och styv/icke-styv konstruktion som erhållits i denna studie är den som anges i *ISO 19906:2019*. Där betraktas konstruktionen som styv/oeftergivlig om deformationen i lastens angreppspunkt ej överstiger 10 mm p.g.a. islast. Pålars deformationsegenskaper beror inte bara på dess tvärsnitt och material utan även till stor del av upplagsvillkor, längd, position för last, vattendjup och jordmaterial. Hur mycket pålar deformeras p.g.a. av horisontell last kan således variera stort.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Således finns problematik i att avgöra om pålade konstruktioner bör betraktas som eftergivliga eller inte samt att avgöra om eftergivligheten är gynnsam eller inte m.a.p. islastens storlek. Med resonemanget att eftergivliga konstruktioner tar upp kinetisk energi från drivande is är eftergivligheten gynnsam. Med resonemanget att eftergivliga konstruktioner utsätts för dynamiska effekter som kan leda till en amplifikation av lasten kan eftergivligheten vara ogynnsam. I vilka fall (isens hastighet, tjocklek, hållfasthet mm.) som dynamiska effekter bör beaktas är ej känt samt hur dessa ska tillämpas m.a.p. brottgränstillstånd, bruksgränstillstånd och utmattning.

7.9 Vertikal islast

Olika metoder för att bestämma den vertikala islasten presenteras i riktlinjerna. Dessa presenteras mer i detalj i kap. 4.2. Samtliga riktlinjer ger metoder för den lyftande uppåtriktade lasten. Däremot varierar synsättet avseende den nedåtgående last. Den nedåtgående tryckande lasten behandlas på tre olika sätt, antingen sätts den till samma värde som den lyftande lasten, till halva värdet av den lyftande lasten eller försummas helt. Enligt Lennart Fransson¹ är den nedåtriktade lasten i praktiken mycket mindre än den uppåtriktade lasten och kan försummas. När isen verkar uppåt fungerar den som en gripklo runt pålen. Det sker ej när isen verkar nedåt. Den nedåtriktade lasten blir aldrig större än vikten av isen som är ovan sitt jämviktsläge i vatten.

Pålar som dras upp av is är ett förekommande fenomen och lyftkraften bör inte underskattas. Metoden som presenteras i *Istryck mot bropelare* bedöms dock som konservativ då böjhållfastheten i sötvatten är satt till 2000 kPa. Formeln är också oberoende av pålens bredd. Detta bör ge realistiskt hög last vid små påldimensioner.

Metoden i *Tillaeg DK:2015 Islast* ger konsekvent lägst islast. Metoden är specifikt framtagen för pålar och har jämförts mot flertalet verkliga fall där pålar dragits upp. Dessutom är metoden teoretiskt lik den i *Istryck mot bropelare*. Det går dock att resonera kring om böjhållfastheten på 500 kPa skulle räcka för samtliga förhållanden i Sverige.

Metoden i *Coastal Engineering Manual* beaktar inte när isen går till brott utan baseras bara på förhållandet mellan vattenståndsförändring och islast. Denna metod bör således ge orimligt stor last om vattenståndsförändringen ansätts högt. Det anses inte heller lätt att välja isens elasticitetsmodul. Detta gör metoden svår att använda.

Även metoden i *Port Designer's Handbook* bedöms svåränvänd då den presenteras i tabell-form. För pålar med en diameter under 1 m är lastvärdet väldigt känsligt utifrån hur tabellen utläses.

7.10 Rekommendationer för fortsatt arbete

Flera av de anvisningar och regler för utvärdering av islasternas storlek och verkningsätt som analyserats i denna studie avser islast mot brofundament. Försök i studien att tillämpa dessa regler för pålar har belyst behovet av särskilda anvisningar för islast mot pålar.

Ingen av de studerade riktlinjerna kan tillämpas direkt i sin helhet för pålar i Sverige, både p.g.a. att flera obesvarade frågor finns avseende hur is verkar mot pålar samt att för lite vägledning finns kring val av parametrar i de olika riktlinjerna.

¹ Lennart Fransson, isexpert, LTU, telefonsamtal, 2020-04-16.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

En specifik riktlinje för pålade konstruktioner behövs för att undvika ojämn konkurrens vid anbudsskeden. Om inga krav ställs avseende islast från beställaren finns ett mycket stort utrymme för tolkning av islastens storlek som i sin tur kan ha stor påverkan på konstruktionens utformning och kostnad. En specifik riktlinje skulle även skapa en trygghet både för beställare och projektör då dimensioneringsresultat i mindre utsträckning skulle skilja. Vid anbud bör beställaren tydligt specificera islastens storlek, hur den verkar samt hur islasten ska kombineras med andra laster.

Det fortsatta arbetet bör omfatta en beskrivning av tillvägagångssättet för att komma fram till de yttre förutsättningarna som påverkar isens struktur, hållfasthet, varaktighet och inverkan på pålar.

En särskild grupp av personer med teoretisk och praktisk erfarenhet av isens verkningsätt föreslås arbeta fram särskilda regler för beräkning av islast mot pålar. I en sådan grupp bör finnas representanter för konstruktörer som ska tillämpa dessa regler.

Följande punkter avseende islaster mot pålar behöver besvaras innan riktlinjer kan tas fram:

- Vilka isförhållanden gäller för merparten av pålarna? Flertalet pålar kan finnas inom hamnområden. Till skillnad från brostöd bör dessa vara placerade inom ett någorlunda skyddat läge m.a.p. vågor och strömmar.
- Vilka typer av islast är aktuella för pålar? Särskilt vilka typer av islast som uppkommer vid fast istäcke behöver utredas.
- Vad är effekten av pålarnas eftergivlighet på islastens storlek? Utredning kring dynamiska effekter i förhållande till energiupptagningsförmåga behövs.
- Hur ska isens hållfasthet och tjocklek bestämmas med hänsyn till lokala variationer?

Följande process föreslås för att ta fram en riktlinje för islaster mot pålar:

1. Tillsätta en grupp som kan besvara ovanstående frågeställningar. Där is- och lastsituationen för merparten av pålarna i vatten definieras, last från fast istäcke förtydligas och effekten av pålarnas eftergivlighet klargörs.
2. Definiera metoder för att bestämma islast m.a.p. isens verkningsätt. Denna rapport kan utgöra en grund kring utvärdering av metoder.
3. Definiera hållfasthetsvärden för isen som korrelerar med vald metod samt sammanställa värden för isens tjocklek i olika delar av landet. Vägledning avseende val av värden för dessa parametrar ska vara så pass utförlig att parametrarna kan bestämmas i ett anbuds- eller projekteringskede.

8 Referenser

AASHTO LRFD, 2020. *Bridge Design Specifications*. 9e red. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Afanasev, V., Dologoplov, Y. & Shivaishstein, Z., 1972. *Ice pressure on separate supporting structures in the sea*, u.o.: CREEL-Translation TL346.

Ashton, G. D., 2004. *River & Lake Ice Engineering*. 2a red. Colorado: Water Resources Publications.

Avén, S., 1985. *Handboken Bygg V - Väg- och vattenbyggnader*. Stockholm: Byggmästarens Förlag.

Banverket & Trafikverket, 2009. *TR Bro (BVH 1583.10, 2009:28)*, Borlänge: Vägverket.

Banverket & Vägverket, 2009. *TK Bro (BVS 1583.10, 2009:57)*, Borlänge: Vägverket.

Bergdahl, L., 2002. *Islaster på vindkraftverk till havs - Beskrivning av mekanismer och rekommendationer för dimensionering (Rapport nr 2002:1)*, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.

Boverket, 2019. *EKS 11 (BFS 2011:10) Boverkets konstruktionsregler*, Karlskrona: Boverket.

Burcharth, H., 2004. *Islaster på konstruktioner*, Ålborg: Aalborg University.

Canadian Standards Association, 2017. *CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code*. Uppdatering 1 red. Mississauga, Ontario: CSA Group.

Christensen, F. & Zabilansky, L., 1985. *Review of experimental studies of uplifting forces exerted by adfrozen ice on marina piles*. Narssarssuaq, Port and ocean engineering under arctic conditions (POAC).

Committee for Waterfront Structures, 2012. *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012*. 9:e red. Berlin: Ernst & Sohn.

Committee for Waterfront Structures, 1996. *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 1996*. 7e red. Berlin: Ernst & Sohn.

COWI, 2014. *Storstrøm Bridge, Ice Loads - Application of BDK/VD Tillaeg DK:2013 Islast*, Lyngby: u.n.

Ekström, T., 2002. *Elforsk rapport 02:03 Islaster mot hydrauliska konstruktioner: Inriktning mot betongdammar*, Lund: Elforsk.

Fransson, L., 2009. *Ice Handbook for Engineers*. 1.2 red. Luleå: Luleå University of Technology.

Fransson, L. & Bergdahl, L., 2009. *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads. Elforsk rapport 09:55*, u.o.: Elforsk.

Frederking, R., 2012. *Review of Standards for Ice Forces on Port Structures*, Ottawa: National Research Council Canada.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Hirayama, K.-i., Wu, H.-C. & Schwarz, J., 1974. *An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures*, Iowa City: Iowa Institute of Hydraulic Research.

ISO 19906, 2010. Version 1.0. *Petroleum and natural gas industries - Arctic offshore structures*, International Organization for Standardization: u.n.

ISO 19906, 2019. Version 2.0. *Petroleum and natural gas industries - Arctic offshore structures*, u.o.: International Organization for Standardization.

Korzhasin, K. N., 1971. *Action of ice on engineering structures*, Hanover: U.S. Joint Publications Research Service for the U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

Kovacs, A., 1996. *Sea Ice Part II. Estimating the Full-Scale Tensile, Flexural, and Compressive Strength of First-Year Ice*. US Army Corps of Engineers CRREL Report 96-11.

Lipsett, A. & Gerard, R., 1980. *Field Measurements of Ice Forces on Bridge Piers 1973-1979. Report SWE 80-3*, Edmonton: Alberta Research Council.

Löfquist, 1987. *Istryck mot bropelare. Rapport Nr. 1987:43*, u.o.: Vägverket.

Löset, S., Shkhinek, K. N., Gudemestad, O. & Höyland, K. V., 2006. *Actions from ice on arctic offshore and coastal structures*, St. Petersburg: LAN.

Montgomery, C., Gerard, R., Huiskamp, W. & Kornelsen, R., 1984. *Application of Ice Engineering to Bridge Design Standards*, Montreal: Canadian Society for Civil Engineering.

Määttänen, M., 2001. *Ice load design recommendations in Europe*. Ottawa, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC).

Määttänen, M. & Kärnä, T., 2011. *ISO 19906 Ice crushing load design extension for narrow structures*. Montreal, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC).

Neill, C., 1970. *Ice Pressure on Bridge Piers in Alberta, Canada*. Reykjavik, IAHR Ice Symposium.

Neill, C., 1981. *Ice Effects on Bridges*, Ottawa: Roads and Transportation Association of Canada.

Nevel, D., 1972. *The Ultimate Failure of a Floating Ice Sheet*. u.o., International Association for Hydraulic Research, Ice Symposium.

Saeki, H., Saito, S., Hamanaka, K.-i. & Akira, O., 1976. Experimental Study on the Compressive Strength of Sea Ice and the Ice Forces on a Circular Pile. *Coastal Engineering in Japan, Vol. 19*, pp. 73-87.

Schwarz, J., 1970. *The Pressure of Floating Ice-Fields on Pile*. Reykjavik, IAHR Ice Symposium.

Schwarz, J., 1970. *Treibeisdruck auf Pfähle*. Technical University Hannover.

Schwarz, J., Hirayama, K. & Wu, H. C., 1974. *Effect of Ice Thickness on Ice Forces*, Huston: Proceedings Sixth Annual Offshore Technology Conference.

SS-EN 1991-1-6, 2005. *Eurokod 1 - Laster på bärverk. Del 1-6: Allmänna laster - Last under byggskedet*, u.o.: Swedish standards institute.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Statens vegvesen, 2011. *Brusprosjektering Eurokodeutgave Håndbok 185*, u.o.: Statens vegvesen.

Statens vegvesen, 2015. *Håndbok N400 Bruprosjektering*, u.o.: Statens vegvesen.

Statens Vägverk, 1976. *Bronormer 1976-09 TB 103*, u.o.: u.n.

Stockholms Hamnar, 2016. *Teknisk Handbok Projektering hamnkonstruktioner*, u.o.: Stockholms Hamnar.

Svensk Energi, 2011. *RIDAS Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Avsnitt 7.3, Betongdammar, Tillämpningsvägledning*, u.o.: Svensk Energi.

Svenska Båtunionen, 2015. *Hamnar för fritidsbåtar*. 2:a red. Stockholm: u.n.

Svenska offentliga utredningar (SOU), 1961. *SOU 1961:12 Statliga belastningsbestämmelser av år 1960 för byggnadsverk*, Stockholm: Kungliga biblioteket (digital version pub. 2012).

Thoresen, C. A., 2014. *Port Designer's Handbook*. 3e red. London: ICE Publishing.

Trafikverket, 2011. *TRVK Bro 11 (2011:085)*, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2011. *TRVR Bro 11 (2011:086)*, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2019. *Krav Brobyggande (TDOK 2016:0204) Version 3.0*, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2019. *Råd Brobyggande (TDOK 2016:0203) Version 3.0*, Borlänge: Trafikverket.

Transportstyrelsen, 2018. *TSFS 2018:57 Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder*, u.o.: Transportstyrelsen.

Tryde, P., 1983. *Report on Vertical Ice Lifting of Piles in a Number of Danish Marinas with a Description of the Lifting Mechanism*. Espoo, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC).

USACE, 2002. *Coastal Engineering Manual*, Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.

Waxholmsbolaget, 2012. *Riktlinjer för Trafikbryggor i skärgården - Dimensionering, tillgänglighet och utrustning för fartygsbryggor i linjetrafik*, Stockholm: Waxholms Ångfartygs AB.

Vejdirektoratet & Banedanmark, 2015. *Tillaeg DK:2015 Islast*, u.o.: u.n.

Vägverket, 1988. *Bronorm 88*, Borlänge: Vägverket.

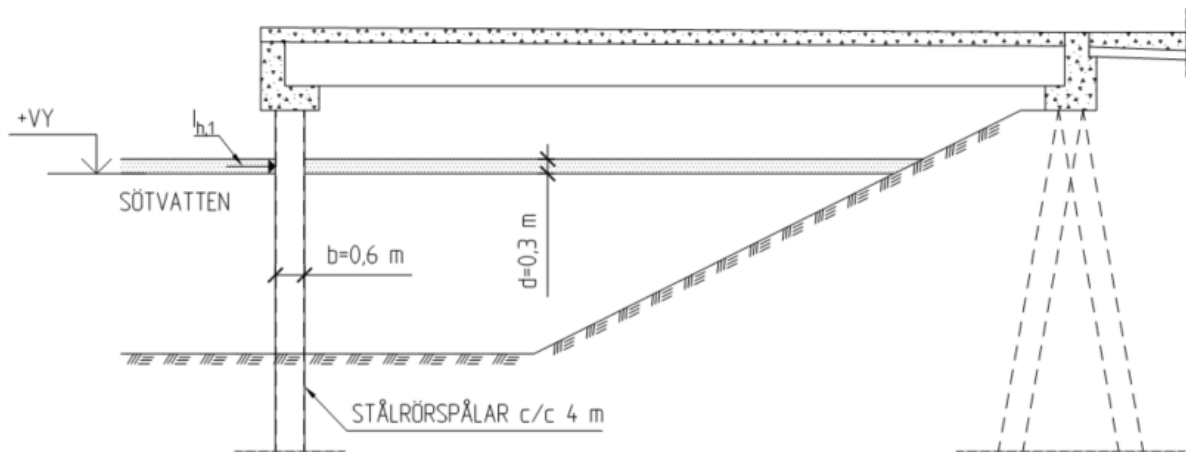
Vägverket, 1994. *Bro 94 2. Lastförutsättningar (Publ. 1994:2)*, Borlänge: Vägverket.

Vägverket, 2004. *Bro 2004 (2004:56) - 2. Lastförutsättningar*, Borlänge: Vägverket.

BILAGA A

I denna bilaga presenteras en jämförelse vid beräkning av islast enligt olika riktlinjer.

Beräkningsmässiga mått enligt figur nedan. Packis antas ej förekomma. Horisontell islast i två riktningar antas ej verka samtidigt.



Figur A.1. Kaj med pålar i vatten. Mått använda i beräkning enligt figur.

Resultat markerat med grönt avser horisontell respektive vertikal kraft som ska användas i dimensionering. Resultat markerat med gult avser horisontell kraft m.a.p. drivande is.

Istryck mot bropelare

Termiskt istryck

$$I_{h,1} = i_1 * a$$

Ekv. 1

$$i_1 = 200 \text{ kN/m}$$

$$a = 4 * 0,6 = 2,4 \text{ m} < 4,0 \text{ m}$$

$$I_{h,1} = 200 * 4 = \text{800 kN}$$

Dynamiskt tryck från drivande is

Is sönderbruten i mindre stycken:

$$I_{h,2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2$$

Ekv. 2

$$i_2 = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_1 = L_2 = 4 \text{ m}$$

$$I_{h,2} = 20 * (4 + 4)/2 = 80 \text{ kN}$$

Stora drivande isflak:

$$I_{h,2} = c_1 * \sigma_k * d * b$$

Ekv. 3

$$c_1 = 1,0 \quad b/d = 2,0$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_{h,2} = 1,0 * 700 * 0,3 * 0,6 = 126 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Upplyft:

$$I_v = A * d^2$$

Ekv. 7

$$A = 1600 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$I_v = 1600 * 0,3^2 = 144 \text{ kN}$$

Vertikal komponent från valvverkan:

$$I_v = 1/3 * I_{h,1} = 1/3 * 800 = 267 \text{ kN}$$

Håndbok N400

Last från drivande is

$$I_h = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,16} * d * b_{eff}$$

Ekv. 8

$$C_R = 1800 \text{ kPa}$$

$$n = -0,50 + \frac{d}{5} = -0,50 + \frac{0,3}{5} = -0,44$$

Ekv. 9

$$L = 4 \text{ m} > 5 * 0,6 \text{ m} = 3 \text{ m} \rightarrow b = b_{eff} = 0,6 \text{ m}$$

Figur 7

$$I_h = 1800 * \left(\frac{0,3}{1}\right)^{-0,44} * \left(\frac{0,6}{0,3}\right)^{-0,16} * 0,3 * 0,6 = 493 \text{ kN}$$

Horisontal last från termisk expansion och vattenståndsvariation

$$i_1 = 300 * d + 2,5 * |T| < 250 \text{ kN/m}$$

Ekv. 11

$$T = -25^\circ\text{C} \quad \text{antagande}$$

$$i_1 = 300 * 0,3 + 2,5 * |25| = 153 \text{ kN/m} < 250 \text{ kN/m}$$

$$I_h = 153 * 0,6 = 92 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Upplyft:

$$I_v = A * d^2$$

Ekv. 7

$$A = 1600 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$I_v = 1600 * 0,3^2 = 144 \text{ kN}$$

$$I_v = L_i * i_v \quad \text{Ekv. 12}$$

$$i_v = 0,6 * \sqrt{d * 0,7 * C_R * \Delta h * k} \quad \text{Ekv. 13}$$

$$\Delta h = d = 0,3 \text{ m} \quad \text{antagande}$$

$$k = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$$i_v = 0,6 * \sqrt{0,3 * 0,7 * 1800 * 0,3 * 9,81} = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_i = \pi * 0,6 = 1,9 \text{ m}$$

$$I_v = 1,9 * 20 = 38 \text{ kN}$$

Vertikal komponent från horisontell last från fast istäcke:

$$I_v = 1/3 * I_h = 1/3 * 92 = 31 \text{ kN}$$

Tillaeg DK:2015 Islast

Islast från krossning

$$I_h = k_1 * k_2 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 14}$$

$$k_1 = 0,9 \quad \text{cirkulärt tvärsnitt}$$

$$k_2 = 1,0 \quad \text{fastfrusen is}$$

$$k_3 = \sqrt{1 + 5 * d/b} = \sqrt{1 + 5 * 0,3/0,6} = 1,87 \quad \text{Ekv. 15}$$

$$\sigma_k = 1900 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,9 * 1,0 * 1,87 * 1900 * 0,3 * 0,6 = 576 \text{ kN}$$

Islast från termisk rörelse

$$I_{h,1} = i_1 * a \quad \text{Ekv. 1}$$

$$i_1 = 0,04 * \sigma_k * d = 0,04 * 1900 * 0,3 = 22,8 \text{ kN/m} \quad \text{Ekv. 16}$$

$$I_{h,1} = 23 * 0,6 = 14 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Lyftkraft:

$$b/d = 0,6/0,3 = 2$$

$$I_v = 0,8 * \sigma_b * d^{1,75} * b^{0,25} \quad \text{Ekv. 18}$$

$$\sigma_b = 500 \text{ kPa}$$

$$I_v = 0,8 * 500 * 0,3^{1,75} * 0,6^{0,25} = 43 \text{ kN}$$

Nedåtriktad kraft:

$$I_v = 43/2 = 22 \text{ kN}$$

Port Designer's Handbook

Islast från drivande is

Ingen riktlinje avseende val av metod. Högst värde används.

$$I_{h,2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2 \quad \text{Ekv. 2}$$

$$i_2 = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_1 = L_2 = 4 \text{ m}$$

$$I_{h,2} = 20 * (4 + 4)/2 = 80 \text{ kN}$$

$$I_h = \rho_G * d * b \quad \text{Ekv. 21}$$

$$\rho_G = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^m \quad \text{Ekv. 22}$$

$$C_R = 1800 \text{ kPa}$$

$$m = -0,16$$

$$n = -0,50 + \frac{d}{5} = -0,50 + \frac{0,3}{5} = -0,44 \quad \text{Ekv. 9}$$

$$\rho_G = 1800 * \left(\frac{0,3}{1}\right)^{-0,44} * \left(\frac{0,6}{0,3}\right)^{-0,16} = 2739 \text{ kPa}$$

$$I_h = \rho_G * d * b = 2739 * 0,3 * 0,6 = 493 \text{ kN}$$

Termiskt istryck

$$I_h = i_1 * a \quad \text{Ekv. 1}$$

$$i_1 = 200 \text{ kN/m} \quad \text{ensidigt istryck}$$

$$I_h = 200 * 0,6 = 120 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Bestäms från Figur 9. Värdet uppskattas till 70 kN/per linjemeter.

$$I_v = 70 * \pi * 0,6 = 132 \text{ kN}$$

CAN/CSA-S6-06

Dynamiska krafter

Rak påle. $\beta = 0^\circ$ vilket medför att $c_n \rightarrow \infty$. Ekv. 25 och 26, som beskriver böjning, försummas.

$$I_h = k_3 * \sigma_k * d * b$$

Ekv. 24

$$k_3 = 1,87$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_h = 1,87 * 700 * 0,3 * 0,6 = 236 \text{ kN}$$

Termiskt istryck

$$I_h = 1,87 * 700 * 0,3 * 0,6 = 506 \text{ kN}$$

Välvning p.g.a. isansamling

$$I_h = 10 \text{ kPa} * 0,6 * 0,3 = 2 \text{ kN}$$

Vertikal islast

$$I_v = 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75})$$

Ekv. 29

$$I_v = 1250 * 0,3^2 * (1,05 + 0,13 * (0,6/2)/0,3^{0,75}) = \pm 129 \text{ kN}$$

AASHTO LRFD

Dynamiska krafter

$\beta \leq 15^\circ$ brottmoden böjning beaktas inte.

$$I_h = k_3 * \sigma_k * d * b$$

Ekv. 24

$$k_3 = 1,87$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_h = 1,87 * 700 * 0,3 * 0,6 = 236 \text{ kN}$$

Termiskt istryck

Ingen metod för att bestämma termiskt istryck anges.

Valvbildning och isansamling

Istrycket för valvbildning antas till mittenvärdet, 500 kPa.

$$I_h = 500 \text{ kPa} * 0,6 * 0,3 = 90 \text{ kN}$$

Vertikal islast

$$I_v = 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75})$$

Ekv. 29

$$I_v = 1250 * 0,3^2 * (1,05 + 0,13 * (0,6/2)/0,3^{0,75}) = \pm 129 \text{ kN}$$

Coastal Engineering Manual

Sammanhängande iskrafter försummas med hänvisning till text i dokument att iskrossning är troligt när isflaket enbart är i kontakt med några enstaka punkter hos konstruktionen.

Lokala krafter orsakade av iskrossning

$$I_h = k_1 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 33}$$

$$k_1 = 0,9$$

$$k_3 = 1,87$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,9 * 1,87 * 700 * 0,3 * 06 = 212 \text{ kN}$$

Termiska islaster

$$i_1 = 73 \text{ kN/m}$$

$$I_h = 73 * 0,6 = 44 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Bestäms utifrån Figur 10.

$$a = b/2 = 0,3 \text{ m}$$

$$h = d = 0,3 \text{ m}$$

$$a/h = 1,0 \text{ m}$$

$$E_{av} = 30\,000 \text{ kp/cm}^2$$

$$\Delta = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Diagram ger } P = 2/0,3 = 6,7 \text{ ton} \rightarrow I_v = 67 \text{ kN}$$

EAU 12

Horisontell islast mot vertikala pålar

$$I_h = k_6 * \sigma_k * b^{0,5} * d^{1,1} \quad \text{Ekv. 36}$$

$$k_6 = 0,793 \quad \text{fastfrusen is}$$

Sötvatten, således beräknas krosshållfastheten enligt:

$$\sigma_k = 1100 + 350 * |t_e| \quad \text{Ekv. 39}$$

$$t_e = -1^\circ\text{C} \quad \text{antagande avseende isens temperatur}$$

$$\sigma_k = 1100 + 350 * |-1| = 1450 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,793 * 1450 * 0,6^{0,5} * 0,3^{1,1} = 237 \text{ kN}$$

Vertikal islastlast

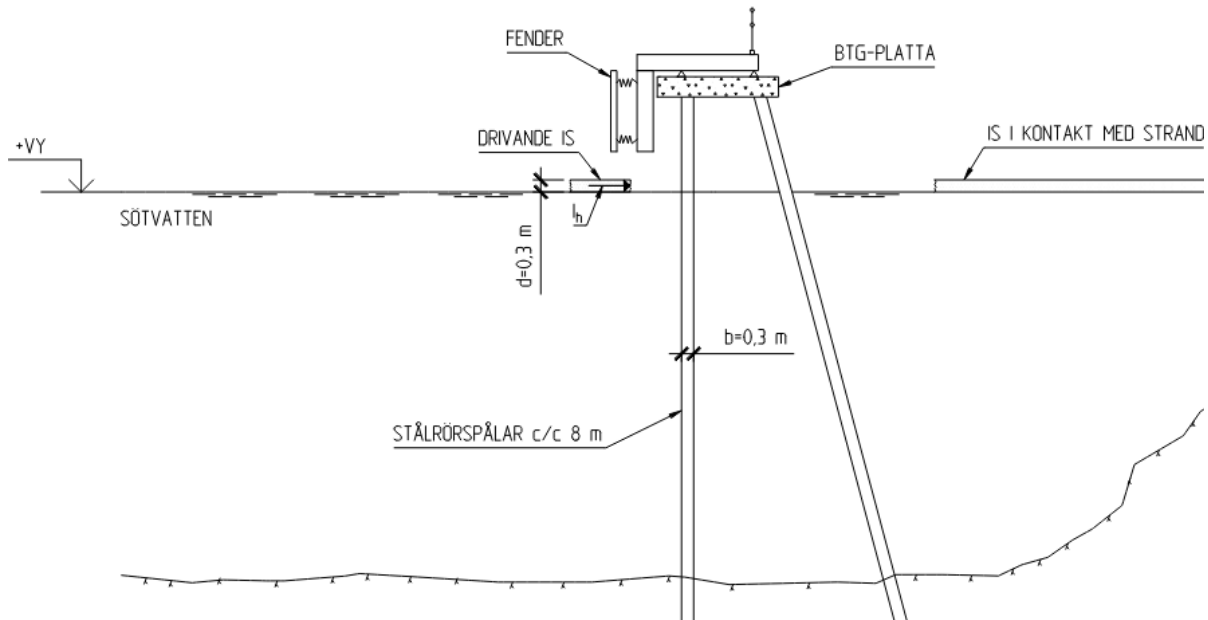
$$I_v = \left(0,6 + \frac{0,15 * b}{d}\right) * 0,4 * \sigma_k * d^2 \quad \text{Ekv. 42}$$

$$I_v = \left(0,6 + \frac{0,15 * 0,6}{0,3}\right) * 0,4 * 1450 * 0,3^2 = \pm 47 \text{ kN}$$

BILAGA B

I denna bilaga presenteras en jämförelse vid beräkning av islast enligt olika riktlinjer.

Beräkningsmässiga mått enligt figur nedan. Enbart drivande is beaktas. Horisontell islast i två riktningar antas ej verka samtidigt.



Figur B.1. Ledverk med pålar i vatten. Mått använda i beräkning enligt figur.

Resultat markerat med grönt avser horisontell respektive vertikal kraft som ska användas i dimensionering.

Istryck mot bropelare

Dynamiskt tryck från drivande is

Is sönderbruten i mindre stycken:

$$I_{h,2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2$$

Ekv. 2

$$i_2 = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_1 = L_2 = 8 \text{ m}$$

$$I_{h,2} = 20 * (8 + 8)/2 = 160 \text{ kN}$$

Stora drivande isflak:

$$I_{h,2} = c_1 * \sigma_k * d * b$$

Ekv. 3

$$c_1 = 1,3 \quad b/d = 1,0$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_{h,2} = 1,0 * 700 * 0,3 * 0,3 = 82 \text{ kN}$$

Is sönderbruten i mindre stycken anses inte kunna ge större last än stora drivande isflak. Lägre värde används.

Vertikal islast

Upplyft:

$$I_v = A * d^2 \quad \text{Ekv. 7}$$

$$A = 1600 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$I_v = 1600 * 0,3^2 = 144 \text{ kN}$$

Håndbok N400

Last från drivande is

$$I_h = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,16} * d * b_{eff} \quad \text{Ekv. 8}$$

$$C_R = 1800 \text{ kPa}$$

$$n = -0,50 + \frac{d}{5} = -0,50 + \frac{0,3}{5} = -0,44 \quad \text{Ekv. 9}$$

$$L = 4 \text{ m} > 5 * 0,3 \text{ m} = 1,5 \text{ m} \rightarrow b = b_{eff} = 0,3 \text{ m} \quad \text{Figur 7}$$

$$I_h = 1800 * \left(\frac{0,3}{1}\right)^{-0,44} * \left(\frac{0,3}{0,3}\right)^{-0,16} * 0,3 * 0,3 = 275 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Upplyft:

$$I_v = A * d^2 \quad \text{Ekv. 7}$$

$$A = 1600 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$I_v = 1600 * 0,3^2 = 144 \text{ kN}$$

$$I_v = L_i * i_v \quad \text{Ekv. 12}$$

$$i_v = 0,6 * \sqrt{d * 0,7 * C_R * \Delta h * k} \quad \text{Ekv. 13}$$

$$\Delta h = d = 0,3 \text{ m} \quad \text{antagande}$$

$$k = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$$i_v = 0,6 * \sqrt{0,3 * 0,7 * 1800 * 0,3 * 9,81} = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_i = \pi * 0,3 = 0,94 \text{ m}$$

$$I_v = 0,94 * 20 = 19 \text{ kN}$$

Tillaeg DK:2015 Islast

Islast från krossning

$$I_h = k_1 * k_2 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 14}$$

$$k_1 = 0,9 \quad \text{cirkulärt tvärsnitt}$$

$$k_2 = 0,5 \quad \text{is i rörelse}$$

$$k_3 = \sqrt{1 + 5 * d/b} = \sqrt{1 + 5 * 0,3/0,3} = 2,45 \quad \text{Ekv. 15}$$

$$\sigma_k = 1900 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,9 * 0,5 * 2,45 * 1900 * 0,3 * 0,3 = 189 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Lyftkraft:

$$b/d = 0,6/0,3 = 2$$

$$I_v = 0,8 * \sigma_b * d^{1,75} * b^{0,25} \quad \text{Ekv. 18}$$

$$\sigma_b = 500 \text{ kPa}$$

$$I_v = 0,8 * 500 * 0,3^{1,75} * 0,3^{0,25} = 36 \text{ kN}$$

Nedåtriktad kraft:

$$I_v = 36/2 = 18 \text{ kN}$$

Port Designer's Handbook

Islast från drivande is

Ingen riktlinje avseende val av metod. Högst värde används.

$$I_{h,2} = i_2 * (L_1 + L_2)/2 \quad \text{Ekv. 2}$$

$$i_2 = 20 \text{ kN/m}$$

$$L_1 = L_2 = 8 \text{ m}$$

$$I_{h,2} = 20 * (8 + 8)/2 = 160 \text{ kN}$$

$$I_h = \rho_G * d * b \quad \text{Ekv. 21}$$

$$\rho_G = C_R * \left(\frac{d}{d^*}\right)^n * \left(\frac{b}{a}\right)^m \quad \text{Ekv. 22}$$

$$C_R = 1800 \text{ kPa}$$

$$m = -0,16$$

$$n = -0,50 + \frac{d}{5} = -0,50 + \frac{0,3}{5} = -0,44 \quad \text{Ekv. 9}$$

$$\rho_G = 1800 * \left(\frac{0,3}{1}\right)^{-0,44} * \left(\frac{0,3}{0,3}\right)^{-0,16} = 3060 \text{ kPa}$$

$$I_h = \rho_G * d * b = 3060 * 0,3 * 0,3 = 275 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Bestäms från Figur 9. Värdet uppskattas till 90 kN/per linjemeter.

$$I_v = 90 * \pi * 0,3 = 85 \text{ kN}$$

CAN/CSA-S6-14

Dynamiska krafter

Rak påle. $\beta = 0^\circ$ vilket medför att $c_n \rightarrow \infty$. Ekv. 25 och 26, som beskriver böjning, försummas.

$$I_h = k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 24}$$

$$k_3 = 2,45$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa (små isflak)}$$

$$I_h = 2,45 * 700 * 0,3 * 0,3 = 154 \text{ kN}$$

Vertikal islast

$$I_v = 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75}) \quad \text{Ekv. 29}$$

$$I_v = 1250 * 0,3^2 * (1,05 + 0,13 * (0,3/2)/0,3^{0,75}) = \pm 124 \text{ kN}$$

AASHTO LRFD

Dynamiska krafter

$\beta \leq 15^\circ$ brottmoden böjning beaktas inte.

$$I_h = k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 24}$$

$$k_3 = 2,45$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_h = 2,45 * 700 * 0,3 * 0,3 = 154 \text{ kN}$$

Vertikal islast

$$I_v = 1250 * d^2 * (1,05 + 0,13 * r/d^{0,75}) \quad \text{Ekv. 28}$$

$$I_v = 1250 * 0,3^2 * (1,05 + 0,13 * (0,6/2)/0,3^{0,75}) = \pm 124 \text{ kN}$$

Coastal Engineering Manual

Sammanhängande iskrafter försummas med hänvisning till text i dokument att iskrossning är troligt när isflaket enbart är i kontakt med några enstaka punkter hos konstruktionen.

Lokala krafter orsakade av iskrossning

$$I_h = k_1 * k_3 * \sigma_k * d * b \quad \text{Ekv. 33}$$

$$k_1 = 0,9$$

$$k_3 = 2,45$$

$$\sigma_k = 700 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,9 * 2,45 * 700 * 0,3 * 0,3 = 139 \text{ kN}$$

Vertikal islast

Bestäms utifrån Figur 10.

$$a = b/2 = 0,15 \text{ m}$$

$$h = d = 0,3 \text{ m}$$

$$a/h = 0,5 \text{ m}$$

$$E_{av} = 30\,000 \text{ kp/cm}^2$$

$$\Delta = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Diagram ger } P = \frac{2}{0,3} = 6,7 \text{ ton} \rightarrow I_v = \pm 67 \text{ kN}$$

EAU 12

Horisontell islast mot vertikala pålar

$$I_h = k_6 * \sigma_k * b^{0,5} * d^{1,1} \quad \text{Ekv. 36}$$

$$k_6 = 0,564 \quad \text{fastfrusen is}$$

Sötvatten, således beräknas krosshållfastheten enligt:

$$\sigma_k = 1100 + 350 * |t_e| \quad \text{Ekv. 39}$$

$$t_e = -1^\circ\text{C} \quad \text{antagande avseende isens temperatur}$$

$$\sigma_k = 1100 + 350 * |-1| = 1450 \text{ kPa}$$

$$I_h = 0,564 * 1450 * 0,3^{0,5} * 0,3^{1,1} = 119 \text{ kN}$$

Vertikal islast

$$I_v = \left(0,6 + \frac{0,15*b}{d}\right) * 0,4 * \sigma_k * d^2 \quad \text{Ekv. 42}$$

$$I_v = \left(0,6 + \frac{0,15 * 0,3}{0,3}\right) * 0,4 * 1450 * 0,3^2 = \pm 39 \text{ kN}$$

Bilaga C - Jämförelse metoder drivande is

Dimensioneringsförutsättningar

Pålens bredd

$$b := 0.6\text{m}$$

Isens tjocklek

$$d := \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1.0 \end{pmatrix} \cdot \text{m}$$

Förhållande pålbredd/istjocklek

	0
0	6
1	3
2	2
3	1.5
4	1.2
5	1
6	0.857
7	0.75
8	0.667
9	0.6

Isens krosshållfasthet

$$\sigma_k := 1000\text{kPa}$$

Korzhavin/Afanasev

Formfaktor

$k_1 := 0.9$ cirkulärt tvärsnitt

Kontaktfaktor - ej full kontakt

$k_{2.a} := 0.5$

Kontaktfaktor - full kontakt

$k_{2.b} := 1$

Dimensionsfaktor

$$k_3 := \left(\begin{array}{l} \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_0}{b}} \\ \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_1}{b}} \\ \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_2}{b}} \\ \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_3}{b}} \\ \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_4}{b}} \\ \sqrt{1 + 5 \cdot \frac{d_5}{b}} \\ 4.17 - 1.72 \cdot \frac{b}{d_6} \\ 4.17 - 1.72 \cdot \frac{b}{d_7} \\ 4.17 - 1.72 \cdot \frac{b}{d_8} \\ 4.17 - 1.72 \cdot \frac{b}{d_9} \end{array} \right)$$

=

	0
0	1.354
1	1.633
2	1.871
3	2.082
4	2.273
5	2.449
6	2.696
7	2.88
8	3.023
9	3.138

Islast beräkning A - ej full kontakt, varierande istjocklek

$$I_{h,A.1} := \overrightarrow{(k_1 \cdot k_{2,a} \cdot k_3 \cdot \sigma_k \cdot b \cdot d)} = \quad \cdot \text{kN}$$

	0
0	36.558
1	88.182
2	151.537
3	224.82
4	306.859
5	396.817
6	509.49
7	622.08
8	734.67
9	847.26

Islast beräkning B - full kontakt, varierande istjocklek

$$I_{h,B.1} := \overrightarrow{(k_1 \cdot k_{2,b} \cdot k_3 \cdot \sigma_k \cdot b \cdot d)} = \quad \cdot \text{kN}$$

	0
0	73.116
1	176.363
2	303.074
3	449.64
4	613.718
5	793.635
6	$1.019 \cdot 10^3$
7	$1.244 \cdot 10^3$
8	$1.469 \cdot 10^3$
9	$1.695 \cdot 10^3$

Schwarz et. al.

Kontaktfaktor - ej full kontakt

$$k_{6,a} := 0.564 \cdot m^{0.4}$$

Kontaktfaktor - full kontakt

$$k_{6,b} := 0.793 \cdot m^{0.4}$$

Islast beräkning A - ej full kontakt, varierande istjocklek

$$I_{h,A.2} := k_{6,a} \cdot \sigma_k \cdot b^{0.5} \cdot d^{1.1} =$$

	0
0	34.702
1	74.385
2	116.195
3	159.449
4	203.808
5	249.07
6	295.095
7	341.786
8	389.064
9	436.873

·kN

Islast beräkning B - full kontakt, varierande istjocklek

$$I_{h,B.2} := k_{6,b} \cdot \sigma_k \cdot b^{0.5} \cdot d^{1.1} =$$

	0
0	48.792
1	104.588
2	163.374
3	224.189
4	286.56
5	350.199
6	414.913
7	480.56
8	547.036
9	614.255

·kN

Bilaga D - Kommentarer till Istryck mot bropelare vid tillämpning för pålar

Istryck mot bropelare (Löfquist, 1987) är troligtvis den vanligaste skriften i Sverige att tillämpa även för pålar när islasten ska bestämmas. I denna bilaga ges kommentarer till kapitel 1 i *Istryck mot bropelare*. Kommentarer utgår från när skriften tillämpas för pålar och baseras på de erfarenheter som erhållits i denna studie. Rubrikindelning nedan bygger på samma struktur som *Istryck mot bropelare*. Ekvationsnummer inom parentes syftar till ekvationer i *Istryck mot bropelare* medan ekvationsnummer utan parentes syftar till ekvationer i huvuddokumentet till denna studie.

1 Allmänna råd för val av dimensionerande iskrafter mot bropelare

Lastkombinationsfaktorer för islast finns tillgängliga i *Krav Brobyggande; B.2.3.2*.

1.1 Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar

Termiskt istryck innefattar även effekten av då sprickor vattenfylls och därefter fryser. Detta medför att eventuell eftergivlighet i pålen inte per automatik gör att termiskt istryck kan försummas.

1.1.2 Ingen ytterligare vägledning avseende val av istryck i det angivna intervallet har erhållits i denna studie. Notera att i kap. 2.5 i *Istryck mot bropelare* anger Löfquist att 200 kN/m är ett förhållandevis högt värde för bropelare.

1.1.3 Den minsta bredden på 4 m vid bestämning av termiskt istryck är ej aktuell för pålar. Värdet på a bör sättas till pålens bredd inklusive isskydd.

1.2 Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar

Det är ej troligt att islast som uppkommer mot konstruktioner genom valv- och spännverkan till följd av vattenståndsväxlingar är aktuell för pålar. Detta koncept saknar vetenskapligt stöd, se kap. 4.1.3 i huvuddokumentet.

Vattenståndsväxlingar kan medföra att isen spricker upp. Därefter kan sprickorna vattenfyllas och sedan frysa. Denna typ av islast behandlas inom *1.1 Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar*.

Kap. 1.2. bör således kunna försummas för pålar.

1.3 Dynamiskt tryck från drivande is

Ekv. (3) och (4) bör användas istället för Ekv. (2) vid bestämning av last från drivande is mot pålar. Till skillnad mot Ekv. (2) har Ekv. (3) och (4) en teoretisk bakgrund som är väl dokumenterad.

1.3.2 En bra sammanställning över istjocklek i svenska kustområden finns presenterad i kap. 3.4 i *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads* (Fransson & Bergdahl, 2009).

1.3.4 Formfaktor C_3 bör ej tillämpas för pålar då böjbrott ej är en trolig brottmod för is vid interaktion med pålar. Formfaktor C_2 kan sättas till 0,9 för cirkulära tvärsnitt och 1,0 för rektangulära tvärsnitt.

1.3.5 För mindre konstruktioner som pålar bör det ej vara nödvändigt att anta ett samtidigt verkande tryck i framkanten vinkelrätt strömriktningen.

1.3.7 Vad som betraktas som en pelare med låg styvhet och hur eventuella resonanseffekter ska beaktas i en dimensioneringssituation är ej känt.

1.4 Tryck från stort istäcke genom ström och vind

Denna typ av islast är troligtvis inte dimensionerande för pålar, se kap. 4.1.4 i huvuddokumentet. Genom att beakta *1.3 Dynamiskt tryck från drivande is* bör denna typ av islast kunna försummas.

1.5 Tryck från packis

Det är eftersträvsamt att placera pålarna med sådant avstånd att isansamling mellan pålarna undviks. Vägledning för att undvika isansamling ges i kap. 4.2.5 i huvuddokumentet. För vissa konstruktioner, som t.ex. ledverk, kan erforderligt avstånd mellan pålar vara svårt att uppnå. Eventuell negativ effekt av detta har ej berörts i denna studie.

1.6 Vertikala krafter från fast istäcke

1.6.1 Se 1.2, om valv- och spännverkan mellan pålar försummas uppkommer således ej denna vertikala komposant.

1.6.4 Vertikal lyftande kraft mot pålar kan beräknas enligt Ekv. (6). Notera att angivna A-värden baseras på istryckhållfastheter på 2000 kPa och 1000 kPa för sötvatten respektive saltvatten. Dessa tryckhållfastheter kan betraktas som höga.

Ekv. (6) baseras på att isen går till böjbrott. Om adhesionen mellan påle och is ej är tillräcklig uppträder ett skjuvbrott tidigare. Detta skjuvbrott kan enkelt uppskattas med Ekv. 57 i huvuddokumentet och kan betraktas som en övre gräns för möjlig vertikal islast.