

Istryck mot bropelare

FÖRORD

Bestämmelser och antaganden om istryck som under årens lopp tillämpats för broar har från början tillkommit utan någon faktisk kunskap om istryckets mekanism. Sedan dessa regler i stort sett utan bakslag tillämpats en längre tid får de dock ett empiriskt värde vid ifrågavarande förutsättningar. De nya kunskaper och erfarenheter som tillkommit, och som i korthet diskuteras i denna skrift, möjliggör något mera specificerade råd för val av dimensionerande istryck. Dessa råd, som redovisas i föreliggande publikation, bygger till en del på ett tidigare förslag från Nordiska Vägtekniska Förbundet (NVF) och till en del på kanadensiska och ryska normer. Dessutom har den praktiska kunskap, som genom åren erhållits från svenska broar, beaktats.

Den vetenskapliga litteraturen om ismekaniska frågor är numera mycket omfattande. I problemöversikten har tonvikten lagts på de mera praktiska resultat som framkommit och som kan vara av intresse för brokonstruktören. Bedömning av möjliga iskrafter är inte enkel. Teorierna är ofullständiga och syns i vissa fall strida mot empiriska rön.

Konceptet till denna skrift har författats av undertecknad. Det slutliga utarbetandet har skett i samråd med Hans Ingvarsson och Clas-Göran Rydén vid brotekniksektionen (VBb) samt Roland Thorén vid sektionen för broteknisk granskning (VBt). Konceptet har kommenterats av Lars Bergdahl, CTH, Alf Engelbrektsson, Vattenbyggnadsbyrån AB, Lennart Fransson, Högskolan i Luleå, Gerner Rørsö Jörgensen, Kjessler & Mannerstråle AB, Nils Olof Larsson, Statens Järnvägar och Richard Wilson, CTH och Kjessler & Mannerstråle AB. Arbetet har bekostats av Vägverket.

Till alla som bidragit med kommentarer och synpunkter vill jag rikta ett varmt tack.

Januari 1987

Innehållsförteckning

1	Allmänna råd för val av dimensionerade iskrafter mot bropelare	3
1.1	Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar	3
1.2	Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar	4
1.3	Dynamiskt tryck från drivande is.....	4
1.4	Tryck från stort istäcke genom ström och vind	6
1.5	Tryck från packis	6
1.6	Vertikala krafter från fast istäcke.....	6
2.	Problemöversikt.....	8
2.1	Inledning.....	8
2.2	Isens fysiska egenskaper	8
2.3	Rörelser och sprickor i fast istäcke	9
2.4.	Termiskt istryck	13
2.5	Termiskt istryck mot bropelare.....	13
2.6	Istryck vid vattenståndsväxlingar	16
2.7	Drivande is.....	18
2.8	Istryck genom ström och vind	20
2.9	Packis	20
2.10	Istäckets lyftkraft	21
2.11	Sprängningstryck	23
2.12	Erfarenheter från broar i Sverige	23
2.12.1	Istryck vinkelrätt brolinjen	24
2.12.2	Istryck parallellt brolinjen.....	25
2.13	Slutord.....	26
	Litteratur.....	27
	Bilagor	
Bilaga 1	Maximalt termiskt istryck	29
Bilaga 2	Bropelare intill isränna.....	30
Bilaga 3	Istryck vinkelrätt brolinjen	31

Bilaga 4	Preliminära nordiska lastbestämmelser för vägbroar.....	32
Bilaga 5	Exempel på antagna istryck vid brodimensionering	34

1 Allmänna råd för val av dimensionerande iskrafter mot bropelare

Iskrafterns storlek uppskattas med hänsyn till lokala isförhållanden och till konstruktionens form och storlek. Följande huvudtyper av påverkan från is kan förekomma.

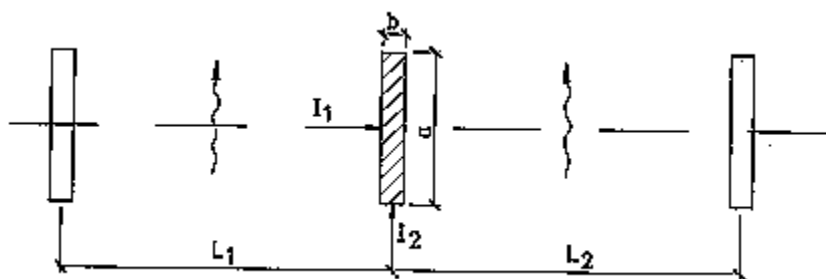
- Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar (termiskt istryck)
- Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar
- Dynamiskt tryck från drivande is
- Tryck från stort istäcke genom ström och vind
- Tryck från packis
- Vertikala krafter från fast istäcke

Allmänt

Maximala iskrafter verkande vinkelrätt eller parallellt brolinjen behöver ej antas verka samtidigt.

Maximala iskrafter antas kunna verka i godtyckligt höjdläge mellan MHW och MLW.

I figur 1.1 redovisas i denna publikation använda beteckningar.



Figur 1.1 Horisontalsektion genom bropelare.
Beteckningar.

1.1 Tryck från fast istäcke genom temperaturväxlingar

1.1.1 Ensidigt termiskt istryck blir i regel störst för bropelare intill eller i närheten av bruten isränna eller öppen strömfåra. Istrycket parallellt brolinjen kan antas motsvara en kraft

$$I_1 = i_1 a \quad (1)$$

som verkar jämnt fördelad på sträckan a meter.

- 1.1.2 Värden på i_1 för sötvattenis varierar normalt mellan 50 och 300 kN/m. Det högsta värdet kan i ogynnsamma fall för pelare intill öppen ränna uppnås redan vid 0,3 m tjock sötvattenis om isfältet har stor utsträckning parallellt brolinjen.
- 1.1.3 För pelare med måttet a mindre än 4 m sätts $a = 4$ m.
- 1.1.4 Om högt värde på i_1 tillämpas på pelare intill isränna eller strömfåra, beräknas bakomliggande pelare för $i_1/3$, dock lägst 50 kN/m.
- 1.1.5 I förekommande fall kan hänsyn tas till att högt istryck endast verkar mot pelarens ena sida.
- 1.1.6 För upptagande av extrema istryck och rörelser i riktning längs bron kan fasta och rörliga lager utformas så att flera pelare samverkar, t ex medelst stoppklackar.

1.2 Tryck från fast istäcke genom vattenståndsväxlingar

- 1.2.1 Vattenståndsväxlingar medför att istäcke omkring och mellan bropelare bryts och förtjockas. Ensidigt horisontalt tryck genom spännverkan eller valvverkan mellan pelare eller mellan pelare och landfäste kan därvid uppskattas enligt ekvation (1) där i_1 kan antas uppgå till i regel högst 200 kN/m.
- 1.2.2 Denna iskraft kan antas uppträda ensidigt mot pelare i ett eller flera fack.

1.3 Dynamiskt tryck från drivande is

- 1.3.1 Horisontalt tryck från drivande is som är sönderbruten i mindre stycken kan uppskattas genom ekv 2.

$$I_2 = i_2 (L_1 + L_2) / 2 \quad (2)$$

i_2 = istryck kN per meter av brolinjen, där i_2 normalt varierar mellan 10 och 30 kN/m.

- 1.3.2 Där stora drivande isflak kan förekomma uppskattas istrycket som alternativ enligt ekv (3).

$$I_2 = C_I \sigma_k d b \quad (3)$$

σ_k = isens krosshållfasthet, kPa

d = isens tjocklek, m

b = pelarnosens bredd, m. Vid cylindrisk pelare är b = diametern.

C_1 = formfaktor för pelarens bredd enligt tabellen nedan.

$b/d = 0,5$	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0 och större
$C_1 = 1,8$	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8

1.3.3

Isens krosshållfasthet uppskattas med ledning av följande värden.

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.

500 kPa för saltvattenis vid Sveriges västra kust.

1.3.4

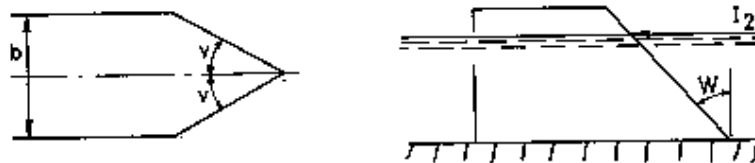
För bropelare med spetsig eller lutande framkant kan istrycket uppskattas med hjälp av ekv (4).

$$I_2 = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot s_k \cdot l \cdot b \quad (4)$$

C_1 = formfaktor enligt 1.3.2

$C_2 = "$ för spetsig framkant

$C_3 = "$ för lutande framkant



Figur 2 Pelare med spetsig eller lutande framkant.

$2v = 45^\circ$	60°	75°	90°	120°	180°
$C_2 = 0,54$	0,59	0,64	0,69	0,77	1,00

$W = 0-15^\circ$	$15-30^\circ$	$30-45^\circ$
$C_3 = 1,00$	0,75	0,50

Produkten $C_2 \cdot C_3$ bör inte sättas lägre än värdet 0,5.

- 1.3.5 Ekvationerna (3) och (4) förutsätter att strömriktningen vid isgång i huvudsak är riktad parallellt med pelarsektionens längdaxel. Dessutom antas ett samtidigt verkande tryck i framkanten vinkelrätt mot strömriktningen uppgående till 15 à 20% av totala trycket.
- 1.3.6 Om strömriktningen vid isgång är riktad i vinkel mot pelarsektionens längdaxel tillämpas ekv (3) och kraften delas upp vektorielt. Om nämnda vinkel skulle överstiga 30° krävs särskild utredning av iskrafternas storlek.
- 1.3.7 Vid pelare med låg styvhet bör hänsyn tas till det dynamiska istryckets vibrerande karaktär med höga momentana tryck och eventuella resonans-effekter.

1.4 Tryck från stort istäcke genom ström och vind

- 1.4.1 Bropelare i fast istäcke av stor utsträckning vinkelrätt bron beräknas för en kraft I_2 enligt ekv (2) där i_2 kan antas variera mellan 10 och 30 kN/m. Dessa värden kan i regel antas innefatta verkan av oliksidigt termiskt istryck.
- 1.4.2 Vid svårt utsatta lägen i öppen sjö kan istäcket krossas mot pelaren. I Östersjön kan trycket därvid uppgå till 1 500 - 2 500 kN per meter av pelarens tvärmått b . I Bottenviken kan ännu större istryck förekomma.

1.5 Tryck från packis

- 1.5.1 I brolägen där packis kan bygga upp mot bropelare kan i regel istryck bestämt enligt 1.3 eller 1.4 anses innefatta tryck mot bropelare från packis.
- 1.5.2 Brons överbyggnad bör ligga på sådan höjd över vattenytan att den icke nås av eventuell packisvall.
- 1.5.3 Risken för av packis orsakad bottenerosion kring pelares bottenplatta bör mötas genom utvidgat och förstärkt erosionsskydd.

1.6 Vertikala krafter från fast istäcke

- 1.6.1 I samband med vattenståndsväxlingar kan kraften från fast is enligt 1.2 få en vertikal uppåtriktad komponent uppgående till högst 1/3 av den horisontala.

- 1.6.2 Istäcke fastfruset i brostöd kan vid stigande vattenstånd ge upphov till en lyftkraft som vid pelarsektion enligt figur 1.1 kan uppskattas till

$$I_v = 2(a + b)i_v \quad i_v = 0,6d \cdot \sqrt{\sigma_b h \cdot k} \quad (5)$$

I_v = lyftkraft, kN

i_v = maximal lyftkraft vid lång rak vägg, kN/m

σ_b = istäckets böjhållfasthet, kPa

h = vattenståndshöjning, m

d = istjocklek, m

k = upptrycksmodul 10 kN/m³

- 1.6.3 Böjhållfastheten kan antas uppgå till maximalt 2 000 kPa för sötvattenis samt till 1 000 kPa för saltvattenis vid Sveriges västra kust. Vid istjocklek större än 0,6 m sättes $d = 0,6$ m. Störst lyftkraft uppkommer vid jämn och långsam höjning av vattenståndet.

- 1.6.4 Lyftkraft vid ensamstående påle, dykdalb eller liknande kan uppskattas enligt formeln

$$I_v = A \cdot d^2 \quad (6)$$

A antas uppgå till 1600 kN/m² för sötvattenis samt till 800 kN/m² för saltvattenis vid Sveriges västra kust. Vid istjocklek större än 0,6 m sättes $d=0,6$ m.

2. Problemöversikt

2.1 Inledning

Bropelare liksom andra konstruktioner i vatten i vårt land blir under vintern utsatta för krafter från isen. Hur stora krafterna kan bli från ett fast istäcke eller från drivande is är svårt att bestämt förutsäga i varje enskilt fall.

De statliga belastningsbestämmelserna (SOU 1961:12) anger värden med stor valfrihet. Istrycket från ett fast istäcke t ex uppskattas till mellan 2,5 och 20 ton per meter påverkad konstruktion (25-200 kN/m). Det aktuella värdet ska bestämmas med "hänsyn till konstruktionens form, styvhet och utsträckning samt till de lokala isförhållandena". Hur man ska kunna ta hänsyn till dessa faktorer anges ej närmare. Kunskaper på detta område saknas nämligen i stor utsträckning även om det forskats ganska mycket i flera delproblem.

Sålunda har det ensidiga istrycket från ett fast istäcke intresserat dammbyggare. En damm erbjuder lång front mot istäcket och stora krafter kan utvecklas när isen efter en köldperiod värms upp. Brobyggarna har främst ägnat sig åt att undersöka krafterna från drivande isflak som krossas mot brostöden. Denna typ av istryck har också blivit aktuell i samband med oljeborrningarna i arktiska vatten. Man har här numera kommit ganska långt och fått fram goda hållpunkter även om tillämpningen i enskilda fall fortfarande kan vara osäker.

För våra broar i Sverige är ofta krafterna från fast istäcke dimensionerande. Särskilt gäller detta för sidokrafter mot pelarna, dvs i riktning parallellt brolinjen. Det kan vara effekter av växlingar i temperatur eller vattenstånd, av ström eller av vind.

Istrycksmekanismerna i ett fast istäcke är komplicerade och kräver ingående analys och observationer av ismaterialets egenskaper och isens uppträdande i naturen.

2.2 Isens fysiska egenskaper

Is är ett kristallint, viskoelastiskt material där de enskilda kristallerna kan vara av olika storlek och orientering. Vid isbildning i sötvatten bildas i regel först ett tunnare lager av delvis horisontala kristaller. Därefter fortsätter tillväxten nedåt med huvudsakligen vertikalt riktade kristaller. Dessa kan bli nästan lika långa som isen är tjock och 5-15 cm i tvärmått. Över denna klaris eller kärnis bildas ofta av snö och vatten stöpis eller snöis som har mindre hårdhet än klarisen.

I strömmande vatten kan andra isformer uppträda. Vid stränderna och lugnare vattenområden utbildas först strandis i stort sett som ovan beskrivits. Istäcket tillväxer sedan utåt strömfåran genom ansamling av små godtyckligt orienterade kristaller, som utbildats i underkyllt ström-

mande vatten. Sådana iskristaller kan också bilda små isflak - pannkaksis - eller som en issörja - kravis (frazil ice) - frysa fast i flodbotten och vid olika konstruktioner samt därvid väsentligt ändra strömningsförhållandena. Se t ex Billfalk (24).

För snabba eller kortvariga belastningar - såsom när man går eller kör på isen - uppträder isen som ett elastiskt material. Vid längre belastningstid blir den viskösa deformationen dominerande. Förutom av tiden påverkas deformationerna av olika faktorer såsom istyp, kristallorientering och temperatur.

Värmeutvidgningen hos sötvattenis är ca 5 ggr stålets. Detta medför stora rörelser och spänningar vid temperaturändringar. Sjunker medeltemperaturen i isen t ex 10°C fås en förkortning av istäcket på ca 5 cm per 100 m längd.

Saltvattenis beter sig annorlunda. Sådant is har negativ utvidgningskoefficient, dvs isen sväller vid avkylning. Fenomenet beror på successiv frysning av den mellan kristallerna ansamlade saltlösningen som blir alltmer koncentrerad. Själva kristallerna består i huvudsak av ren is.

Isens hållfasthet varierar med temperatur, istyp och kraftriktning. Skaleffekten är betydande. Stora isprover har lägre hållfasthet än små. Tryckhållfastheten hos mindre iskuber kan uppgå till 5 à 10 MPa (50-100 kp/cm²). Fältförsök med block från naturligt istäcke kan ge värden på 0,5 à 2,0 MPa. Böjhållfastheten vid fältförsök rör sig också om dessa senare värden.

Tryckhållfastheten ökar väsentligt när isen blir kallare, men i praktiken motverkas ofta höjningen mer eller mindre av att isen också blir sprödare. Drag- och böjhållfastheten påverkas mindre av temperaturen.

Saltvattenis har generellt lägre hållfasthet än sötvattenis. För is i Östersjön syns dock denna skillnad icke vara framträdande. Spridningen är stor mellan olika fältförsök. Enligt isbrytarexpertis råder stor skillnad mellan västkustis och östersjöis. Den senare kan vara "hård och stark". För en mer detaljerad beskrivning av isens fysiska egenskaper se t ex Lars Bergdahl (15) eller B Michel (18).

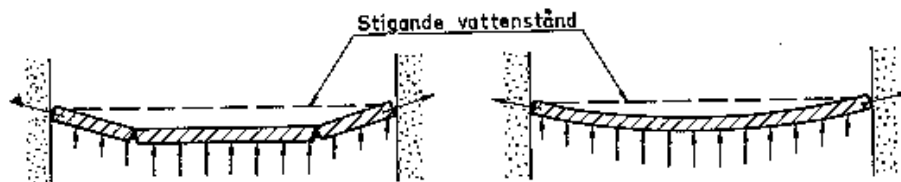
2.3 Rörelser och sprickor i fast istäcke

Om vattenståndet sjunker sedan istäcket bildats uppkommer böjspänningar invid stranden samt också viss dragning till följd av nedhängningen. Sprickor som uppstår fylls med vatten och fryser igen helt eller delvis, figur 2.1. Stiger sedan vattenståndet ger istillväxten i sprickan orsak till en skjutande kraft vinkelrätt mot stranden.



Figur 2.1 Strandspricka

Mellan två bropelare kan isen i ogynnsamt fall bilda ett sorts spännverk, figur 2.2, eller om sänkningen försiggår jämnt och långsamt, ett valv, figur 2.3.

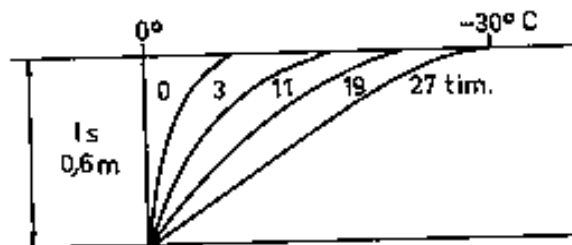


Figur 2.2 och 2.3 Sidokrafter vid stigande vattenstånd.
Idealiserade modeller.

Vid mindre brant strand kan de brutna isflaken skjutas långt upp som resultat av flera vattenståndsväxlingar. Mot bropelare och landfästen kan isen i stället bli skiktad till dubbel eller flerdubbel tjocklek.

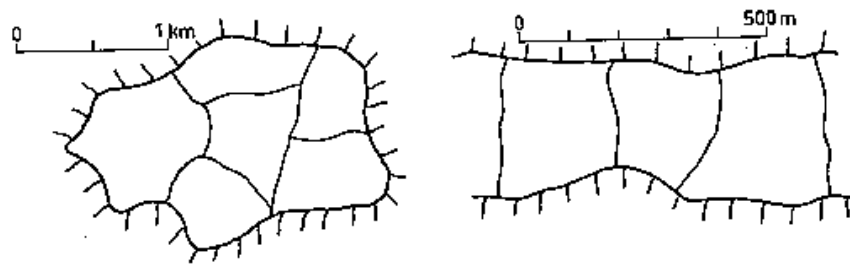
Förekommer öppna rännor såsom vid farled eller genom strömdrag, får istäcket en tendens att röra sig ut mot rännan och ger upphov till krafter mot fasta konstruktioner i isen som hindrar rörelsen.

Rörelsetendenser uppkommer också genom temperaturväxlingar. Isens underkant i beröring med vattnet har ständigt temperaturen noll, medan överdelen kan nedkylas till låga temperaturer om isen är fri från snö, figur 2.4.



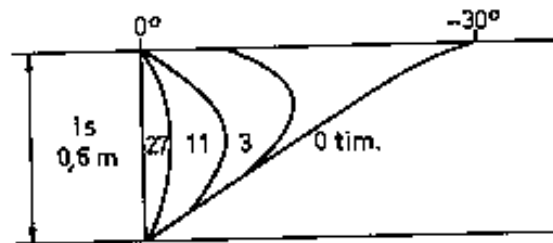
Figur 2.4 Avsvalning

Då istäcket i kanterna är fast hopfruset med land eller vid konstruktioner hindras hopdragningen, vilket ger dragspänningar och så småningom sprickor i istäcket. Sprickbildningen kan ofta höras som kraftiga smällar eller dån från isen. I de breda sprickorna tränger vatten upp och fryser till. Sprickorna eller råkarna uppträder ofta år från år på ställen där sprickanvisning ges vid utskjutande uddar, fasta bryggor eller dylikt. I övrigt utbildas de i olika mönster, figur 2.5. I långsmala istäcken sträcker sig de termiska sprickorna huvudsakligen tvärs över.



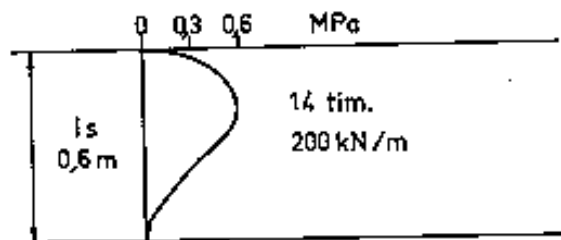
Figur 2.5 Exempel på termiska sprickor i en sjö och i ett sund

Om nu den kalla perioden åtföljs av en dag med hastigt stigande lufttemperatur - och kanske också solsken - blir isen med viss eftersläpning också uppvärmd, figur 2.6.



Figur 2.6 Uppvärmning

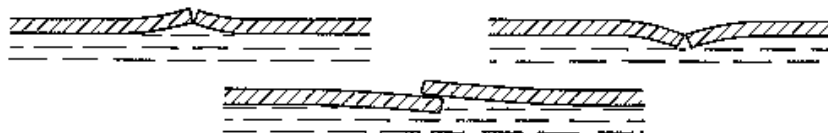
Förhindrad expansion leder till tryckspänningar vars kurva, figur 2.7, kan få en päronliknande form när totala trycket är som störst. Tryckspänningarna invid överytan, om isens temperatur är nära noll, har då i stort sett återgått genom den snabbare viskösa krypningen.



Figur 2.7 Termiskt istryck uppmätt vid modellförsök (5). Temperaturförlopp enligt figur 2.6

Tryckkrafterna begränsas således bl a tack vare isens viskösa karaktär. Tidsförloppet spelar stor roll. Ett snötäcke dämpar verksamt temperatursvängningarna. Redan 5 cm snö reducerar istrycket avsevärt.

Vid mindre istjocklek kan man ofta se att istrycket avlastats genom knäckning intill råkar. Tre olika typer kan uppträda, figur 2.8. Den första typen är vanligast. Den olikformiga avkyllningen medför att iskanten tenderar att böjas uppåt efter uppsprickningen. Temperaturändringar samt variationer i istjocklek och snöbelastning medför en viss allmän bucklighet i istäcket. Knäckning har observerats vid upptill 0,5 m istjocklek.



Figur 2.8 Knäckningsfenomen vid råkar

Det termiska trycket begränsas också om isen kan skjuta upp på stränderna invid vilka istäcket är söndersprucket till följd av vattenståndsväxlingarna.

Den sammanlagda effekten av temperatur- och vattenståndsväxlingar kan således under vinterns lopp medföra stora rörelser eller spänningar i istäcket. Ström och vind kan också ge sitt bidrag.

De krafter som härvid utvecklas mot fasta föremål beror i hög grad på tidsförloppet. Oftast är det fråga om långsamma förlopp som ger förhållandevis små iskrafter.

2.4. Termiskt istryck

Det termiska istrycket är ett gammalt och teoretiskt sett mycket vanskligt problem. Anledningen är i första hand att isens reologiska beteende är variabelt och svårfångat, i andra hand att det kan vara svårt att definiera de yttre förutsättningarna.

Den förste som angrep problemet vetenskapligt var Nils Royen 1922 (1). Med tanke på att isförsöken utfördes på hemmabalkongen står sig Royens resultat ändå ganska väl, som framgår av sammanställningen i bilaga 1. Lars Bergdahls arbeten 1978 (15, 16, 17) representerar den hittills mest ingående analysen.

Mätning av istrycket direkt i ett naturligt istäcke bjuder på svårigheter men har tidigare utförts t ex i några vattenmagasin i Nordamerika. Krister Cederwall, Lennart Fransson och medarbetare har under tre vintrar registrerat istryck mot en bropelare i nya Gäddviksbron i Luleälv (20, 23, 26). Med hjälp av inbäddade givare i isen och en reologisk modell, vars konstanter bestäms empiriskt från mätningarna, kan istryck vid mera extrema temperaturändringar uppskattas.

En mellanliggande metod är att framställa en modell av ett naturligt istäcke i ett frysrum och direkt mäta temperatur- och tryckförlopp i isen (5).

Som syns av bilaga 1 varierar värdena från olika undersökningar, men storleksordningen skiljer inte väsentligt. Till en del kan skillnaderna bero på mer eller mindre extrema temperaturförutsättningar.

2.5 Termiskt istryck mot bropelare

De värden för ensidigt istryck som anges i SOU 1961:4 för broar 100-200 kN/m är lägre än de framtagna värdena för dammbyggnader. I själva verket ligger praxis ännu lägre. Det högre värdet 200 kN/m har endast undantagsvis tillämpats. Som senare i avsnitt 2.12.2 ska visas ligger medelvärdet för antaget sidotryck för 14 norrlandsbroar på 32 kN/m. Nu är visserligen de flesta bropelare inte utsatta för rent ensidigt tryck och säkerhetsmarginalen kan vara hög. Skillnaden syns dock vara väl stor. Ej heller för dammbyggnader har de högre värdena använts i större utsträckning. Teori och praktik stämmer inte!

En bropelare som utsätts för ensidigt termiskt istryck - såsom intill en bruten isränna - bör genom sidoeffekterna få större belastning per meter än en tänkt dammfront i samma läge. I bilaga 2 visas en kalkyl som leder till att en ensam pelare i sådant läge skulle få ett många gånger större istryck, särskilt vid stort avstånd A till den mothållande stranden. Även om flera bropelare skulle samverka mot sidoeffekterna blir trycket långt större än vad som enligt erfarenhet syns rimligt. Klyftan mellan teori och praktisk erfarenhet vidgas ytterligare!

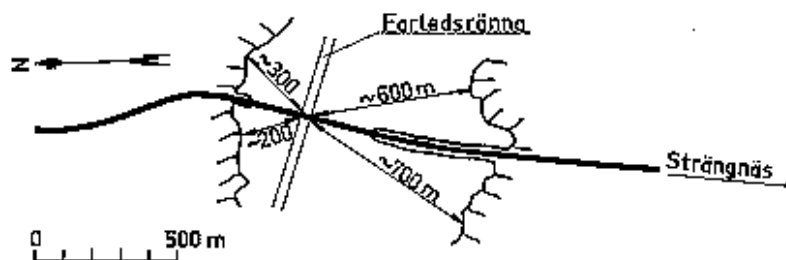
För förklaring av denna synbarligen bristande överensstämmelse mellan teori och praktik måste de olika förutsättningar som brukar göras vid analys och beräkning av termiskt istryck skärskådas.

- a. Istjocklek. De maximala termiska istrycken kan uppträda vid 0,5-0,7 m tjock is varför detta villkor är uppfyllt för större delen av Sverige. I de reglerade älvarna i norr är 0,4-0,6 m normalt den största istjockleken. Den kan bli betydligt större i vikar med lugnvatten och i sjöar.
- b. Snöfrihet. Redan 5 cm snö reducerar de termiska istrycken avsevärt varför de normalt blir små under den större delen av vintern då isen är snötäckt. Risken för kombinationen tjock, snöfri is och extrema temperaturvariationer är störst på för- och eftervintern. På eftervintern är det oftast snöis överst vilket ger lägre tryck.
- c. Temperatur. De extrema temperaturstegringarna från t ex -30°C - 0° inom ett dygn eller så som vanligen förutsättes vid beräkningar och försök, är alltför extrema för större delen av vårt land. De kan huvudsakligen inträffa i västra och norra Norrland då en köldperiod avbryts av varma västliga atlantvindar. Bergdahl har statistiskt underlag för sina temperaturer. De tre värdena som medtagits i bilaga 1 erhöles för snabba temperaturstegringar på 20, 26 resp 15°C och gäller en 100-årsperiod. Att istrycken dock syns höga kräver fortsatt diskussion.
- d. Termiska sprickor. Man förutsätter att isen är spänningslös och att alla sprickor är utfyllda med is vid början av uppvärmningen. Ser vi på förloppet i detalj så börjar isen spricka när överytan avkylts till ca -10°C . Några sprickor utbildas till råkar. Genom den olikformiga temperaturen och då istäcket förblir mer eller mindre plant, kvarstår öppna sprickor och dragspänningar i de övre och tryckspänningar i de undre skikten i isen. Vid fortsatt avkylning ökar drag- och tryckspänningarna varvid nya sprickor kan uppstå. Dessa blir dock i regel icke genomgående som en del av de första utan slutar mot den undre tryckzonen. De kan alltså inte fyllas med vatten underifrån. Utgångsläget när uppvärmningen börjar är då ett annat och gynnsammare än man vanligen utgår ifrån vid försök och kalkyler.
- e. Mothåll. Som tidigare nämnts skjuter isen ofta upp på stränderna. Istrycket vinkelrätt stranden minskas. Detta minskar den sidoeffekt som behandlades i bilaga 2. Mellan två bropelare är mothållet 100% om isen är obruten vilket dock oftast inte är fallet vid större istjocklek. I regel får härvid pelaren tryck från båda sidor.
- f. Anliggning. Bruten is runt bropelare minskar trycket. I sneda sprickor kan blocken glida vilket ger effektiv avlastning.

- g. Knäckning. Det termiska istrycket kan begränsas genom att istäcket knäcker ut. Knäckkraften för omkring halvmeter tjock, obruten is syns vara av samma storleksordning som maximalt termiskt tryck. För mindre tjocklek sjunker kraften i proportion till $d^{3/2}$ (d = istjockleken) vilket innebär att knäckkraften blir bestämmande. Knäckning mot en råk (led) halverar knäckkraften vilket ytterligare kan reducera det termiska trycket.

En kombination av de ogynnsammaste villkoren i samtliga ovanstående punkter torde statistiskt sett vara synnerligen sällsynt för de flesta bropelare. Speciellt att isen inte är spänningsfri och sprickfri vid uppvärmningens början kan helt generellt vara den viktigaste faktorn i sammanhanget.

Det finns emellertid också faktorer som kan verka försvårande särskilt vid lägre eller breda broar. Under tidigare nämnda mätningar vid nya Gäddviksbron över Luleälv noterades att isen under bron förblev snöfri genom hela vintern (20, 23, 26). Snövallar på sidorna kvarhöll smältvatten och uppsvämmande vatten. Isen blev tjockare än utanför och utsatt för lufttemperaturens växlingar. Vidare visar det sig (26) att uppvattning kan åstadkomma snabbare uppvärmning än vad en höjning av lufttemperaturen ger - således högre termiskt tryck.



Figur 2.9 Bro över Mälaren vid Hjulsta

Att termiska istryck av betydelse kan uppträda visar en händelse vid Hjulstabron, figur 2.9, som beskrivits av Stig Haggård (7).

Bron har ett svängspann över farleden där en isränna var bruten i januari 1953. Lufttemperaturen hade stigit från -20° till -6°C på ca 12 timmar. Obetydligt med snö täckte den 22 cm tjocka kärnisen. Den södra anslagspelaren pressades av isen 4-5 cm till anliggning mot svängspannet. Rörelser konstaterades även hos angränsande pelare som stod på träpålar. Anslagspelaren var grundlagd på fast botten.

Haggård beräknar stjälpningskraften till 3 000 kN, vilket motsvarar 270 kN/m. Det påpekas att istrycket varit större än detta värde - anliggningsstrycket mot svängspannet kunde ej uppskattas. Vid projekteringen hade man antagit ett istryck av 1 000 kN i godtycklig riktning på svängpelare och anslagspelare.

I bilaga 2 härleds ett uttryck för istryck mot en ensam pelare intill en ränna. För Hjulstabron kan man anta att de 7 pelarna på södra sidan jämte den långa banken samverkat mot istäckets expansion i brons längdriktning. Effektiva avståndet A till stranden rör sig om 600-700 m. Intressant att konstatera är att den norra anslagspelaren klarade sig. Avståndet A är där 200-300 m, således mindre än hälften. Alla andra faktorer torde ha varit likartade. Isfältets storlek och utsträckning längs bron syns således vara en avgörande faktor för termiskt istryck mot bropelare.

I H T Barnes gamla men förnämliga bok "Ice Engineering" (2) finns två referenser från Nordamerika. I ena fallet observerades att istäcket mellan två bropelare med 27 m öppning utvidgade sig och bildade ett valv med hjässan 0,9 m över ursprunglig nivå. Trycket från istäcket som var 0,3 m tjockt beräknades till 320 kN/m.

I det andra fallet försköts en bropelare med is endast på ena sidan 5 cm och höll sig kvar medan ett tåg passerade bron. Istrycket beräknades till 270 kN/m. Istjocklek 0,3 m.

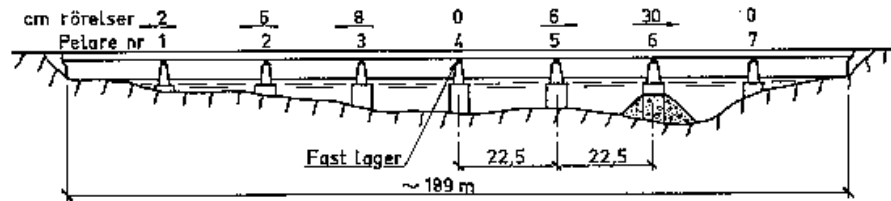
Även om högre termiskt istryck mot bropelare i brons längdriktning inte kan uteslutas, torde 300 kN/m kunna anses som ett praktiskt maximumvärde. Detta gäller sötvattenis. Hur stort trycket blir i saltvattenis vet man inte. Här finns en forskningsuppgift.

2.6 Istryck vid vattenståndsväxlingar

Denna typ av istryck kan verka mellan stöden som visas i figur 2.2 och 2.3. Detta är ett mycket utforskat område, vilket torde bero på att det termiska trycket ansetts vara ensamt dimensionerande i denna riktning. Antagligen är detta riktigt i de flesta fall. I Canada har liknande fenomen också observerats och benämnes "jacking" eller "wedge action" ehuru innebörden av dessa termer är något oklar (21).

I samband med korttidsreglering i älvar bör dess inverkan på istrycket beaktas i vissa fall. Istäcket bryts genom de täta växlingarna i vattenståndet och bygger upp tjockleken kring brostöden. O gynnsamma kombinationer kan tidvis ge beaktansvärda krafter. Liknande effekter kan också uppträda i lägen där växlingarna i havsvattenståndet kan spela in.

När det gäller storleken av dessa iskrafter är det i och för sig lätt att räkna på olika modeller av spännverk eller valv men frågan är hur pass stor sannolikheten är att modellen någon gång ska motsvara verkligheten i det enskilda fallet. Följande praktikfall kan belysa problemet.



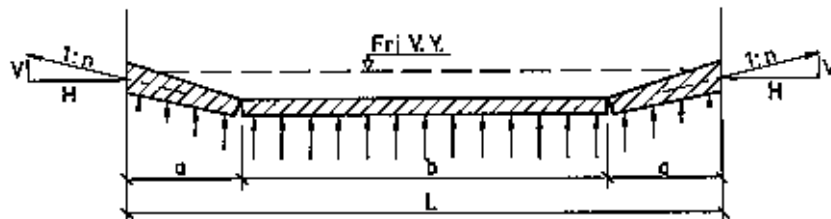
Figur 2.10 Bro över Umeälv i Lycksele

I februari 1959 försköts i ovanstående bro en av pelarna så mycket att det rörliga lagret föll ned på isen och bronns överbyggnad böjde sig ned över lagerplattorna.

Mellanpelaren nr 4 hade fast lager och stod still medan pelarna på ömse sidor försköts i riktning mot land. Pelare nr 6 som tappade lagret fick den största rörelsen, 30 cm.

Bron är en kontinuerlig stålbalnsbro i åtta spann. Pelare 6 består nederst av en ca 7 m hög timrad stenista och överst av en ca 5 m hög kallmur. Öppningen mellan stöden är ca 20 m.

Isens tjocklek var 0,6 - 1,2 m utanför bron. I öppningarna på båda sidor om pelare 6 var tjockleken 1,1 m och intill pelaren 2,4 m. En längre tid hade dygnsvariationer i vattenståndet på upptill 1,0 - 1,5 m förekommit.



Figur 2.11 Beräkningsmodell för spännverkan

En modell enligt figur 2.11 förutsätts. Antag $a = 3$ m, $b = 14$ m $1:n = 1:3$, vattenståndet höjs 1 m.

Om vi bortser från upptrycket på delarna a blir horisontalkraften $H = 14 \cdot 3 \cdot 1/2 = 210$ kN/m. Vertikalt lyftande kraft blir 70 kN/m. Antar vi i stället $a = 4$ m, $b = 12$ m $1:n = 1:4$ fås $H = 240$ kN/m och lyftkraften 60 kN/m.

Pelaren nr 6 beräknades tåla högst 900 kN för stjälpning eller 110 kN/m. De beräknade iskrafterna räcker således väl till för att förklara förskjutningarna. Huruvida dessa i verkligheten uppkommit just såsom beräkningsmodellen visar är dock okänt.

När istäcket sjunker utbildas även dragkrafter och nedåtriktade vertikalkrafter. Om förloppet är likartat på båda sidor om pelaren blir den horisontella resultanten = 0. Sannolikt är för det mesta påverkan osymmetrisk genom att t ex isen plötsligt brister på ena sidan men inte på den andra.

En intressant omständighet i Lyckselefallet är att pelarna förskjutits i riktning mot land på båda sidor om mittpelaren. Den motsatta riktningen är i regel att förvänta. Förklaringen torde vara att öppen räna saknats och att istäcket kunnat arbeta sig upp på land på båda älvstränderna.

2.7 Drivande is

För broar där drivande is förekommer kan stora krafter utvecklas när stora isflak eller ispackar törnar mot och krossas mot bropelaren. I några fall där bropelare skadats har man kunnat beräkna istrycket.

I Canada försköts en bropelare genom stöt från ett stort isflak. Krosshållfastheten hos isen beräknades till 1 000 kPa, dvs 1 000 kN/per m² anliggningsyta. Den senare är pelarbredden gånger istjockleken.

Från Kina finns ett fall med delvis stjälpning där kraften beräknades till 3 000 kN mot en 4,1 m bred pelare. Istjockleken var 0,4 m och temperaturen -20°C. Detta ger 1800 kPa, vilket svarar mot speciellt kall och stark is.

Ett praktikfall i Sverige har redovisats av Nils-Olof Larsson (13) som följer. "Vid bron över Torne älv vid Pello stjälppte under byggnadstiden en av pelarna i maj 1971 under mycket kraftig isgång i älven. Brottet skedde i snittet mellan bottenplatta och pelarskaft i pelarens "veka" riktning (brons längdriktning). Istrycket vid pelaren kan beräknas ha överstigit 90 Mp dvs ca 12 Mp per m påverkad konstruktion. Vid pelarens ombyggnad dimensionerades konstruktionen för tre gånger så stora istryck. De befintliga pelarna förstärktes även i motsvarande grad. Pelarna kompletterades vidare med isbrytarnosar på uppströmssidan" (12 Mp = 120 kN).

Ryska forskare - främst K N Korzavin - har ingående studerat problemet med drivande is liksom övriga isproblem. Omfattande fältförsök utfördes där man studerade brytmekanismen då isflak rör sig mot och förbi en bropelare. Förloppet filmades och isflakens retardation mättes. Härigenom fick man fram iskrafterna. Man studerade också skaleffekten. Brott-förloppet för drivande isflak har sedermera studerats på flera andra håll vilket bl a resulterat i nya normer i Canada 1978 (CSA Standard CAN-S6-M78).

Dynamiskt istryck från drivande is kan beräknas som produkten av isflakens krosshållfasthet och anliggningsytan. Hänsyn till framkantens spetsighet och lutning samt skaleffekten kan tagas genom tre formfaktorer som i huvudsak grundar sig på modellförsök, se avsnitt 1.3.

Att sammanföra formfaktorerna $C_1C_2C_3$ som skett i ekv (4) i avsnitt I är teoretiskt sett inte korrekt. Vid lutande front bryts isflaken genom böjning kombinerad med krossning varvid andra hållfasthetstal gäller. Med hänsyn till isgångens slumpartade karaktär bedöms dock ekv (4) ge en användbar approximation. Formfaktorerna är - trots alla teorier - spekulativa och bör användas varsamt. Värdet av spetsig pelarnos och lutande framkant kan ibland vara diskutabelt.

För isflakens krosshållfasthet anger de kanadensiska normerna följande värden.

- a. ca 700 kPa (70 t/m²) vid isgång där isen är sönderbruten i små stycken.
- b. ca 1400 kPa när större flak av kärnis rör sig mot pelaren.
- c. ca 2100 kPa när hela istäcket eller mycket stora flak kan träffa pelaren.
- d. ca 2800 kPa när i föregående fall istemperaturen är betydligt lägre än 0°C.

I fall a och b förutsättes istemperatur nära 0°C.

Ovanstående värden syns sträcka sig onödigt högt - i varje fall för våra förhållanden. I de ryska bestämmelserna från 1966 varierar värdena från 450 till 1700 kPa, varvid det höga värdet gäller kall kärnis i de sibiriska floderna som bryter upp från söder till norr. I senare bestämmelser från 1976 har gränsvärdena sänkts till 440 respektive 1470 kPa.

Beträffande strömhastighetens inverkan gäller att låg hastighet, t ex 0,5 m/s, kan ge större tryck än hög hastighet, t ex 1,5 m/s. Å andra sidan krävs vid den lägre hastigheten större isflak - större massa - för att uppehålla det dynamiska trycket. Då kall is är sprödare än nollgradig is är också istemperaturens inverkan på iskrafternas storlek diskutabel.

När bropelaren skär igenom isflaket fluktuerar trycket starkt i fas med brytprocessen. Det momentana trycket blir väsentligt större än medeltrycket som de angivna värdena avser. Spetskrafterna kan absorberas i tyngre konstruktioner men vid mindre styva konstruktioner bör vibrationerna beaktas. Resonansfenomen kan uppträda. Sådana har t ex observerats vid smäckra fyrorn.

Även om strömriktningen i huvudsak är parallell med pelarsidorna kan sidokrafter uppkomma t ex genom excentrisk stöt av ett stort isflak. I de kanadensiska normerna antas en sidokraft av 15-20% av totala iskraften. Detta motsvarar en sned kraftriktning av 9-12°. Vid sned strömriktning delas kraften upp vektorielt. Gränsen för giltigheten av ekv (3) i avsnitt 1.3 har satts till 30° vinkel mellan strömriktning och pelarens långsida.

2.8 Istryck genom ström och vind

Trycket från ett fast istäcke orsakat av ström och vind är ett belastningsfall som i regel inte blir dimensionerande för bropelare. Annorlunda ställer det sig för t ex fyrtorn i öppen sjö där istäcket i sin helhet kan försättas i rörelse och krossas mot tornet. För broar i mycket öppet läge vid kusterna bör dock detta fall beaktas. Som exempel kan nämnas Ölandsbron.

Fyren Tainio i Finska viken försköts - innan grunden hunnit bli injekterad - ca 14 m över en plan berghäll. Istrycket kunde beräknas till 4 000-5 600 kN eller på 3,5 m bredd 1 150-1 600 kN/m (9).

Enligt Alf Engelbrektsson (12) syns iskrafter mot fasta fyrrar på 5 000-10 000 kN kunna förekomma med relativt hög frekvens i Bottenviken. Vid fyrrar med diametern mindre än 3-4 m ökar istrycket räknat per m bredd.

För en bro i öppet läge samverkar samtliga pelare till att motverka istäckets rörelse. För Ölandsbron antogs ifrågavarande typ av istryck uppgå till högst 30 kN per längdmeter av brolinjen. I mera skyddade lägen kan detta värde sänkas.

2.9 Packis

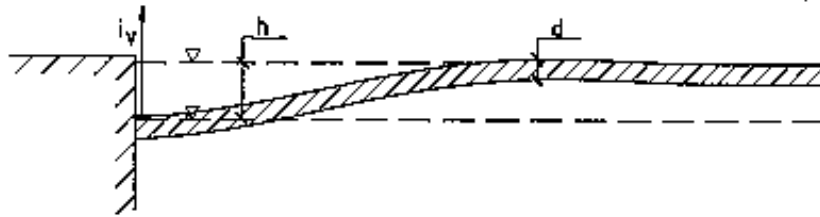
Trycket mot bropelare från packis torde hos oss i regel icke bli dimensionerande. Det finns fall i utlandet där broar helt eller delvis förstörts av packis. Detta har inträffat i floder där isen fyllt större delen av sektionen. Härigenom har exceptionell uppdämning uppstått, ismassan har nått upp till broöverbyggnaden och vattentrycket har försatt ismassan i rörelse. Broöverbyggnaden har lyfts av eller stjälpst men bropelarna syns i regel ha stått kvar. I andra fall har bropelare skadats på grund av bottenerosion mellan pelarna, orsakad av de ändrade strömningsförhållandena.

Att stora krafter kan uppträda genom packis vid öppna vatten visades i april 1969 då fyrtornet Nygrån vid Rönnskär i Bottenviken stjälpst av ismassorna. Fyren som byggdes 1958 var 2,5 m diameter i vattenlinjen och stod på en kassun 14 m i diameter. Vattendjupet var ca 5 m. Tornet bröts av 1 m under vattenytan i anslutning till kassunen. Det var beräknat för ett istryck av 3 750 kN (1 500 kN/m) verkande 0,5 m över vattenytan. Packisen byggde sannolikt upp till stor höjd så att tryckresultanten kom att verka på omkring 2 m över vattenytan. Totala trycket beräknas ha uppgått till omkring 4 000 kN (1 600 kN/m) dvs samma storleksordning som för Tainio fyr enligt föregående. Sannolikt uppkommer de stora istrycken sedan de lösa flaken i packisen frusit ihop så att en fast struktur uppkommit (11, 12).

Lärdomen är således att i brolägen där packisvallar mot pelarna kan förväntas uppträda bör dels bronns överbyggnad förläggas på betryggande höjd, dels förstärkt erosionsskydd mot bottenerosion utläggas.

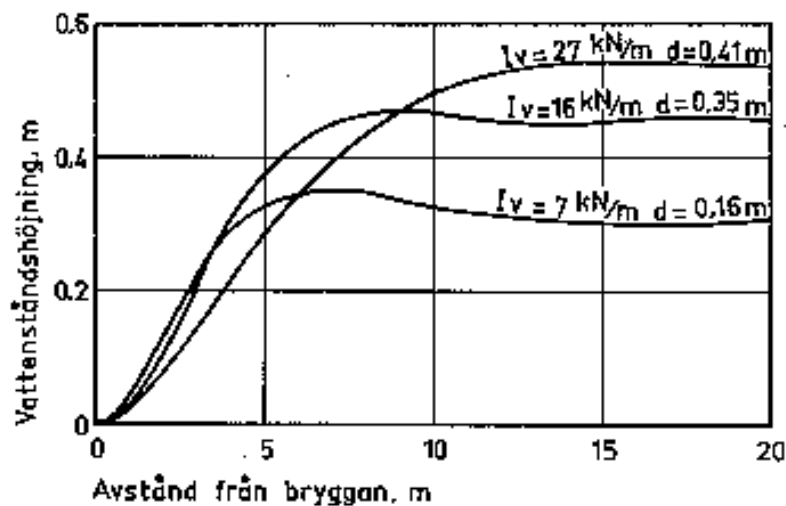
2.10 Istäckets lyftkraft

Vid vattenståndsväxlingar kan vertikala krafter uppkomma som komponenter vid spännverkan (figur 2.11). Vertikala krafter uppträder också ensamma om istäcket är fastfruset och vattenståndet ändrar sig, figur 2.12. Lyftkraften är av intresse främst för mindre konstruktioner såsom bryggor, ledverk, pålar och dykdalber, vilka kan lyftas av istäcket när vattnet stiger. För bropelare vållar dessa lyftkrafter normalt inga olägenheter.



Figur 2.12 Istäcket lyfts när vattnet stiger

Lyftkraften kan beräknas med hjälp av teorierna för balkar och plattor på elastiskt underlag, om man inför en reducerad och varierande elasticitetsmodul för isen (3). Istäckets utböjning ansluter sig mycket väl till den som erhålles för en rent elastisk isremsa, figur 2.13.



Figur 2.13 Uppmätta utböjningar hos istäcket intill en brygga, bestående av i rad ställda stenistor. Båtskärsnäs fiskehamn (3)

Då lyftkraften är lika med displacementen av fördjupningen i istäcket kan man genom avvägning bestämma det verkliga värdet på lyftkraften. För den maximala lyftkraften vid en lång rak vägg kan man uppställa formeln

$$i_v = 0,6d\sqrt{kh\sigma_b}$$

i_v = maximal lyftkraft, kN/m

d = istjocklek, m

σ_b = isens böjhållfasthet, kPa

h = vattenståndshöjning, m

k = uppretrycksmodul = 10 kN/m³

Böjhållfastheten för kärnis kan i detta sammanhang sättas till ca 1 000 kPa i medeltal och maximalt ca 2 000 kPa. Formeln förutsätter att höjningen sker jämnt och långsamt, i annat fall brister isen för små höjningar varvid maximala lyftkraften blir mindre. För is tjockare än 0,6 m sätts förslagsvis $d = 0,6$. Den tjockare isen har lägre hållfasthet och är i regel sprucken intill konstruktioner. För vattenståndshöjningen torde den praktiska gränsen ligga mellan 0,5 och 1,0 m.

Ensamstående pålar eller dykdalber kan ofta lyftas av isen. Lyftkraften är i stort sett identisk med isens bärförmåga för koncentrerad last. Skillnaden ligger i att när det gäller lyftkraften måste man gardera sig mot höga värden för istäckets hållfasthet och deformationsförmåga. För bärförmågan blir låga värden avgörande. Bärförmågan har undersökts på många håll (3), (4), (8), (28).

Man kan sätta vertikala lyftkraften

$$I_v = K\sigma_b \cdot d^2$$

där K är en faktor som vid olika undersökningar med koncentrerad last varierar i stort sett mellan 0,3 och 0,8. Då också σ_b är en osäker storhet är det praktiskt att skriva formeln

$$I_v = A \cdot d^2, \quad A = K\sigma_b$$

A -värdet vid olika belastningsförsök på naturliga istäcken ligger i regel mellan 700 och 2 000 kN/m².

I de ryska normerna av 1966 anges en formel för pålar och dykdalber där föremålets diameter D beaktas

$$I_v = \frac{3000d^2}{\log 50d / D}$$

För $D = d$ ger formeln $A = 770$ kN/m² vilket syns vara väl lågt för maximal lyftkraft.

Lyftkraften vid en infrusen påle bör på grund av inhomogeniteten i spänningsskiktet vara något lägre än maximal bärrighet hos ett homogent istäcke. $A = 1\,600$ kN/m² kan därför vara ett lämpligt maximivärde för sötvattenis.

P Tryde (25) har studerat ett stort antal fall av lyfta pålar i danska marinor. Av totalt 30 500 pålar blev ca 4 000 lyfta av isen och av dessa var 230 brutna. Tryde anger - med våra beteckningar - den empiriska formeln

$$I_v = 0,8 s_b d^{1,75} D^{0,25}$$

vilken för $D = d$ blir identisk med vår första formel med $K = 0,8$.

Böjhållfastheten hos saltvattenis i danska farvatten har bestämts till i medeltal 500 kPa. Maximivärdet kan uppskattas till ca 1 000 kPa. Detta ger ett A-värde på 800 kN/m².

2.11 Sprängningstryck

Att is i sprickor och håligheter kan spränga är allmänt bekant. Trycket blir mycket stort om systemet vatten-is hindras öka sin volym vid frysning. Trycket ökar ungefär linjärt med antalet minusgrader till ca -20°C då trycket kan uppgå till ca 200 Mpa (2 000 kp/cm²).

I ett fall spräcktes en 2,4 m tjock betongpelare till följd av isbildning i ett odränerat rör med diametern 20 cm i pelarens mitt. Ursparingar för räckeståndare och liknande har också skadats genom fenomenet.

Eventuella håligheter i pelare bör skyddas från att fyllas med vatten dels genom att skyddas mot inläckning, dels genom dränage. Elastiskt fyllmaterial är också ett motmedel. Vått ingjutet trävirke kan dock vålla frostsprängning (27).

2.12 Erfarenheter från broar i Sverige

I kapitlet om termiskt istryck påtalades den stora skillnad som finns mellan teori och praktisk erfarenhet. Detta syns gälla iskrafter mot bropelare i allmänhet. Man kan få intrycket att de stora iskrafter som de flesta undersökningar leder fram till knappast förekommer i sinnevärlden. För att få exempel på höga värden måste man mer eller mindre söka jorden runt.

De naturliga förutsättningarna är tydligen i övervägande antal fall av sådan art och kombination att de största eller de stora krafterna icke kan utvecklas.

För fyrar i öppen sjö är erfarenheten snarare den motsatta. Förutom de två fall som tidigare redovisats har ytterligare fyra fasta fyrar i svenska och finska farvatten förstörts av iskrafter under senare år.

För att komma fram till regler för istryck måste värdena fortfarande till stor del baseras på erfarenheten. Det gäller således att sammanlänka empirisk och teoretisk kunskap.

2.12.1 Istryck vinkelrätt brolinjen

Istrycksvärden enligt olika bestämmelser eller förslag har sammanställts i bilaga 3. För att få jämförelse visas värden som gäller för stöдавståndet $L=30$ m, pelartjocklek $b=2$ m och istjocklek $d=0,6$ m.

Från en kommitté inom Nordiska Vägtekniska förbundet (NVF) föreligger ett förslag från 1978, bilaga 4, som innebär höjda istryck jämfört med gällande svenska normer (SOU 1961:12).

Bo Eriksson vid Vägverkets brotekniksektion har sammanställt data från 17 befintliga broar över Lule älv och Skellefte älv, bilaga 5, samt inhämtat uppgifter om isförhållandena från SMHI.

Antagna istryck vinkelrätt brolinjen för dessa broar varierar mellan 100 och 2 100 kN eller i relation till stöдавståndet mellan 4 och 20 kN/m. Medelvärde är ca 13 kN/m. Anliggningstrycket som motsvarar σ_k i formel (3), avsnitt 1, varierar mellan 100 och 1 100 kPa, i medeltal ca 500 kPa, om istjockleken antas till 0,6 m.

I förslaget från NVF antas 20 - 30 kN/m, dvs större tryck än som tillämpats för många, speciellt äldre befintliga broar i Sverige.

Om man studerar SMHI:s uppgifter om isförhållandena vid brolägena framgår att islossningen genomgående försiggår lugnt och odramatiskt. Någon större mängd drivis eller isgång förekommer i regel inte. Det är ju fråga om reglerade älvar med flera dammar och kraftverk, där starkare vårflod och isdrift förhindras. Dynamiskt istryck kan i viss utsträckning vållas av att närbelägna strandisar lossnar och driver ned mot brostöden.

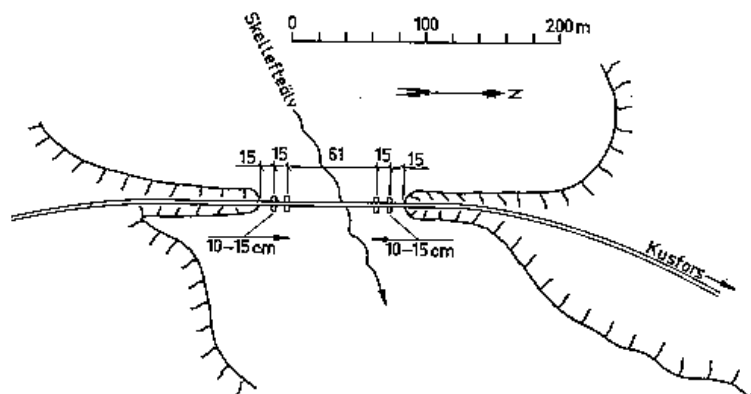
Broarna i bilaga 5 och därtill åtskilliga fler i andra älvar, vattendrag och vikar har stått i många år. Inget fall i Sverige har rapporterats så vitt jag vet, där ett mellanstöd förskjutits i sin längdriktning, dvs vinkelrätt mot brolinjen. Nu innebär detta icke att istryck större än de antagna icke en eller annan gång förekommit. Den verkliga säkerhetsfaktorn mot enbart istryck kan uppgå till 2 à 3 eller mer.

Något starkt skäl till stor höjning av antagna istryck i förhållande till i varje fall modern praxis för reglerade älvar föreligger knappast. Med hänsyn till den variation i förutsättningar som kan förekomma kan dock lämpligen ramen vidgas något i förhållande till NVF:s förslag. I förslaget, avsnitt 1.3, har antagits 10-30 kN/m per meter stöдавstånd för reglerad älv.

Termiskt istryck från fast istäcke kan givetvis också uppträda vinkelrätt bron men då oftast samtidigt från båda håll mot en i isen innesluten pelare. Detta fall blir dimensionerande om stort isfält eller öppet vatten förekommer i huvudsak endast på ena sidan av bron eller om omgivande isfält i sin helhet kan förskjutas.

2.12.2 Istryck parallellt brolinjen

Vid brobygget i oreglerade Torne älv vid Pello (avsnitt 2.7) uppstod stora sidokrafter på en bropelare genom drivande is. Stora iskrafter mot bropelare i denna riktning uppkommer dock i regel främst vid fast istäcke. Hjulstabron gav exempel på termiskt tryck, Lyckselebron på tryck genom vattenståndsväxlingar. I följande fall syns båda effekterna ha samverkat.



Figur 2.14 Järnvägsbro över Skellefteälv vid Kusfors

Kusforsbron består av ett 61 m mittspänn, utformat som båge med avstyvningsbalk samt på vardera sidan två 15 m sidospänn i form av kontinuerliga balkar. Sidospännerna har fasta lager på landfästena och rörliga lager på mittspännets pelare och på mellanpelarna.

1970 höjdes vattenståndet 7 m i samband med älvens reglering. Mellanpelarna förstärktes genom vissa utfyllningar. 1974 observerades att toppen av en mellanpelare förskjutits 10 à 15 cm i riktning från landfästet. 1977 konstaterades att den andra mellanpelaren förskjutits lika mycket också i riktning från närmaste landfäste.

På grund av korttidsreglering förekom dygnsvariationer i vattenståndet på 0,2-0,7 m i några fall upp till 1,0 m. Istäcket runt pelarna bryts då upp och förtjockas på ett oregelbundet sätt. Vid ogynnsamma kombinationer av isflaken kan vid enstaka tillfällen större horisontaltryck utvecklas t ex såsom demonstrerades i fallet med Lyckselebron. Öppen ränna under för- och eftervintern medför dessutom en allmän rörelse hos istäcket ut mot strömfåran.

Stjälpande kraft för mellanpelaren uppskattades till endast 300 kN varför fallet inte ger någon högre siffra på möjligt istryck.

Förutsättningar finns också för termiskt tryck som vid Hjulstabron. Som framgår av situationsplanen figur 2.14 ligger ett relativt stort isfält "bakom" bropelarna på sidorna av brolinjen.

Kusforsfallet har även undersökts av Krister Cederwall (20, 22) som utfört kontinuerliga mätningar av en mellanpelares rörelser under vintern 1979-1980. Rörelserna korrelerades med variationerna i lufttemperatur

och vattenstånd. Temperaturen inverkan dominerade något över den senare faktorn. Istäcket var ca 1,0 m tjockt under bron och snöfritt. Utanför var isen 0,6-0,7 m med endast 0-5 cm snö. För ytterligare synpunkter och uppgifter i Kusforsfallet hänvisas till Krister Cederwalls rapport och artikel.

De utländska normerna ger ingen ledning i fråga om storleken av tryck från fast istäcke parallellt bron. De ryska normerna från 1966 visar hur termiskt tryck ska beräknas mot en lång vägg (damm). Beräkningarna är något omständliga och knappast möjliga att tillämpa för bropelare.

Enligt SOU 1961:12 antas 100-200 kN/m eller om pelaren har fast is runt om, fjärdedelen dvs 25-50 kN/m. För 14 broar i Lule- och Skellefteälvar varierar det antagna värdet parallellt bron från 8 till 71 kN/m, medelvärde 32 kN/m. Totaltrycken varierar från 67 till 500 kN.

Det är ett egendomligt faktum att i Mälaren (Hjulsta) kan uppträda ett tryck på ca 300 kN/m medan 14 broar i två nordliga älvar och många därtill klarat sig med antagna istryck av i genomsnitt endast ca niondelen av nämnda värde. Undantag utgör broarna i Lycksele och Kusfors.

Man kan dock misstänka att antagna tryck parallellt bron ofta varit i underkant. Särskilt gäller detta där man ofta har öppen strömfåra eller isränna mellan pelarna eller där stora och täta vattenståndsvariationer förekommer.

Med tanke på de svåra konsekvenser en större förskjutning av en pelare kan få i denna riktning är det motiverat att höja värdena något i förhållande till tidigare regler. I förslaget från NVF antas 100-300 kN/m varvid det högsta värdet gäller nordliga delar av Sverige och Finland, det lägsta värdet Danmark. Vid is på båda sidor pelaren reduceras siffran. I förslaget i del 1 har angivits 50-300 kN/m. Lokala isförhållanden (parametern A i bilaga 2) syns spela större roll än geografiska läget.

En katastrofsäkring kan i många fall relativt enkelt ordnas genom stopplackar vid de rörliga lagren. Efter viss rörelse samverkar en pelare på så sätt med de närstående. En sådan effekt stoppade som tidigare nämnts stjälpningen av anslagspelaren i Hjulstabron.

2.13 Slutord

Iskrafter mot bropelare är till sin natur slumpartat beroende av ett flertal mer eller mindre variabla faktorer. Att välja numeriska värden på dessa krafter blir därför fortfarande även i bästa fall mera en fråga om bedömning än om beräkning. I det enskilda fallet är det därför viktigt att skaffa sig god allmän kunskap om de lokala isförhållandena. Detta kan ske dels i första hand med hjälp av SMHI, som har en omfattande isverksamhet och bevakning, dels genom utfrågning av personer på platsen. Lotsar och fiskare - såväl yrkes- som amatörfiskare - kan ge värdefulla upplysningar om istjocklekar, öppna strömfåror och råkar, isgång eller eventuell brötbildning.

För att förbättra kunskaperna om iskrafter krävs i första hand fler observationer och mätningar i fält - i istäcken och i konstruktioner. Först när vårt erfarenhetsmaterial kan behandlas statistiskt erhålls i framtiden en möjlighet att mera rationellt kalkylera iskrafter mot bropelare.

Litteratur

(Huvudsakligen svensk litteratur är upptagen)

- (1) Royen, Nils: Istryck vid temperaturhöjningar. Hyllningsskrift tillägnad F V Hansen, Stockholm 1922
- (2) Barnes, H T: Ice Engineering, Montreal 1928
- (3) Löfquist, B: Lyftkraft och bärförmåga hos ett istäcke, Tekn Tidskrift h 25 1944. Även: Lifting Force and Bearing Capacity of an Ice Sheet, Techn. Translation TT-164, National Research Council of Canada, Ottawa 1951.
- (4) Persson, Bengt: Beständighet och bärighet hos ett istäcke, Sv Vägför Tidskrift nr 10 1948
- (5) Löfquist, B: Studies of the effects of temperaturevariations, ASCE Trans Paper 2656 1954
- (6) Monfore, G E: Experimental Investigations by the Bureau of Reclamation, ASCE Trans Paper 2656 1954
- (7) Haggård, Stig: Istryck mot bropelare, Väg- och Vattenbyggaren nr 3 1958
- (8) Sundberg-Falkenmark, M: Om isbärighet - resultat från belastningsförsök på is, SMHI, ser. Hydrologi Nr 1 1963
- (9) Löfquist, B: Istryck vid Ölandsbron, Statens Vägverk T 560 1967
- (10) Lindgren, S: Istryck vid temperaturhöjningar, Inst för Vattenb, KTH 1968
- (11) Bergdahl, L: Ice Pressure Against Lighthouses, Inst för Vattenb, CTH, medd nr 59 1971
- (12) Engelbretsson, A: Istryck mot utsjöfyrrar, Symposium IVA medd 190 1974
- (13) Larsson, N O: Istryck vid broar, Symposium IVA medd 190 1974
- (14) Tryde, P: Iskraefter virkande på slanke konstruktioner og på kile med skrånende forside, Symposium IVA medd 190 1974
- (15) Bergdahl, L: Physics of Ice and Snow as Affects Thermal Pressure, CTH Series A:1 1978
- (16) Bergdahl, L: Thermal Ice Pressure in Lake Ice Covers, CTH Series A:2 1978
- (17) Bergdahl, L - Wernersson, L: Calculated and Expected Thermal Ice Pressures in Five Swedish Lakes, CTH Series B:7 1978

-
- (18) Michel, B: Ice Mechanics, Québec 1978
 - (19) Fransson, L: Förstärkning av ett istäckes bärförmåga med armering, Högskolan i Luleå, 1979:002 E
 - (20) Cederwall, Kr - Rehnström, A: Rapport från mätning av pelares rörelse på järnvägsbro över Skellefteälv vid Kusfors, Högskolan i Luleå, Avd för konstruktionsteknik 1981
 - (21) Ice Effect on Bridges. Kommittérapport, Road and Transportation Association of Canada, Ottawa 1981
 - (22) Cederwall, Kr: Istryck mot bropelare av betong – ett praktikfall, Väg- och Vattenbyggaren nr 1-2 1982
 - (23) Fransson, L - Holm, I - Olofsson, Th: Istryck mot en bropelare i Lule älv - vintern 1981-82, Högskolan i Luleå, Teknisk rapport 1982:040 T
 - (24) Billfalk, L: Ice Cover Formation and Break-Up of Solid Ice Covers on Rivers, KTH, Inst för Vattenbyggnad, Bulletin No TRITA-VBI-113, 1982
 - (25) Tryde, P: Report on Vertical Ice Lifting of Piles in a Number of Danish Marinas... POAC, Helsingfors 1983
 - (26) Fransson, L - Cederwall, Kr: Iskrafter mot bropelare, Högskolan i Luleå, Teknisk rapport 1984:41 T
 - (27) von Olnhausen, Werner: A Survey of Concrete Bridge Accidents in Sweden, Vägverket, Brosektionen, TB 145, 1984
 - (28) Fransson, L: Bärförmåga hos ett flytande istäcke. Högskolan i Luleå, Licentiatuppsats, 1984:012 L.

BILAGA 1**Maximalt termiskt istryck**

	Publ år	Istryck kN/m	Istjocklek m
1 Nils Royen	1922	300	1,0
2 B Löfquist, modellförsök 1943	1954	250	0,6
3 G E Monfore, USA. Mätning i naturliga istäcken	1954		
Vintern 1947-48		240	ca 0,5
" - 1948-49		210	"
" - 1949-50		300	"
4 SOU 1961:12	1961		
Ensidigt för broar		100-200	-
" - dammar		100-200	-
" - , exept		100-400	-
5 S Lindgren,	1968	460	0,6
6 L Bergdahl. Beräknade max för 100-års period i sjöar.	1978		
Torne träsk, Norrbotten		507	
Runn, Dalarna		410	
Vidöstern, Småland		330	
7 L Fransson – Kr Cederwall. Beräknat ur mätningar i naturligt istäcke vid bropelare	1984		
		300	1,0
		220	0,5

BILAGA 3**Istryck vinkelrätt brolinjen**

Stöдавstånd $L = 30$ m, pelartjocklek $b = 2$ m
istjocklek $d = 0,6$ m

	Totalt kN	
1 <u>Sverige</u> (SOU 1961:12) Fast istäcke 25 à 200 b Isgång 5 à 15(L-b) Kraftig isgång: Ökat tryck	50-400 140-420 >420	
2 <u>Canada</u> (CSA Standard CAN3-S6-M78) Isgång, små flak $\sigma_k = 700$ kPa Isgång, stora flak $\sigma_k = 1400$ kPa	840 1680	Istemp 0°C
3 <u>USSR</u> (normer 1966). För klimatzon ungefär som i norra Sverige Fast istäcke: beräknas! Isgång, små flak $\sigma_k = 450$ kPa Isgång, stora flak $\sigma_k = 750-930$ kPa	540 900-1100	Istemp 0°C
4 <u>Förslag NVF</u> Isgång, små flak 20 à 30L Isgång, större flak $\sigma_k = 1000$ kPa	600-900 1200	
5 <u>Broar i Lule- och Skellefteälv</u> (17 st) Omräknade till $L = 30$ m Antagna istryck 4 à 20L <u>Medelvärde: 13L</u>	120-600 <u>390</u>	
6 <u>Förslag, avsnitt 1</u> för bro i större Norrlands älv Fast istäcke med stor utsträckning 20 à 30L Isgång, reglerad älv 10 à 30L Isgång oreglerad älv $\sigma_k = 700$ kPa à 1400 kPa	600-900 300-900 840-1680	

BILAGA 4

(Utdrag)

NVF

Utskott 61

Broar och färjor

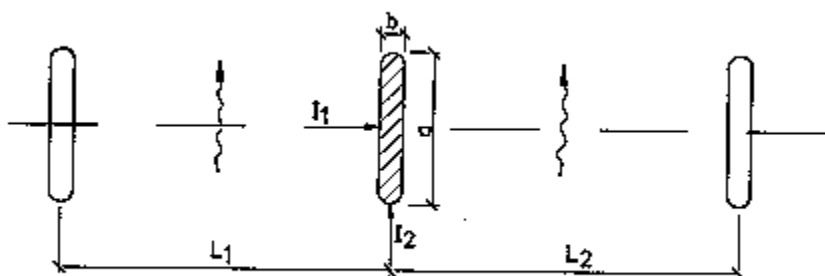
Förslag 1978-06-06

PRELIMINÄRA NORDISKA LAST-BESTÄMMELSER FÖR VÄGBROAR

8. ISTRYCK

Brokonstruktion dimensioneras för istryck beaktande av de lokala förhållandena och konstruktionens utformning. Istrycket förutsättes normalt verka horisontellt och i nivå med vattenytan antingen i bropelarens tvärriktning eller längdriktning.

Om inte annat påvisas riktigare får istrycket beräknas enligt följande.



Istrycket i bropelarens tvärriktning (se figur 2) antages motsvara en på pelarens längd a jämnt fördelad kraft $I_1 = i_1 a$ Mp där i_1 normalt varierar mellan 10 och 30 Mp/m.

Istrycket i bropelarens längdriktning antages motsvara en kraft $I_2 = 0,5 i_2 (l_1 + l_2)$ där i_2 normalt varierar mellan 2 och 3 Mp/m och l_1 och l_2 är avstånden till de närläggna pelarna. Om drivande is förekommer i större omfattning, räknas alternativt med en kraft $I_2 = 100 d \cdot b$ Mp, där d är istäckets tjocklek, dock vanligen högst 1 m, och b pelarens bredd.

Kommentarer

Istrycket i pelarens tvärriktning (I_1) motsvarande i första hand inverkan av ett fast istäckes temperaturändring. Om ett fast istäcke kan förutsättas på båda sidor om pelaren reduceras I_1 .

BILAGA 4

Istrycket i pelarens längdriktning (I_2) motsvarar inverkan av strömtryck på ett fast istäcke eller inverkan av drivande is. Pelaren har härvid förutsatts placerad i strömriktningen. Om strömriktningen bildar vinkel mot pelarens längdriktning, antages kraften I_2 verka i strömriktningen. Om pelarens mot strömmen riktade yta (pelarnosen) lutar mot vertikalplanet, så att isen lyftes av pelaren, reduceras I_2 . Viss reduktion av I_2 kan även uppnås om pelarnosen utföres spetsig.

Det högsta värdet på det specifika istrycket i_1 avser främst de norra delarna av Finland och Sverige och det lägsta värdet Danmark.

Exempel på antagna istryck vid brodimensionering (Lule älv och Skellefte älv)

Bro nr	Byggår	Brolängd	Antal stöd	L= $\frac{L1 + L2}{2}$ m	a m	a m	Antagna istryck				
							bron		⊥ bron		
							I ₁ kN	I ₁ /a kN/m	I ₂ kN	I ₂ /L kN/m	I ₂ /bd kN/m ²
W 20	1940	223	8	26	3,2	1,6	-	-	100	3,8	104 ^{x)}
W 737	1967	106	2	37	3,7	1,5	100	27	500	13,5	556
W 738	1967	126	2	43	3,7	1,5	100	27	500	11,6	556
Y 277	1937	128	2	43	4,4	2,5	-	-	250	5,8	167
Z 196	1937	188	6	27	5,4	2,0	250	46	250	9,3	208
AC 16	1949	254	7	34	12,0	2,0	500	42	500	14,7	417
AC 68	1947	202	5	31	8,0	2,0	-	-	500	16,0	417
AC 101	1913	251	6	41	8,0	2,2	67	8	333	8,1	252
AC 168	1972	82	1	41	5,8	1,5	200	35	600	14,6	667
AC 801	1968	106	2	41	6,6	1,7	250	38	500	7,6	490
AC 1191	1958	153	1	77	9,7	3,4	500	52	1000	10,3	495
AC 1197	1956	186	2	62	7,1	2,5	500	71	1000	16,1	667
AC 1213	1962	197	5	40	17,7	2,0	150	9	750	18,7	625
AC 1222	1966	122	1	61	9,3	2,0	150	16	750	12,2	625
AC 1242	1960	164	1	82	12,7	2,5	300	24	1500	18,3	1000
AC 1166	1959	214	1	107	11,9	3,2	420	35	2100	19,6	1094
AC 1411	1958	133	4	27	5,4	1,5	75	14	375	13,9	417
Medelvärde: 32										12,6	515

Vägverket
Brotekniksektionen
VBb, Bosse Eriksson

^{x)} Istjocklek d = 0,6 m antagen