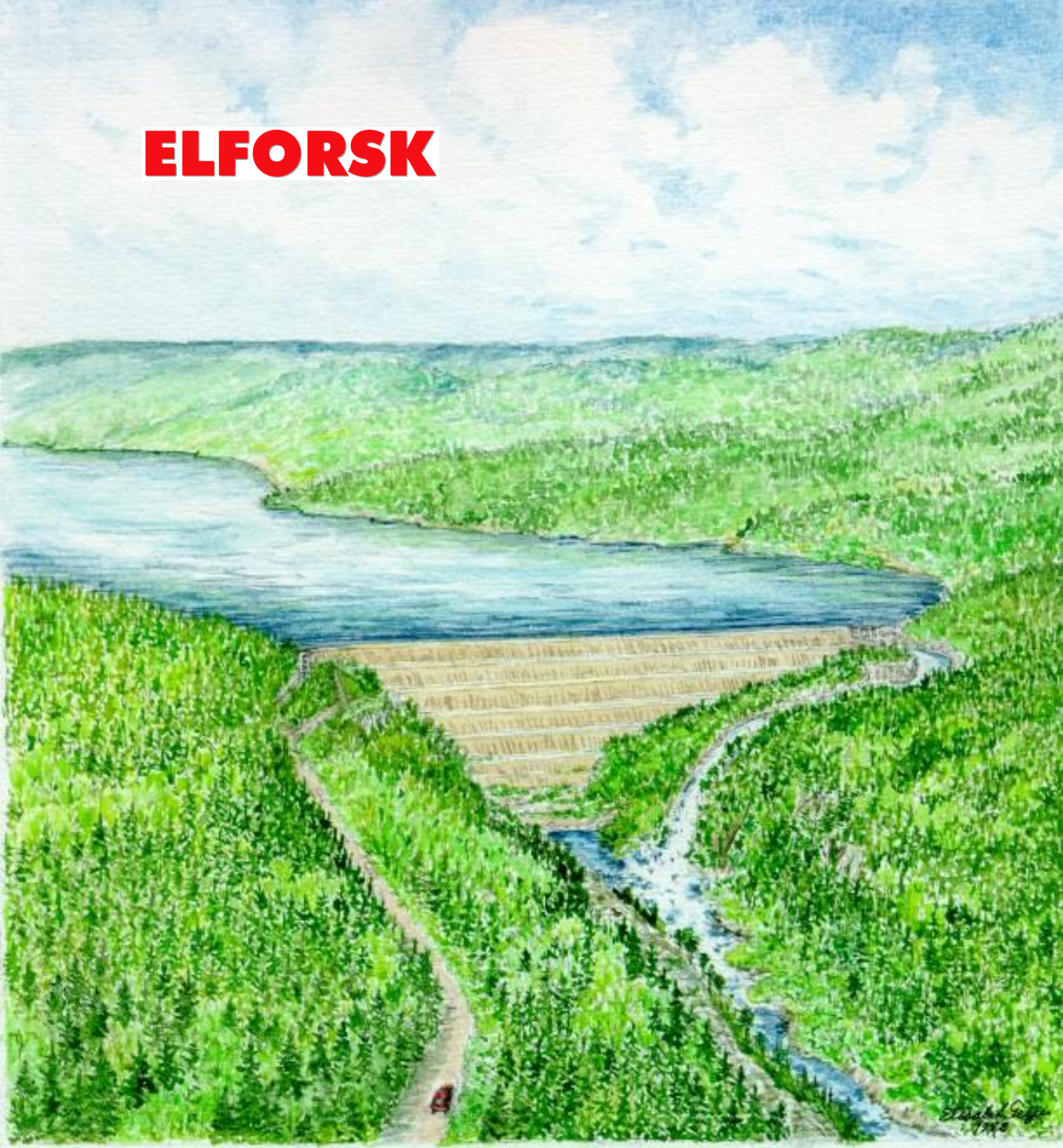


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

ISLAST MOT DAMMKONSTRUKTIONER

Sammanställning av kunskapsläget samt förslag till forskning och utveckling

Rapport 13:56

Islast mot dammkonstruktioner

Sammanställning av kunskapsläget samt
förslag till forskning och utveckling

Elforsk rapport 13:56

Förord

Klimatet i Sverige innebär att dammar utsätts för islast. RIDAS rekommenderar att stabiliteten kontrolleras för lastfall där islasten ingår. Enligt RIDAS ansätts islasten till mellan 50 till 200 kN/m, där de högre lasterna rekommenderas i de norra delarna av landet medan de lägre rekommenderas i de sydligaste.

Det är inte enbart det geografiska läget som påverkar islasten. Faktorer som magasinets utformning, strändernas styvhet samt fluktuationer i vattenståndet kan påverka islasten mot dammen. Många samverkande faktorer och svårigheter att mäta islast mot dammar gör frågan komplex.

Men eftersom islasten kan utgöra en stor del av den totala horisontella lasten för en betongdamm är det, för en korrekt dimensionering, angeläget att så noggrant som möjligt bestämma dess storlek och den osäkerhet med vilken den kan beskrivas. En mer nyanserad bild av islasten skulle också kunna ge bättre kännedom om den faktiska säkerhetsnivån hos befintliga dammar.

Denna förstudie har analyserat tänkbara vägar framåt. Den fortsatta utveckling som föreslås av författarna syftar till att ta fram underlag för mer nyanserade rekommendationer för bestämning av islasters storlek.

Rapporten är ett resultat inom Elforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete. Där kommer också föreslagna fortsatta utvecklingsprojekt att diskuteras och värderas.

Elforsks Dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete syftar till att långsiktigt stödja kraftindustrins dammsäkerhetspolicy, ge stöd åt fortsatt utveckling av branschens riktlinjer (RIDAS) och att främja kunskaps- och kompetensutveckling inom dammsäkerhetsområdet. Ramprogrammet har en styrgrupp bestående av: Jonas Birkedahl – Fotum, Claes-Olof Brandesten – Vattenfall Vattenkraft, Lars Hammar – Vattenfall Vattenkraft, Anders Isander – E.ON, Martin Johansson – Skellefteå Kraft, Jan Lidström – Holmen, Anders Sjödin – Statkraft, Gunnar Sjödin – Vattenregleringsföretagen, Rolf Steiner – Fortum samt Cristian Andersson – Elforsk. Adjungerade till gruppen är också Maria Bartsch och Anna Engström-Meyer – Svenska Kraftnät.

Stockholm juni 2013



Cristian Andersson

Sammanfattning

Horisontellt tryck från is är i vårt svenska klimat en viktig parameter som påverkar dammsäkerheten, speciellt för låga dammar. I dagsläget rekommenderar de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS) att dammars stabilitet ska kontrolleras för islaster på mellan 50 till 200 kN/m, beroende på var dammen ligger i Sverige. Det är dock troligt att även andra faktorer än geografiskt läge påverkar islastens storlek. Detta gör att dagens schablonvärden för islast är behäftade med stora osäkerheter. För att följa samhällets ökade krav på dammsäkerhet är det viktigt att islasten beskrivs på ett korrekt sätt.

Föreliggande förstudie syftar till att analysera framkomliga vägar för att bestämma islastens storlek mot dammkonstruktioner. Förstudien rangordnar ett antal förslag på framtida forskningsprojekt, som i förlängningen ska bidra till utvecklingen av mer nyanserade rekommendationer om islastens storlek och variation. Förslagen baseras på en litteraturstudie av forskningsfronten inom området, vilken följts av en analys av var de mest avgörande problemområdena finns för närvarande.

Litteraturstudien visar att det kan ifrågasättas om det i dagsläget finns metoder som tillförlitligt kan mäta islastens storlek i fält. Därmed kan man inte med säkerhet säga vilken islast en damm utsätts för. Detta innebär att det även uppstår svårigheter att verifiera teoretiska modeller mot verklig islast. Det råder dessutom oklarheter kring huruvida de högsta uppmätta islasterna är teoretiskt möjliga. För dammar är detta av största vikt, eftersom risken för stabilitetsproblem ökar vid höga islaster. Trots många år av forskning med att ta fram teoretiska modeller för att förutsäga islast utifrån bland annat meteorologiska data, har inga modeller hittills fungerat tillfredsställande. En sådan modell skulle annars kunna vara ett utmärkt verktyg för uppskattning av islasterna. För att kunna använda mer avancerade stabilitetsanalyser är det också viktigt att kunna beskriva islasten med både medelvärde och variation mellan olika år.

Det rekommenderas därför att kommande forskningsprojekt fokuserar på följande frågeställningar (i prioriteringsordning):

- Utarbeta och verifiera en tillförlitlig fältmätningss metod för islast mot dammkonstruktioner.
- Utröna huruvida extremt stora islaster mot dammar kan uppkomma.
- Utveckla och verifiera tillförlitligheten hos en befintlig eller ny prediktionsmodell för islast för svenska förhållanden.
- Ta fram (statistiska) verktyg för beslutsprocessen kring huruvida en damm omedelbart bör förstärkas med avseende på islasten, eller om det kan vara lönsamt att investera i fältmätningar för att reducera osäkerheterna och därmed minska behovet av en eventuell förstärkning.

Rapporten konstaterar också att problemet med islaster är svårt och komplext, varför det är viktigt med en långsiktig satsning om några avgörande resultat ska kunna uppnås.

Summary

Horizontal ice load is in Sweden an influential parameter affecting dam safety, especially for lower dams. At present, the Swedish hydropower companies' guidelines for dam safety (RIDAS) recommend that ice loads ranging from 50 to 200 kN/m should be used in stability analyses of dams, depending on their location in Sweden. However, it is likely that also other factors affect the magnitude of the ice load, which implies that significant uncertainties are associated with this parameter. In order to meet up with society's increasing demand for better dam safety, it is vital that the nature and magnitude of the ice load is correctly understood and predicted.

This report analyses the state-of-the-art of ice loads on dams and suggests suitable areas for future research. The suggestions are ranked in order of precedence. The aim of the proposed research projects is to contribute to a development of more distinctive guidelines for the magnitude and variation of ice loads on dams.

The state-of-the-art shows that, at the moment, there is no reliable method for field measurements of ice loads on dams. As a consequence, it becomes unclear which ice loads that are actually acting on the dams. This also implies that theoretical models for ice load prediction may not be possible to verify. In addition, there are contradicting meanings on whether the highest measured ice loads can occur at all. For dam safety, this is vital, since structural failure is more likely at large ice loads. Despite many years of research on prediction models for ice load on dams, none has so far proven successful. Such models could however potentially provide an excellent tool for estimation of the ice load. To be able to use more advanced tools for stability analysis, describing ice loads with both mean value and variation between different years is also of importance.

In light of this, it is recommended that future research projects on ice loads focus on (in order of precedence)

- Developing and verifying a reliable method for field measurements of ice loads on dams.
- Ascertaining whether extreme ice loads can occur or not.
- Developing and verifying the reliability of an existing or new prediction model for ice loads on dams for Swedish climate conditions.
- Developing (statistical) tools for the decision process related to whether a dam immediately is in need of stability-enhancing modifications, or if it might be reasonable to first measure the ice load on the dam to reduce uncertainties and thereby decrease the need for stability-enhancing modifications.

The report also concludes that the nature of ice loads is very complex. Consequently, it is preferable that investments in research are made in a long-term perspective; isolated short research projects are likely to be unsuccessful.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
2	Litteraturstudie: Islaster mot dammkonstruktioner	2
2.1	Inledning	2
2.2	Krafter från temperaturvariationer	2
2.3	Krafter från vattenståndsvariationer	4
2.4	Krafter från vind och ström	5
2.5	Faktorer som sätter en övre gräns för istryck	6
2.6	Studier av islast i Kanada 1991-2011	6
2.6.1	Mätningar 1991-2000	7
2.6.2	Modell för uppskattning av islast.....	7
2.6.3	Framtagande av statistisk fördelning för islast.....	9
2.6.4	Uppföljande mätningar 2007-2011.....	10
2.6.5	Kommentarer på den kanadensiska studien och användbarheten av modellen	10
2.7	Fullskalemätning av islaster mot utsjöfyren Norströmsgrund i Bottenviken.....	11
2.8	Pågående projekt	13
2.8.1	Norut	13
2.8.2	Examensarbete vid KTH.....	14
3	Behov av forskning och utveckling	15
3.1	Problembeskrivning	15
3.2	Fältmätningar av statiska islaster på dammar	15
3.3	Probabilistiska metoder.....	18
3.4	Teoretiska modeller.....	19
3.5	Tolkning av mätdata: när uppkommer extremt stora islaster?	19
4	Slutsats och rekommendationer	21
5	Referenser	23

1 Inledning

Klimatet i Sverige innebär att våra svenska dammar utsätts för islast. För att beakta detta rekommenderar de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet, RIDAS, att stabiliteten kontrolleras för lastfall där islasten ingår. Islasten i RIDAS varierar mellan 50 till 200 kN/m, där de högre lasterna rekommenderas i de norra delarna av landet medan de lägre lasterna rekommenderas i sydligaste delarna av landet. Mekanismerna bakom islasten är emellertid oklara och storleken på lasterna i RIDAS måste betecknas som osäkra.

Det är emellertid inte enbart det geografiska läget som påverkar islasten. Faktorer som magasinets utformning i kombination med strändernas styvhet kan påverka islasten mot dammen. Vidare kan andra faktorer som exempelvis fluktuationer i vattenstånd påverka islasten. Vid större fluktuationer i vattenståndet kan även "leder" bildas mellan damm och is, vilka kan absorbera töjningar i isen och därmed reducera islasten.

Islasten kan utgöra en stor del av den totala horisontella lasten och/eller det stjälpande momentet för en betongdamm. Speciellt för låga dammar kan islastens storlek vara direkt dimensionerande för dammens stabilitet. Det är därför viktigt att ett korrekt värde kan bestämmas för islasten. Att inte beakta alla de faktorer som påverkar islasten innebär att islasten i vissa fall kan underskattas och i andra fall överskattas. Med de ökande krav på säkerhet som samhället ställer på dammar, speciellt i de högre konsekvensklasserna, behöver denna osäkerhet kunna beskrivas för en korrekt dimensionering.

Syftet med föreliggande förstudie är att analysera framkomliga vägar gällande bestämning av islastens storlek. Baserat på resultaten från de projekt som föreslås är målet att i ett senare skede kunna utarbeta mer nyanserade rekommendationer om islastens storlek och variation på svenska dammkonstruktioner.

I denna förstudie presenteras inledningsvis en kortare litteraturstudie som beskriver de mekanismer som styr islasten samt de studier som genomförts under det senaste årtiondet inom området. Därefter följer en problembeskrivning och förslag till forskning och utveckling. Baserat på dessa kapitel presenteras en sammanfattning av studien och förslag till fortsatt forskning presenteras.

2 Litteraturstudie: Islaster mot dammkonstruktioner

2.1 Inledning

En litteraturstudie avseende islast mot hydrauliska konstruktioner finansierad av ELFORSK genomfördes av Ekström (2002). Studien syftade till att identifiera styrande parametrar för islasten samt ge en bakgrund för att kunna uppskatta islaster på ett mer nyanserat sätt i framtiden. Tanken med föreliggande kapitel är att komplettera denna studie med de nya erfarenheter som tillkommit under det sista decenniet.

Inledningsvis redovisas en kortfattad sammanställning av de parameterar som är styrande för islastens storlek. Därefter presenteras de kunskaper som tillkommit.

Den islast som verkar på en dammkonstruktion kan vara orsakad av flera olika mekanismer som verkar enskilt eller i kombination med varandra. De tre viktigaste är (1) krafter som uppkommer till följd av temperaturvariationer, (2) krafter på grund av vattenståndsvariationer och (3) krafter från vind och strömmande vatten.

2.2 Krafter från temperaturvariationer

När temperaturen i isen ökar expanderar den. Det är emellertid enbart i den övre delen av islagret som temperaturen varierar och som därmed expanderar. Denna expansion resulterar i tryckspänningar som varierar över isens tjocklek. På undersidan av isen är temperaturen konstant 0°C och hindrar översidan från att expandera, vilket leder böjspänningar i isen som ger upphov till sprickor.

Beräkning av temperaturinducerade spänningar mot dammkroppar startar med att temperaturvariationerna i isen beräknas över isens tjocklek. Då spänningen i isen är kraftigt beroende av belastningshastigheten är det viktigt att även beakta hur snabbt temperaturen stiger. I temperaturberäkningen beaktas värmeöverföring genom strålning, ledning och konvektion, se exempelvis Bergdahl (1977). Därefter beräknas hastigheten på den termiska töjningen. Spänningarna som krävs för att uppnå den termiska töjningen kan därefter beräknas i varje punkt över isens tjocklek. Slutligen integreras spänningen över isens tjocklek för beräkning av kraft per meter (USACE 2002). Ett flertal olika teorier för uppskattning av det termiska istrycket finns framtagna, vilka beskrivs utförligt i Saether (2012).

Även om det rent teoretiskt är möjligt att uppnå relativt höga värden på det termiska istrycket, finns det ett flertal faktorer som kan reducera det eller resultera i att höga tryck inträffar med låg frekvens. Enligt Löfquist (1987) reducerar t.ex. 5 cm snö de termiska istrycken avsevärt. De termiska istrycken blir därför små större delen av vintern då isen är snötäckt. Löfquist (1987) menar att risken för kombinationen av tjock, snöfri is och extrema

temperaturvariationer är störst på för- och eftervintern. På eftervintern är det emellertid oftast en blandning av snö och is överst, vilket resulterar i lägre tryck.

Vidare anger Löfquist (1987) att de extrema temperaturstegringar som vanligtvis förutsätts i beräkningarna från t.ex. -30°C till 0°C kan vara alltför extrema för större delen av landet. De kan huvudsakligen inträffa i västra och norra Norrland.

Vidare antas i beräkningar av termiskt istryck att isen inledningsvis är spänningslös, vilket sannolikt är felaktigt. Temperatursänkningar under -10°C genererar emellertid enligt Löfquist (1987) termiska sprickor i isen. I början av vintern blir några av dessa sprickor generellt genomgående i istäcket, s.k. råkar. Till följd av olikformig temperatur samtidigt som istäcket är relativt plant kommer dock en del öppna sprickor och dragspänningar kvarstå i de övre delarna av isen samtidigt som tryckspänningar kvarstår i isens undre del. När isen blir tjockare under senare delen av vintern uppstår nya sprickor som inte är genomgående och som inte kan fyllas med vatten underifrån. Antagandet om en spänningslös is kan därmed vara felaktigt.

En annan viktig faktor som kan reducera den termiska islasten är strändernas mothåll. Ko et al (1994) föreslår exempelvis att termiska islaster indelas efter karakteristiska förhållanden för reservoarstranden med avseende på strandens lutning. För en sträng vinter med temperaturer under -30°C föreslår Ko et al (1994) exempelvis 100 kN/m för en flack strand med lutning mindre än 20° , 120 kN/m för en medelbrant strand (20 till 45°) och 150 kN/m för en brant strand med lutning större än 45° .



Figur 2.1 Is mot monolit mellan intag och flottningsutskov vid Krångfors kraftstation (Foto: Skellefteå Kraft).

2.3 Krafter från vattenståndsvariationer

Mätningar utförda av Carter et al (1998) på fyra dammar i Kanada under åren 1995-1998 visade att uppmätta islaster korrelerade mot både ökande temperaturer i isen och vattenståndsvariationer.

I ett åtta år långt program för mätning av islaster vid fyra dammar observerades att variationer i vattenstånd hade stor inverkan på de maximala islaster, se exempelvis Comfort et al (2000a och 2000b). Enligt Comfort et al (2000b) är det emellertid inte alla typer av vattenstånds-variationer som ger upphov till tryck på dammkonstruktionen. En kontinuerlig sänkning av vattenståndet under vintern skapar exempelvis inga laster. En större enskild sänkning eller höjning av vattenståndet som är större än istjockleken förefaller att kraftigt minska islasten under resten av året. Comfort et al (2000b) indelade vattenståndsvariationerna i tre klasser; (1) små (10-15 cm) och långsamma höjningar (0-0,5 ggr/dag) vilka har en försumbar inverkan på lasten, (2) stora (35-45 cm) och återkommande sänkningar (1-1,5 ggr/dag) vilka skapar låga islaster samt (3) mellanliggande höjningar (10-20 cm) som inträffar relativt ofta (1-2 ggr/dag).

Högst bidrag erhöles från de dammar med relativt små variationer i vattenstånd. Vid Seven Sisters damm uppgick lastbidraget från variationer i vattenstånd till mellan 150-300 kN/m. Vid de övriga tre dammarna låg bidraget på mellan 0-100 kN/m. En möjlig förklaring till de höga lasterna vid Seven Sisters damm kan enligt Comfort et al (2000b) vara reservoarens utformning. Resultat från utförda numeriska beräkningar tyder på att reservoarer med en mera "sjölik" (kvadratisk) utformning kan generera högre islaster jämfört med reservoarer med "flodlik" (rektangulär) utformning. De numeriska beräkningarna är emellertid utförda baserat på kraftiga förenklingar och några definitiva slutsatser kan inte dras då beräkningarnas tillförlitlighet kan ifrågasättas.

Inverkan på spänningarna i isen från variationer i vattenstånd studerades även av Stander (2006). Utgångspunkten i studien var en hypotes ursprungligen föreslagen av Willmot (1952) som utgick ifrån att ett istäcke som är fastfruset i en stödmur kommer spricka när vattenytan i magasinet sänks. Dessa sprickor kommer fyllas med vatten och frysa igen, vilket leder till en ökad sprickyta. När magasinsnivån höjs igen kommer istäcket utsättas för tryckkrafter när den nya större isytan måste passa in i den ursprungliga mindre ytan.

Fältmätningar av luft- och istemperatur, vattennivå samt spänningar och förskjutningar i isen uppmättes av Stander (2006) under vintern 1992 och 1993. Mätningarna utfördes i La Gabelle reservoaren belägen i Quebec i Kanada. De utförda mätningarna stödde fullt ut den föreslagna hypotesen av Willmot (1952). De uppmätta spänningarna i isen långt från stranden korrelerade väl med isens temperaturvariationer. De uppmätta spänningarna nära stranden eller i anslutning till dammen uppvisade emellertid en stark korrelation med förändringar i vattennivå. Uppmätta spänningar till följd av vattenståndsvariationer var 100-200 kPa (4-5 kPa/cm nivåhöjning), vilka överlagrade spänningarna till följd av temperaturvariationer. Totalt uppgick den maximala iskraften till 20-25 t/m vid en istjocklek på 0,75 m.

Baserat på genomförda observationer föreslår Stander (2006) att följande villkor måste vara uppfyllda för att islasten ska påverkas av vattenståndsvariationer:

1. Variationer i vattenstånd måste vara tillräckligt stora för att producera en aktiv spricka längs magasinets ränder, men de får inte vara så stora att istäcket frikopplas från dammkroppen.
2. Vattenståndet måste variera kring ett medelvärde. Om vattennivån successivt sjunker kommer istäcket aldrig att uppnå någon vidhäftning mot dammkroppen.
3. Istäcket måste ha en begränsad rörelseförmåga. Om den inte har det kommer isen att röra sig mot den fria vattenytan med försumbara tryckspänningar som resultat.
4. Temperaturen måste vara tillräckligt låg för att möjliggöra isbildning i den aktiva sprickan. Dessa randeffekter minimeras om isytan är täckt med vatten eller täcks med snö.
5. Spänningarna nära stranden ökar om istäcket lokalt ligger på botten. I dessa fall kan tyngden från ett mellanliggande isblock hjälpa till med att öppna upp den aktiva sprickan genom konsolverkan.

Avslutningsvis menar Stander (2006) att ökningar av islasten till följd av vattenståndsvariationer kan reduceras genom att frikoppla istäcket från dammkroppen. Detta kan åstadkommas genom att sänka och höja magasinetsnivån med 0,30-0,40 m under de första veckorna efter att isen lagt sig.

2.4 Krafter från vind och ström

Strömmande vatten och kraftig blåst ger upphov till dragkrafter som verkar på isen, se exempelvis USACE (2002). Skjuvspänningen från dessa mekanismer uppgår exempelvis till cirka $0,5 \text{ N/m}^2$ vid en vindhastighet på 15 m/s. För strömmande vatten med hastigheten 1 m/s uppgår skjuvspänningen till cirka 4 N/m^2 . Den totala arean för att kunna beräkna total iskraft mot en konstruktion är i många fall svår att uppskatta. Vid stora isytor kan den totala kraften från dessa mekanismer vara större än de krafter som krävs för att orsaka brott i isen. Vid de fallen begränsas islasten av dessa brottlaster. Möjliga brottmekanismer är krossning, böjning, buckling och splittring av isen. En utförlig beskrivning av hur hållfastheten beräknas för dessa brottmoder finns beskriven i exempelvis USACE (2002).

Studier av Carter et al (1998) stödjer teorin att buckling av isen kan vara en begränsande faktor avseende istryck mot dammar. I studien observerades att avståndet mellan sprickor parallella med dammen uppträdde med ett regelbundet avstånd på cirka 6,5 m. Detta avstånd stämmer väl överens med det teoretiska avståndet för det maximala böjmomentet för ett tunt flytande isflak. Enligt den teoretiska modell som föreslås av Carter et al (1998) uppgår det maximala beräknade istrycket mot dammen vid La Gabelle till 133 kN/m och vid LG Un till 148 kN/m , dessa värden stämmer väl överens med de maximalt uppmätta värdena vid dessa dammar.

2.5 Faktorer som sätter en övre gräns för istryck

Vad vi med säkerhet vet är att is som värms upp expanderar och om expansionen förhindras leder det till att tryck uppstår. Det finns emellertid en övre gräns för hur stort detta tryck kan bli även under de extrema förhållanden som bara kan åstadkommas genom laboratorieexperiment. Om vi bortser från hydrostatiska förhållanden begränsas trycket av mothållens eftergivlighet, isens viskositet, trycksmältning och den största uppvärmningshastighet som är möjlig.

I naturligt tillstånd kan ett flytande istäcke inte förmås att expandera termiskt så att de teoretiskt förväntade maxtrycken uppkommer, vilket också har verifierats under årtionden av fältmätningar. Följande faktorer kan nämnas som orsak till begränsningar av uppmätta termiska istryck:

- Isens underyta är konstant lika med smältpunkten
- Isens överyta är oftast betydligt varmare än luften
- Isytans temperaturvariation avklingar med djupet
- Mothållen är eftergivliga
- Mothåll saknas eller är ofullständiga i vissa riktningar
- Fri expansion är möjlig där isytan innehåller öppna sprickor
- Isen kan inte värmas upp tillräckligt synkroniserat och likformigt över stora arealer och volymer
- Istryckets medelvärde minskar med kontaktareans storlek

Sammantaget tycks det som att avvikelser mellan modell och verklighet beror på area och volym på den studerade isen. Den termiska expansionen och de resulterande trycken är storleksberoende fenomen och det är viktigt att detta beaktas. Det är med nuvarande kunskapsnivå mycket svårt att utforma fältmätningar så att orsakerna till storleksberoendet fastställs. Däremot kan man enkelt genom att använda flera trycksensorer ingjutna i en damm påvisa tryckskillnader och beräkna inverkan av kontaktarea.

2.6 Studier av islast i Kanada 1991-2011

Den mest tongivande studien som publicerats under 2000-talet av islast och dess påverkan på dammanläggningar genomfördes i Kanada. Av den anledningen presenteras deras resultat ingående. Resultaten summeras i Comfort et al (2003), som också har utvecklat en modell för att uppskatta islastens storlek. Under mätperioden publicerades ett flertal konferensbidrag (Comfort et al 1992, 1998a, 1998b, 2000a, 2000b) kopplade till studien. Uppföljande mätningar gjordes 2007 till 2011, vilka beskrivs och jämförs med den tidigare studien i Taras et al (2009, 2011), Comfort et al (2012) och Côté et al (2012). Ett referat av resultaten och slutsatserna från undersökningarna i Kanada ges i det följande. Stort fokus ligger på den utvecklade modellen.

Slutsatser som mer avser isens fysik och beteende behandlas i andra delar av denna rapport. Sist i avsnittet ges generella kommentarer och en bedömning av resultatens tillämpbarhet för dammsäkerhetsutvärderingar.

2.6.1 Mätningar 1991-2000

I ett nioårigt mätprogram (1991-2000) studerades islast och dess beroende av potentiellt påverkande faktorer i omgivningen på nio olika platser i centrala och östra Kanada. Mätningar av in-situ-spänningar i isen gjordes med sensorer utvecklade av BP, vilka beskrivs närmare i Duckworth och Westermann (1989). I de flesta fall placerades två grupper av sensorer ut på varje testområde på ett avstånd av ungefär 5-10 m från dammen, arrangerat så att spänningarna vinkelrätt mot dammen mättes. Linjelasten beräknades genom integrering av de uppmätta spänningarna utmed isens tjocklek. Utöver islast mättes också andra data såsom lufttemperatur, snödjup, isens tjocklek och sprickighet.

2.6.2 Modell för uppskattning av islast

Eftersom islasten varierar från år till år, är det av stort intresse att bedöma dess fördelning och spridning. Parallellt med mätprogrammet togs därför en analytisk modell fram för uppskattning av islastens storlek baserat på mätbara parametrar bland ovan beskrivna faktorer (Comfort et al 2003). Beräknad islast (horisontell linjelast, kN/m) framför damm ges av

(2.1)

i vilken är lasten i isen före lasthändelsen; är lastökning på grund av temperaturförändring i isen; är lastökning som orsakas av vattenståndsförändring; och är ett osäkerhetstillägg för att försäkra sig om att den beräknade lasten är större än den verkliga. De ingående termerna tas fram med hjälp av antingen kurvanpassning mot mätdata eller tidigare forskning i enlighet med det följande. Observera dock att Comfort et al (2003) också redovisar en modell som gäller för fallet att det endast föreligger termisk expansion, och alltså inga vattenståndsförändringar. De konstaterar dock att de största islasterna uppträder när termisk expansion sker samtidigt med vattenståndsförändringar, varför modellen som inkluderar detta redovisas här. För en mer ingående förklaring av termerna och deras ingående parametrar hänvisas till Comfort et al (2003).

Lasten i isen före lasthändelsen (exempelvis temperaturstegring eller ändrat vattenstånd) är uppskattad med hjälp av kurvanpassning till mätdata från mätprogrammet.

— (2.2)

I vilken h är istjockleken (cm); a är den genomsnittliga förändringsamplituden för vattennivån i reservoaren i absoluta tal (cm) under de 2-3 dagar som föregått tidpunkten då maximala lasten uppmättes. Observera att ekvationen inte är giltig för istjocklekar mindre än 25 cm. Den beaktar heller inte möjligheten att det blir dragspänningar i isen, vilket dock är på den konservativa sidan.

Den del av lasten som orsakas av temperaturförändring är uppskattad med kurvanpassning till mätdata:

(2.3)

I vilken d är antalet dagar under vilka lasthändelsen pågår; och ΔA är ändringen i den vertikala temperaturprofilen ($^{\circ}\text{C cm}$) enligt

(2.4)

Där T är en funktion som visar hur temperaturen förändras med djupet under isytan (före och efter lasthändelsen).

Lasten som uppstår när vattennivån ändras består i modellen av två delar; dels lasten som direkt hör samman med vattennivåändringen, dels ett tillägg på grund av eventuell samverkan mellan vattennivåändring och temperaturförändring (eftersom det har observerats att större laster uppkommer när båda dessa parametrar förändras samtidigt).

— (2.5)

för vilken

— (2.6)

— (2.7)

— (2.8)

— (2.9)

I vilka är den initiala ändringen ($^{\circ}\text{C cm}$) i den vertikala temperaturprofilen före lasthändelsen; är den totala vertikala temperaturprofilens storlek ($^{\circ}\text{C cm}$) i början av lasthändelsen; z är förändringen i vattennivå i reservoaren

under lasthändelsen (cm); och T_{is} är den största vertikala temperaturprofilen som är möjlig, vilken kan antas vara 20h.

För att försäkra sig om att den beräknade islasten blir tillräckligt konservativ görs ett tillägg Δh , vilket kan ses som en sorts säkerhetsmarginal för att ta hänsyn till felet i förutsägelsen. I Comfort et al (2003) görs ingen värdering av hur stort detta tillägg bör vara.

2.6.3 Framtagande av statistisk fördelning för islast

Modellen ovan är tänkt att kunna användas för att ta fram en statistisk fördelning av islast att använda vid dimensionering av dammar. Eftersom islastens storlek till stor del är beroende av den omgivande miljön och meteorologiska förhållanden, har Comfort et al (2003) tagit fram modeller för hur man kan uppskatta indata till beräkningarna med hjälp av mätningar av nederbörd, luftens medeltemperatur och snötäckets tjocklek. Dessa presenteras nedan. Baserat på meteorologiska data från många år tillbaka i tiden ska sedan en statistisk fördelning kunna uppskattas för det årligt största värdet på islasten.

För att uppskatta storleken på den vertikala temperaturprofilen i isen behövs temperaturerna på isens över- och undersida, samt ett värde på isens tjocklek. Temperaturen på undersidan antas vara 0 °C. För temperaturen på översidan T_o används sambandet för stationärt, endimensionellt värme flöde

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_o - T_u}{L} \quad (2.10)$$

i vilken k är isens värmekonduktivitet (W/mK); k_s är snöns värmekonduktivitet (W/mK); T_u är omgivningens lufttemperatur (°C); h är värmeövergångskoefficienten mellan snön och luften (W/m²K). Snötäckets tjocklek L (cm) är svår att förutsäga, då detta är beroende inte bara av nederbörd, utan också av lufttemperatur, vindhastighet, lokal topografi, med mera. Man bör också ta hänsyn till att isen måste ha lagt sig innan snötäcket kan börja byggas upp och att tyngden av snön kan bli så stor att vatten kan tryckas upp ovanpå isen och bilda en sörja. Detta kan göras genom att korrigera meteorologisk information om snödjup i området dels med tidpunkten för när isen lade sig, dels med största möjliga tyngd av snön genom att göra en jämvikt mellan tyngden av snön och isen, och vattnets flytkraft enligt

$$\rho_s h_s = \rho_w h_w \quad (2.11)$$

Där h_s är tjockleken (cm) på det snötäcke som ger översvämning av isen och h_w , samt ρ_s är vattnets, snöns och isens densiteter (kg/m³).

För att uppskatta isens tjocklek behöver man ta hänsyn till isens vertikala tillväxt. Genom att sätta jämvikt mellan värme flödet från isens ovansida till

$$\quad \quad \quad - \quad - \quad \text{---} \quad \quad \quad (2.12)$$

långa mätserier krävs för att få en uppfattning om storleken på de högsta möjliga lasterna.

Med tanke på resultaten av den uppföljande studien, är det mycket tveksamt om modellen som presenterats i Comfort et al (2003) är tillräckligt tillförlitlig för att den ska ses som praktiskt tillämpbar för dammsäkerhetsutvärdering i sin nuvarande form. Eftersom modellen ibland rejält underskattar islasten, finns det en risk att den utvärderade dammen ses som betydligt säkrare än den egentligen är.

2.7 Fullskalemätning av islaster mot utsjöfyren Norströmsgrund i Bottenviken

Under åren 1999-2003 mättes islaster och isförhållanden i Bottenviken. Utsjöfyren Norströmsgrund utanför Piteå instrumenterades med mätpaneler som registrerade trycket från isen, se **Figur 2.1** och **2.2**. Panelerna som bestod av 9 stycken kraftiga lådor av stål ($1.6 \times 1.2 \text{ m}^2$) täckte hela istjocklekens kontaktyta över en sträcka på ca 11 m. Varje panel hade en lastkapacitet på över 2MN och vägde ca 3 ton. Det ansågs mycket viktigt att panelerna var stela, dels för att de inte skulle deformeras av de stora lokaltrycken som kan uppstå ($>60\text{MPa}$) men också för att rätt kunna registrera dynamiska laster. Syftet med mätningarna var framför allt att skapa ett statistiskt underlag för beräkning av islaster från ett drivande istäcke med konstant istjocklek. I Bottenviken finns som bekant också många andra isformationer som vallar och vindpackade isfält som också kan ge upphov till stora islaster. Vattendjupet var dock endast 10 m i en stor del av området runt fyren vilket hindrade den tjockaste isen från att komma i kontakt med fyren. En stor del av mätresultaten från Norströmsgrund finns inlagt i en databas som är tillgänglig på nätet (LTU 2003).



Figur 2.1 Utsjöfyren Norströmsgrund i Bottenviken (Foto: Lennart Fransson, LTU).



Figur 2.2 Paneler för fullskalemätning av islast mot fyren vid Norströmsgrund (Foto: Lennart Fransson, LTU).

Fördelarna med fältmätningar i verklig skala är naturligtvis uppenbara i alla sammanhang där man söker laster som har stor betydelse vid dimensionering. I detta fall var det tydligt att det saknades kunskap om hur ett sprött istäcke krossas och hur trycket mot en vertikal konstruktion då varierar. Några viktiga variabler för beräknat maximalt medeltryck är istjocklek, kontaktytans storlek, isens stabilitet över stora volymer (inte samma sak som tryckhållfasthet), isens hastighet samt konstruktionens styvhet.

Trots insamlandet av fullskaledata under flera säsonger saknas det fortfarande konsensus om t.ex. varför medeltrycket sjunker då istjockleken ökar. Det kan bero på 1) storleksberoende spräckning eller 2) att tjock is inte är lika homogen som tunn is. Vid dimensionering av en konstruktion liknande fyren med isförhållanden liknande Bottenvikens har denna kunskapsbrist inte så stor betydelse eftersom kontaktyta och istjocklek i stort sett är konstanta. Då kan man i stort sett strunta i hur islasterna uppstår och inrikta sig på det befintliga statistiska underlaget, där några kända haverier av fyrrar kompletterar bilden (Fransson & Lundqvist, 2006).

2.8 Pågående projekt

2.8.1 Norut

Sedan slutet av 2011 pågår ett projekt för mätning av istryck mot dammar vid Norut i Narvik (Norut 2011). Projektet pågår i första fasen till 2014 med möjlighet till förlängning till 2016. Bakgrunden till projektet är att de nya Norska riktlinjerna för dammsäkerhet som började gälla 2010 även inkluderar en revidering av hur islaster på dammen beaktas. Detta innebär att det finns en mängd mindre dammar som kommer ha problem med att uppfylla kraven för glidstabilitet. Samtidigt är det enligt projektbeskrivningen en stor enighet i den Norska kraftbranschen om att osäkerhet råder i hur stora islaster som dammarna utsätts för. Tidigare mätningar har indikerat att lasten kan vara större än vad dagens föreskrifter antyder. Några skador som underbygger att dessa höga laster förekommer har emellertid inte observerats. De menar därför att det finns ett behov av att bättre kunna dokumentera och beskriva de krafter från isen som verkar på dammkonstruktionerna. Projektets huvudsyfte är därför att vidareutveckla och förbättra beräkningsmodeller för iskraft mot dammkonstruktioner.

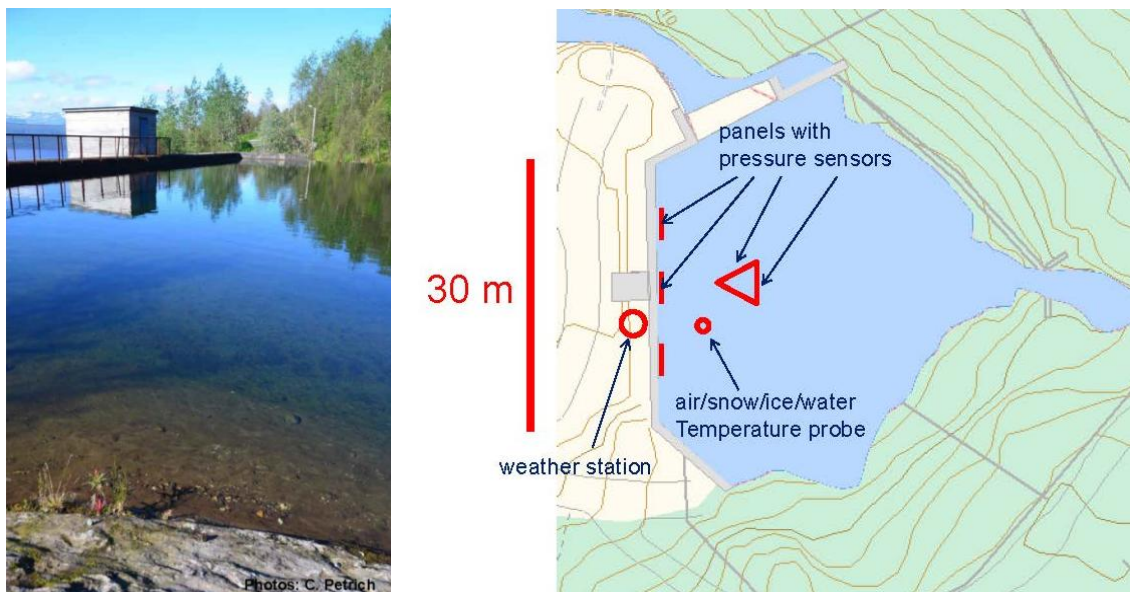
Projektet består i princip av fyra delar, (1) litteraturstudie, (2) Utveckling av numerisk beräkningsmodell för uppskattning av istryck mot dammar, (3) laboratorieförsök och fältmätningar, (4) analys av mätdata och kalibrering av beräkningsmodell.

Litteraturstudien färdigställdes i slutet av 2012 (Saether 2012). Studien innefattar gällande regler och riktlinjer för beräkning av islaster, både nationellt och internationellt. Den redovisar även en genomgång av existerande analytiska, semi-empiriska och numeriska metoder för beräkning av termiskt istryck. Studien innefattar även en sammanställning av metoder för mätning av termiska iskrafter mot dammkonstruktioner samt av mätresultat från tidigare utförda fältmätningar.

För att uppnå en bättre förståelse för hur termiskt istryck uppstår och verkar på dammkonstruktionerna är det enligt projektbeskrivningen tänkt att en numerisk beräkningsmodell ska utvecklas. Tanken är att modellen ska ta hänsyn till istryckets utveckling som funktion av temperaturlastning, isens mekaniska egenskaper, isens inspänningsförhållanden samt isens mekaniska egenskaper inklusive krypning. Modellen kommer att utvecklas stegvis. I en första ansats är problemet kraftigt förenklat och baseras på följande antaganden; temperaturen på isens undersida är 0°C och temperaturen på isens översida fluktuerar med lufttemperatur, vind och solinstrålning. En ökning av isens temperatur resulterar i ökade spänningar och en möjlig knäckning av istäcket. För att beakta isens flytkraft modelleras isen upplagd på icke-linjära fjädrar. Resultatet från modellen är tänkt att öka förståelsen avseende hur stora krafter som kan överföras till dammen p.g.a. termiska krafter samt vilka deformationer som islasten kan ge upphov till i dammkroppen. Vidare är det tänkt att modellen ska öka förståelsen för vilka variationer i istryck som kan uppkomma.

I syfte att utveckla och kalibrera den numeriska modellen kommer laboratorie- och fältmätningar att genomföras. Vilka parametrar som kommer undersökas i laboratorieförsök bestäms enligt projektbeskrivningen efter

utförd litteraturgenomgång. I den workshop som hölls den 23-24 Oktober 2012 i Narvik med temat "Bärkraftig förvaltning av betongdammar" presenterades det fältförsök där mätningar av istryck kommer genomföras. Mätningarna kommer ske vid betongdammen vid Taraldsvik, se **Figur 2.3**. Dammen valdes då den har en enkel geometri samtidigt som reservoaren har en stabil vattenyta utan fluktuationer. Reservoarens stränder är samtidigt branta och tillgång finns till elektricitet. Mätningarna har utförts under januari till mars 2013.



Figur 2.3 Foto och illustration över instrumentering vid Taraldsvik (Från presentation av Christian Petrich, Norut 2012).

2.8.2 Examensarbete vid KTH

För tillfället pågår ett examensarbete som behandlar islast på masternivå på Avdelningen för Jord- och Bergmekanik, KTH. Arbetet syftar till att dels ta fram en global statistisk fördelning för årlig maximal islast mot betongdammar, dels undersöka för vilka storlekar och typer av betongdammar där islasten har signifikant betydelse för stabiliteten. Den statistiska fördelningen kommer att baseras på tillgänglig, publicerad mätdata. Fördelningen ska sedan kunna fungera som grov uppskattning eller första ansats för islast vid stabilitetsanalyser, om inga mätningar har gjorts vid den analyserade dammen. Stabilitetsanalyserna i examensarbetet kommer att utföras med den sannolikhetsbaserade metoden FORM (First-Order Reliability Method) för lastfallen glidning och stjälpning. Examensarbetet beräknas vara färdigt i juni 2013.

3 Behov av forskning och utveckling

3.1 Problembeskrivning

Eftersom islast för vissa typer och storlekar av dammar kan utgöra en stor del av den totala pådrivande horisontallasten, skulle en förbättrad och mer nyanserad bild av islasten kunna ge bättre kännedom om den faktiska säkerhetsnivån hos dessa dammar. Utifrån genomgången litteratur relaterad till islast kan ett antal områden identifieras, inom vilka det fortfarande återstår stora kunskapsluckor:

- Metoder för att mäta islastens storlek i fält
- Islastens statistiska fördelning och inkludering i sannolikhetsbaserade stabilitetsanalyser
- Teoretiska modeller för beräkning av islaster
- Sannolikheten att riktigt stora islaster uppkommer (extremvärden)

I det följande kommer dessa problemområden mer ingående beskrivas och analyseras, för att visa på möjliga vägar framåt inom området.

3.2 Fältmätningar av statiska islaster på dammar

I stort sett alla kända fältmätningar av statiska islaster på dammar har skett indirekt genom att mäta isens in-situ-tryck. Den vanligaste mätprincipen än idag är att gjuta in en oljefylld plåt-kudde där oljetrycket mäts kontinuerligt (Fransson, 1988; Taras et al 2012). Genom att göra kudden platt (flat jack) antas istrycket vinkelrätt mot plåtytan vara ungefär lika stort som oljetrycket om hela kudden är ingjuten i isen. Denna typ av mätningar är otillförlitliga eftersom spänningarna omfördelas runt givaren om den har en annan deformation än isen. En annan försvårande egenskap är att oljan expanderar vid temperaturhöjning vilket innebär ett ökat oljetryck om isen inte kan deformeras. En summering av möjliga felkällor vid in-situ-mätningar i is med dessa typer av givare ges nedan.

- Lokal uppvärmning av givaren genom solstrålning.
- Lokal temperaturpåverkan av givaren genom ledning från luft eller störning av isolerande snö.
- Uppsprickning och stora interna vattentryck i samband med ingjutning.
- Kvarvarande trycknivå trots avkylning av isen.
- Sjunkande trycknivå vid uppvärmning av isen p.g.a. relaxation eller smältning.

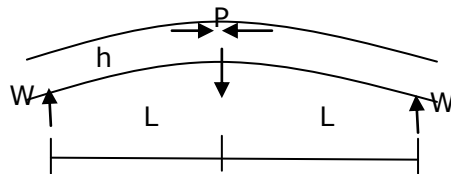
Utvärderingen av mätresultaten är därför synnerligen vanskliga om målet är att beräkna den verkliga lasten mot en damm. Eftersom dragspänningar inte kan registreras fås ingen information om eventuell krökning eller uppsprickning av istäcket. Hypoteser om hur vattenståndsvariationer påverkar istrycken kan därför inte undersökas med hjälp av dessa mätningar där alla resultat tolkas som horisontella islaster på konstruktionen.

Varför mäts då inte lasten direkt på dammen? En orsak är att vattenståndsvariationerna skapar sprickor mot vertikala väggar och drar lätt med sig svagt förankrade givare. Alternativt skapas speciella issprickor vid utstickande givare vilket stör mätningarna. Därför hängs givarna ned i vattnet nära väggen så att de i princip fungerar som de tidigare ingjutna givarna. Skillnaden är att det endast är en tunn is mellan givare och vägg. Baksidan av givaren förstärks i regel med en tjockare plåt för att inte skadas av skrovlig betong. En nackdel med den tjockare bakplåten är att den har bättre värmeledning än isen och att oljekuddens expansion blir större i riktning mot isen.

Mätningarna av istryck ute i isen har egentligen ingen relevans som indikation på islaster utan vilar tungt på den bakomliggande teorin om termisk expansion och isens reologiska egenskaper. Som exempel på relativt storskaliga mätningar (Taras et al 2011) användes 11 x 4 tryckceller med måtten 10 x 20 cm för att indikera last på ca 100 m vertikal dam. Lastcellerna mätte ca 2 kN per styck och lasten beräknades till 150 kN/m. Detta ger ett förhållande mellan mätt last och uppskattad last på 2/15000, vilket inte kan anses motsvara en fullskalemätning av islasten.

Biaxiella spänningsmätningar har också utförts i is. Ett vanligt instrument består av ett tjockväggigt stålrör som gjuts in i ett borrhål. Deformationerna mäts radiellt i röret med stor precision med hjälp av tre stycken svängande strängar och översätts till ett biaxiellt spänningstillstånd. Dessa beräkningar baseras på antagande om en oeftergivlig cylinder i ett elastiskt material. Stålröret bör också vara lika långt som istjockleken för att beräkningen ska vara korrekt men ofta görs empiriska korrekationer då givaren är kortare. I dessa mätningar är det oerhört viktigt att kontakten mellan stålet och isen inte påverkas kemiskt eller termiskt. Solstrålning i klar kärnis är helt fatalt för mätresultatet om givaren sitter nära ytan. Det största problemet är dock att givaren är relativt okänslig för små biaxiella tryck. Det är också lite oklart hur integreringen sker i djupled av ett olinjärt spänningsblock. Rätt använt ger instrumentet trots allt en någorlunda rättvisande bild av spänningen eftersom det även kan registrera dragspänningar åtminstone upp till nivån där vidhäftningen mot stålet brister.

Det är dock inte säkert att de uppmätta islasterna i isen representerar de islaster som verkar på dammen. I syfte att illustrera en möjlig förklaring som kan tyda på att islasterna som verkar på dammen är lägre än de uppmätta är isens krökning till följd av temperaturvariationer. Låt oss anta att en isbalk med tjockleken h värms upp på överytan så att den kröks som redovisas i **Figur 3.1**.



Figur 3.1 Tryckkrafter orsakade av krökning av en flytande isbalk

Genom att isbalken flyter på vattnet kommer vattnets upptryck att fördelas ojämnt vilket skapar ett böjande moment i isen. Jämvikt ger att tryckkraften av böjningen P i isens övre del bör vara proportionell mot ökningen av upptrycket W som har tyngdpunkten på avståndet L vilket kan skrivas

$$P = 2L/h W \quad (3.1)$$

Rimliga värden kan exempelvis vara $2L/h=100$ och W bör öka med istjockleken. För $h=0,5$ m kan man anta att upptrycket som mest blir $0,5$ kPa. Om vi tänker oss att detta tryck verkar på bredden 4 m blir $W=2$ kN/m och $P=200$ kN/m. Eftersom det samtidigt kan finnas en tryckande normalkraft i isen kan detta ske utan att isens underyta utsätts för stora dragspänningar. Den beräknade tryckkraften är alltså endast bidraget av krökningen, vilket inte ger någon ökning av normalkraften. Om isen spricker upp i underkant skulle det möjligen kunna uppstå en valvverkan som skapar islaster. Balkmodellen må vara en starkt förenklad representation av ett flytande istäcke som kröks men krökning av isen närmast dammen är förhindrad i parallell riktning. Det bör också nämnas att vid nedkylning av överytan uppstår krökning på liknande sätt, men det leder ofta till uppsprickning och då dragspänningarna omlagras krymper även bottendelen så att en bredare spricka kan bildas. Om ovanstående resonemang skulle vara korrekt, indikerar detta att uppmätta islaster sannolikt kan vara ett resultat av isens krökning och inte en verklig normallast som verkar på dammen.

Förbättrad mätning av islast

Förutsättningarna för att genom in-situ-mätningar i ett istäcke utveckla en fysikalisk modell för termiska istryck tycks vara ogynnsamma. Därför bör man helt inrikta sig på att stickprovsmässigt registrera trycket mellan is och damm under långa tidsperioder. En teknik för att gjuta in och installera robusta lastsensorer kombinerat med registrering av isens tjocklek och vertikala position bör utvecklas. Övriga variabler som kan påverka islasten och som bör mätas i samband med detta är klimatdata, vattenstånd och strömhastighet.

Hur ska man bäst mäta islaster mot dammar? Det enkla svaret är att man mäter den totala kraften på en så stor del av dammens kontaktyta mot isen som möjligt. Helst bör givaren vara lika stel som betong och ha en yta med samma fastfrysningsegenskaper som betong. Eftersom fullskalemätningar kan vara svårt och dyrt att åstadkomma på en befintlig damm, kan det näst bästa alternativet vara att mäta lasten på många små identiska delytor förutsatt att de är statistiskt representativa för hela kontaktytan. I fallet med laster som inte varierar snabbt är det relativt enkelt att synkronisera mätningarna så att

ett tidsmedelvärde erhålls som funktion av antalet involverade delytor. Det är då viktigt att mäta såväl på höjden som på bredden. Statistisk fördelning och parvis korrelation mellan mätinstrumenten beroende på placering är viktig information som kan ge uppslag till nya modeller för istryck.

När instrument och metod verkar fungera tillfredställande bör man förse flera dammar med tryckgivare på ett likartat sätt för att få en indikation på statistiskt säkerställda skillnader i uppmätta istryck. Det är då viktigt att oförvanskad mätdata jämförs utan att blanda in exempelvis modeller och ovidkommande variabler.

Mätning av andra relevanta parametrar

Det saknas idag grundläggande kunskaper om hur issituationen ser ut invid dammar i samband med att istryck mäts. Isytans planhet och snödjupet kan mätas noggrant med laserprofilering. Isens underyta kan kontinuerligt scannas med ekolod. Det vore också värdefullt att kunna göra en kartering av sprickor längs dammen och det är möjligt att studera densiteten av sprickor i uppsågade isblock. Inom bergmekaniken används vanligen seismiska och akustiska metoder för bestämning av materialegenskaperna. Sprickor i is kan förmodligen även detekteras med metoder som liknar fiberoptiska mätningar eftersom ljus i transparent is kan detekteras på stora avstånd.

3.3 Probabilistiska metoder

I mer avancerade stabilitetsanalyser används idag sannolikhetsbaserade metoder. Som indata krävs då både medelvärde, spridning och en uppfattning om vilken typ av statistisk fördelning som gäller för de parametrar som uppvisar variation. Eftersom islast kan variera stort över tid, vore det önskvärt att kunna beskriva denna parameter som en stokastisk variabel, för att förbättra tillförlitligheten i analyserna. Då islasten till stor del beror av lokala faktorer (såsom temperaturförändringar, vattenståndsvariationer, etc.), är det inte givet att kännedom om islastens storlek och spridning vid en damm ger någon som helst information om förhållandena vid en annan.

En generell modell för hur islasten beror av omgivningsfaktorer skulle kunna utgöra ett bra verktyg för att ta fram denna information. En annan möjlighet, vilken för tillfället undersöks i examensarbetet beskrivet i kapitel 2.8.2, är att nöja sig med en global fördelning baserad på uppmätta islaster på dammar världen över. Visserligen blir underlaget relativt stort, men på grund av beroendet av lokala faktorer blir också spridningen stor. En annan nackdel är att en sådan spridning inte blir särskilt representativ för dammar med stor islast. (Jämför med fallet att göra antaganden om vattentrycket mot dammen baserat på hur höga dammar i allmänhet brukar vara). Ett möjligt tillvägagångssätt skulle kunna vara att utgå från den globala fördelningen och sedan uppdatera denna fördelning med mätdata från den aktuella dammen genom användandet av Bayesiansk statistik. Detta kräver emellertid en utveckling av en sådan metodik.

3.4 Teoretiska modeller

Såsom litteraturstudien i denna rapport visar, återstår det fortfarande mycket arbete med att ta fram en tillförlitlig modell för förutsägelse av islast baserat på meteorologiska data. En sådan modell skulle kunna vara ett utmärkt verktyg för att riskklassificera dammar i grupper utefter sannolikhet för stor islast. Därmed skulle man kunna utröna för vilka dammar en mer utförlig undersökning av islasten vore lämplig.

Trots många år av mätningar och analys av data har man emellertid ännu inte lyckats identifiera, och i en modell införliva, alla de faktorer som påverkar islastens storlek. Huruvida en tillförlitlig modell bör basera sig på kända fysikaliska samband eller om det räcker med halvempiriska samband framtagna med kurvanpassning mot mätdata, är fortfarande en öppen fråga.

Med tanke på den komplexa samverkan som sker mellan olika faktorer, kan det konstateras att man i dagsläget är mycket långt ifrån att uppnå en tillförlitlig modell som helt och hållet baserar sig på fysikaliska samband. Även om detta är önskvärt, är målet något utopiskt för tillfället. Även den senaste halvempiriska modellen (Comfort et al 2003) har visat indikationer på att ha allvarliga brister, trots att forskning med denna pågått i över 20 år. Betydande modellosäkerheter återstår således.

Oavsett val av modell måste den förstas verifieras mot svenska förhållanden, innan den kan anses tillförlitlig i Sverige, även om modellen visat sig fungera i andra delar av världen.

Klart är att oavsett inriktning behöver det klarläggas vilka omgivningsfaktorer som signifikant påverkar islastens storlek. Detta kan göras på flera sätt; dels med ytterligare analys av fältmätningar, dels med numeriska simuleringar i datormodeller. Av särskilt intresse bör då de faktorer vara som medverkar till exceptionellt stora islaster. En modell som inte kan förutsäga extremvärden är till mycket liten praktisk nytta, hur väl modellen än predikterar normalstor islast, eftersom en konstruktion måste klara mer ovanliga lastfall. Om inte alla faktorer som påverkar islastens storlek är kända, är det naturligtvis mycket svårt att utveckla tillförlitliga modeller.

3.5 Tolkning av mätdata: när uppkommer extremt stora islaster?

En annan aspekt på mätresultaten är hur dessa ska tolkas, givet att instrumenten visar korrekta värden. Eftersom islasten kan variera mycket från år till år, måste man ställa sig frågan hur länge mätningarna måste pågå innan man kan dra tillräckligt tillförlitliga slutsatser för den aktuella dammen. Ur dammsäkerhetssynpunkt är extremvärden av stor betydelse. Men då extremt stora islaster i förekommande fall kan förväntas inträffa med relativt lång återkomsttid, som ett resultat av en osannolik kombination av påverkande faktorer, är det svårt att avgöra nödvändig omfattning av mätningarna för att inkludera detta. Detta gäller såväl generellt för framtagande av uppdaterade dimensioneringsvärden, som för den enskilda dammen i samband med en fördjupad dammsäkerhetsutvärdering.

Vissa studier hävdar dock att de extremt stora islaster som ibland har uppmätts ska betraktas med viss skepsis. Även om ett stort tryck har uppmätts lokalt på en plats i isen, finns det skäl att anta att trycket på andra ställen är betydligt mindre. För dammen som konstruktion är det snarare ett medelvärde över belastningsytan som är intressant, än det största lokala istrycket mot dammen. Utöver detta måste det också tas i beaktande att mätmetoderna hittills kan ha varit behäftade med signifikanta felkällor, såsom diskuterats tidigare. En relevant fråga är därför huruvida extremt höga islaster existerar över huvud taget.

Relaterat till utvärdering av mätresultat är också frågan vad beslut angående eventuell förstärkning ska baseras på. Om det finns indikationer på att en damm utsätts för stora islaster (till exempel efter riskklassificering baserat på klimatdata), under vilka förutsättningar bör dammen då förstärkas och när är det lämpligt att utföra mätningar på plats? Möjliga verktyg för att avgöra detta kan till exempel vara olika cost-benefit-metoder. En sådan analys kräver emellertid att metoder för statistisk dimensionering utvecklas för att islastens variation ska kunna beaktas korrekt.

4 Slutsats och rekommendationer

Ett flertal mätningar av islast på dammkonstruktioner har genomförts de senaste 60 åren. Mätningar av islast är emellertid ett svårt och komplext problem. Begränsningar med använda givare, skaleffekter och andra typer av mättekniska problem innebär att ett flertal av de värden som anges i litteraturen kan ifrågasättas. Även med dagens mer moderna mätmetoder kvarstår ett flertal frågeställningar såsom inverkan från infrysningstryck, lokala spänningskoncentrationer och begränsningar att kunna uppta dragspänningar. Dessa typer av begränsningar innebär att uppmätta islaster till viss del måste betraktas som osäkra. Det är emellertid en förutsättning att kunna mäta islasten på ett korrekt sätt för att veta vilken islast dammen utsätts för. Korrekta mätningar är även en förutsättning för att verifiera och fortsätta utveckla de modeller som tagits fram för att beskriva islasten. Ett möjligt sätt att bättre kunna mäta islasten är att installera/gjuta in givare direkt i betongkonstruktionen. Man bör eftersträva att mäta den totala kraften på så stor yta som möjligt av dammen. Med detta förfarande elimineras många av de problem som uppstår vid mätning av den islast som verkar på dammar.

Av särskilt intresse är de allra största lasterna. En del extremt stora värden på islast har mätts upp under åren, men med tanke på brister och felkällor i använda mätmetoder är det inte givet att så stora islaster existerar i verkligheten. Teoretiska resonemang har också pekat på att det största möjliga istrycket borde vara betydligt lägre. Att fastställa hur stor islasten egentligen kan bli är betydelsefullt för huruvida islast har signifikant betydelse för stabiliteten hos en given damm.

Det bör också utvecklas en metodik för att avgöra huruvida man bör förstärka en sådan damm eller om mätningar på plats har förutsättningar att visa att dammen i befintligt utförande har tillräcklig säkerhet. Exempel på detta kan vara olika cost-benefit-verktyg. En sådan metodik förutsätter emellertid en god kunskap om islastens medelvärde och spridning samt att metodik för statistisk dimensionering utvecklas i syfte att kunna beakta detta.

Både teoretiska och semi-empiriska modeller har tagits fram för att kunna uppskatta islast. I de flesta fall bygger modellerna på att de parametrar som påverkar islasten ingår. Detta innebär att mätning av luft- och istemperatur, istjocklek, snödjup, vattenståndsvariationer, isens uppsprickning, strändernas beskaffenhet, etc. är nödvändiga för att kunna kalibrera modellen. Den semi-empiriska tillvägagångssätt som använts av Comfort et al (2003) visade initialt på lovande resultat. När modellen skulle användas på andra dammar var emellertid modellosäkerheten betydande eftersom man inte lyckats inkludera alla faktorer. Ett delmål på vägen mot den generella modellen är att vidareutveckla befintliga modeller för att kunna ta fram en klassning av istryck utifrån ett fåtal parametrar som representerar lokala förhållanden såsom temperaturvariationer, vattenståndsfuktuationer och strändernas beskaffenhet. En representativ statistisk fördelning för sannolikhetsbaserad stabilitetsanalys anpassad till den analyserade dammen med lokala

klimatdata, ser dock ut att ligga långt fram i tiden, även om en sådan vore önskvärd.

Sammanfattningsvis rekommenderas att följande områden prioriteras vid framtida forskning inom området. Projektförslagen är ordnade efter bedömd prioritet, med den viktigaste frågan först.

- Utarbeta och verifiera en tillförlitlig metod att i fält mäta faktisk islast mot dammkonstruktionen. Möjliga tillvägagångssätt skulle exempelvis kunna vara utveckling av fullskalemätning såsom utförd vid Norströmsgrund.
- Utveckla metoder för analys och mätning i syfte att utröna om extremt stora islaster mot dammar kan uppkomma, eller om tidigare rapporter om detta beror på olika fel i mätmetoden. Detta förutsätter att en robust mätmetodik har utvecklats.
- Utveckla och/eller verifiera tillförlitligheten hos befintliga prediktionsmodeller för islast för svenska förhållanden. Ett delmål mot en generell modell kan här vara skapandet av ett klassificeringssystem som indikerar vilka dammar som med större sannolikhet utsätts för stora islaster, baserat på klimatdata och lokala faktorer.
- Ta fram verktyg för att hantera beslutsprocessen kring huruvida en damm bör förstärkas eller om det kan vara en framkomlig väg att investera i fältmätningar vid den aktuella dammen för att ge mer data att basera beslutet på. Hur mycket och hur länge man måste mäta för att ge tillräckligt tillförlitlig information, är här viktiga frågeställningar. En sådan analys kräver även att metoder för statistisk dimensionering utvecklas.

Oavsett vilket tillvägagångssätt som används vid den fortsatta forskningen kring islaster är det viktigt att påpeka att problemet är svårt och komplext. Det är därför viktigt med en långsiktig satsning om kunskapen kring islaster mot dammar ska kunna förbättras. I en sådan satsning bör därför samarbete och samfinansiering med övriga länder eftersträvas, exempelvis med Norut i Norge.

5 Referenser

Bergdahl L. (1977) Physics of ice and snow as affects thermal pressure, Inst. för Vattenbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Carter D., Sodhi D., Stander E., Caron O., Quach T. (1998) Ice Thrust in Reservoirs. Journal of Cold Regions, Vol. 12, No. 4, pp. 169-183.

Comfort G., Selvaduari A.P.S., Abdelnour R. & Au M.C. (1992) A numerical ice load model. Proc. 11th Symp. on Ice, IAHR, 15-19 June, 1992, Banff, Alberta, Canada.

Comfort G., Singh S. & Gong Y. (1998a) Static ice loads on dams: loads on the dam face and on wooden versus steel stoplogs. Proc. 1st Annual Conference System Stewardship for Dams and Reservoirs, CDA, 27 September-1 October, 1998, Halifax, Nova Scotia, Canada.

Comfort G., Singh S. & Gong Y. (1998b) Static ice loads on dams: loads along a dam face and on wooden and steel stoplogs. Proc. 14th Int. Symp. on Ice, IAHR, 27-31 July, 1998, Potsdam, New York, USA.

Comfort G., Singh S. & Gong Y. (2000a) Predicting static ice loads on dams. Proc. 15th Int. Symp. on Ice, IAHR, 28 August-1 September, 2000, Gdansk, Poland.

Comfort G., Singh S. & Gong Y. (2000b) The factors controlling static ice loads on dams. Proc. 15th Int. Symp. on Ice, IAHR, 28 August-1 September, 2000, Gdansk, Poland.

Comfort G., Gong Y., Singh S. & Abdelnour R. (2003) Static ice loads on dams. Can. J. Civ. Eng., 30, 42-68.

Comfort G., Côté A., Taras A., Wagner J. & Abdelnour E. (2012) Static ice loads on dams – measurements over the past four years. CDA Annual Conference, CDA, 22-27 September, 2012, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

Côté A., Taras A., Comfort G. & Morse B. (2012) Hydro Québec ice load measurement program. CDA Annual Conference, CDA, 22-27 September, 2012, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

Duckworth R. & Westermann P. (1989) Stress and strain instruments developed for measurements of ice. IEEE J. Ocean. Eng., 14(2), 159-165.

Ekström T. (2002) Islaster mot hydrauliska konstruktioner, med inriktning mot betongdammar. Litteraturstudie och styrande parametrar. Elforsk rapport 02:03.

Fransson, L. (1988) Thermal ice pressure on structures in ice covers. Thesis 1988:67D, Luleå university of technology, Sweden, 161 p.

Fransson, L. and Lundqvist, J-E. (2006) A statistical approach to extreme ice loads on lighthouse Norströmsgrund. Proc. of the 25th Int. Conf. on Offshore Mechanis and Arctic Engineering (OMAE), Hamburg, Germany.

Ko P.K., Ho M.S., Smith G.F. (1994) Thermal ice forces on concrete dams: Recent developments, Proceedings of the Xth Canadian Dam Safety Conference, Winnipeg, Canada, s. 17-33, 1994.

LTU (2003) Databas från fältmätningar av islast mot Norströmsgrund. Tillgänglig på <https://www.ltu.se/webbarkiv/SHB/ice/databas/index.htm>

Norut, Projektbeskrivelse: Istrykk mot dammer (ICEDAM/ISDAM).

Löfquist B. (1987) Istryck mot bropelare, Publikation 187:43, Vägverket, Sverige.

Saether I. (2012) Methods for prediction of thermally induced ice loads on dams and hydro-electrical structures, literature review, Technical Report, Report No. 2012/03, Norut.

Stander E. (2006) Ice Stresses in Reservoirs: Effect of Water Level Fluctuations. Journal of Cold Regions, Vol. 20, No. 2, pp. 52-67.

Taras A., Côté A., Morse B., Stander E., Comfort G., Noël P., Pratt Y. & Lupien R. (2009) Measurement of ice thrust on dams. CDA Annual Conference, CDA, 3-8 October, 2009, Whistler, British Columbia, Canada.

Taras A., Côté A., Comfort G., Thériault L., Morse B. (2011) Measurements of Ice Thrust at Arnprior and Barrett Chute Dams. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 16th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Winnipeg, September 18 - 22, 2011.

USACE (2002) Engineering and Design – Ice Engineering, Chapter 6, Ice Force on Structures. EM 1110-2-1610.

Willmot J.G. (1952) Measurement of ice thrust on dams. Ontario Hydro Res. News, Vol. 4.3, pp. 23-25.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31

Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535

www.elforsk.se