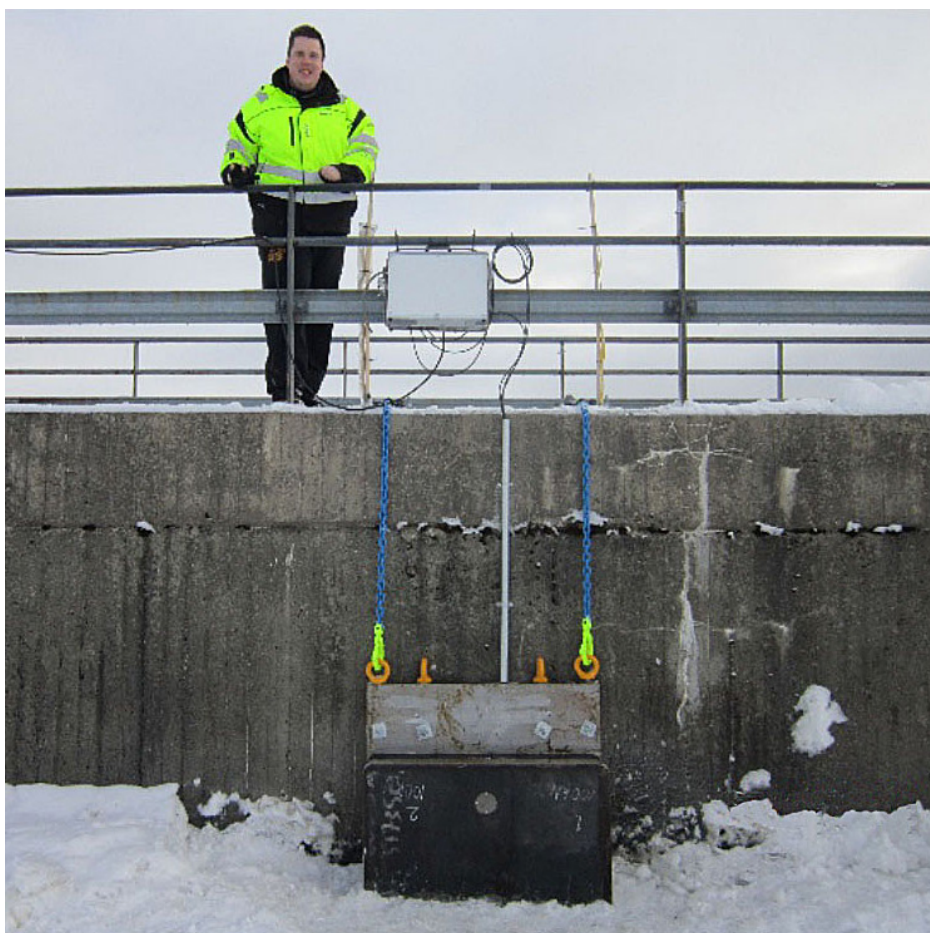


LASTFÖRUTSÄTTNINGAR AVSEENDE ISTRYCK

RAPPORT 2017:439



Lastförutsättningar avseende istryck

Utveckling av en prototypgivare och möjligheter till
uppdatering av svenska riktlinjer avseende islaster

RICHARD MALM
LENNART FRANSSON
ERIK NORDSTRÖM
MARIE WESTBERG-WILDE
FREDRIK JOHANSSON
RIKARD HELLGREN

ISBN 978-91-7673-439-1 | © Energiforsk oktober 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Den här rapporten är resultatet av projektet Lastförutsättningar avseende istryck. Projektet har utförts av Richard Malm, Sweco/KTH, Lennart Fransson, LTU, Erik Nordström Sweco/KTH, Marie Westberg-Wilde, ÅF/KTH, Fredrik Johansson Sweco/KTH och Rikard Hellgren, WSP/KTH.

Målet med projektet var att utveckla tekniska förutsättningar och en strategi för att med systematiska mätningar förbättra beskrivningen av islaster i de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS). Det syftade i sin tur till att minska osäkerheten i beskrivningen av islaster. Arbetet inkluderade att utveckla en prototyp av en lastpanel för mätningar av islast på betongdammar och att ta fram metodik för mätning av istrycksfördelning över en damm. Vidare skulle projektutförarna utvärdera och välja ut betongdammar som är särskilt lämpliga att genomföra mätningar på.

Projektet genomfördes inom ramen för Svenskt vattenkraftcentrum, SVC. Svenskt vattenkraftcentrum etablerades av Energimyndigheten, Energiforsk och Svenska Kraftnät tillsammans med Luleå tekniska universitet, Kungliga Tekniska Högskolan, Chalmers tekniska högskola och Uppsala universitet. Medverkande organisationer är: Andritz Hydro, Falu Energi & Vatten, Fortum Generation, GE Renewable Energy, Holmen Energi, Jämtkraft, Jönköping Energi, Karlstads Energi, Mälarenergi, Norconsult, Rainpower, Skellefteå Kraft, Sollefteåforsens, Statkraft Sverige, Sweco Energuide, Sweco Infrastructure, SveMin, Umeå Energi, Uniper, Vattenfall Research and Development, Vattenfall Vattenkraft, VG Power, WSP Samhällsbyggnad och ÅF Industry.

Oktober 2017

Sara Sandberg, Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Klimatet i Sverige innebär att våra svenska dammar utsätts för islaster och dimensioneringsvärdet enligt RIDAS (2012) varierar mellan 50 – 200 kN/m från söder till norr. Baserat på tidigare utförda mätningar så finns uppmätta islaster på upp emot ca 370 kN/m registrerade.

Syftet med föreliggande projekt har varit att ta fram en strategi för hur islasterna som anges i nuvarande RIDAS kan uppdateras. I detta har ingått att utveckla och prova en lastpanel in-situ för direkt mätning av islasten mot en svensk damm (Råtan), undersöka möjligheten att (utifrån dammens rörelser) numeriskt bakåträka uppmätt islast med lastpanelen, samt ta fram förslag till fortsatt forskning.

Utöver valet av mätmetod påverkas de uppmätta islasternas storlek av klimatologiska faktorer (temperatur, vind, snömängd etc.), reservoarens nivåförändringar, randvillkor från älvsträndernas närhet och bottentopografi samt avstånd till fritt vatten vid t.ex. intag eller utskov. Sannolikt påverkas islasten också av hur dammkroppens uppströmssida är utformad och huruvida dammens egna rörelser är små eller stora vid förändrade temperaturer. Även isens egna mekaniska egenskaper och förekommande sprickbildning påverkar islastens storlek.

De vid Råtan uppmätta islasterna under första vintern (2016) gav mätvärden på upp emot nivån 125-130 kN/m och något lägre (85-90 kN/m) för 2017. En analys av mätdata från 2016 gav att islasterna korrelerar bra till utomhustemperaturen på lång sikt, men också att variationerna p.g.a. dygnsreglering av reservoaren i hög utsträckning påverkar islasten. Det konstaterades också att det inte fanns någon stor inverkan av dammens egna temperaturrörelser. Kvaliteten på framförallt mätdata från de direkta pendlarna är låg vilket leder till komplicerad jämförelse med bakåtkräkningar. Rapporten presenterar därför enbart en generell metodbeskrivning kring hur bakåtkräkning kan göras utifrån mätdata.

De i projektet uppmätta islasterna har jämförts med t.ex. enkelt kvantifierbara parametrar som istjocklek och utomhustemperatur. Att enbart utgå från uppmätta spridningar på istjocklek och utomhustemperatur (köldmängd) och utelämnat randvillkor från stränder och magasinsvariation visar sig dock kunna ge både för låga och för höga dimensionerande islaster. Vid en framtida mätkampanj bör det eftersträvas att som komplement till mer kostsamma direkta mätningar med lastpanelerna även genomföra jämförande mätningar med enklare och billigare metoder (infrysning av enkla tryckceller).

I syfte att förbättra dimensioneringsberäkningar behöver islastens statistiska fördelning tas fram och det kan göras på olika sätt bl.a. genom en fysikalisk modell, fältmätningar på flera anläggningar, kombination av fältmätning och numeriska metoder eller användning av neurala nätverk/machine learning. Eventuellt kan det kombineras med laborativa studier.

Sammanfattningsvis har projektets syfte att prova in-situ-mätningar med en lastpanel för direkt mätning av islaster uppfyllts på ett bra sätt. Att bakåträka

islasternas storlek mot insamlade dampmätningar visade sig vara mycket svårt och vidare utveckling krävs för att bli ett tillförlitligt verktyg.

En eventuell uppdatering av RIDAS skulle kunna ske stegvis där första uppdateringen sker baserat på nuvarande kunskap och prediktionsmodeller, och en framtida uppdatering baseras på erfarenheter från framtida mätkampanjen. Ett tydligt resultat från studien är att det behövs mätningar under flera år innan en ändring av RIDAS kan göras med avseende på dimensionerande islaster baserat på den utvecklade prototypen för islastpanel.

Summary

The Swedish climate gives exposure for ice loads on the dams and according to the guideline RIDAS (2012) the design value vary between 50 – 200 kN/m from south to north. Based on previous measurements ice loads as high as about 370 kN/m has been monitored.

The purpose with the current project has been to develop a strategy on how the current design values in RIDAS can be updated. To get input a panel for direct in-situ monitoring of ice loads on a Swedish dam (Rätan) has been designed and tested. The possibility to backward calculate the ice loads from dam movements with numerical methods and identify needs for further research has also been part of the project.

Apart from the selected method for monitoring the ice load also the influence from climate (temperature, wind, snow etc.), change of reservoir level, boundary conditions from the river bed and distance to open water at spillway or inlet is of importance. It is likely that the ice load also is influenced by the shape of the upstream face of the dam and the size of thermal movements of the dam itself. Also, the mechanical properties of the ice and presence of cracks in the ice cover will influence the load level.

At the Rätan dam, the measured ice loads during the first winter (2016) gave values of up to 125-130 kN/m and a bit lower (85-90 kN/m) during 2017. The analysis on data from 2016 gave that the ice loads correlate well with the outdoor temperature on a long-term basis, but also that daily changes in the reservoir level has a high impact on the ice load. It was stated that there was no major impact from the movements of the dam itself. The quality of the dam monitoring with direct pendulums is low and that makes the backward calculations very difficult. Therefore, the report only presents a common methodology for how back calculation can be done from dam monitoring data.

The measured ice loads have been compares with easily quantified parameters such as ice thickness and outdoor temperature. It was shown that only consider measured distributions in ice thickness and temperature (frost index) and leaving out boundary conditions from river bed and reservoir changes can give both too low and too high design loads. In future monitoring campaigns, comparative monitoring with cheaper and more primitive methods (pressure cells) to correlate them with direct monitoring with the load cells is suggested.

To be able to improve the design process the statistical distribution for ice load must be developed and this can be done in several ways e.g. via a physical model, monitoring on several facilities, a combination between monitoring and numerical methods or use of neural networks/machine learning. Possibly, also in combination with laboratory methods.

In conclusion, the aim of the project to test in-situ monitoring with a panel for direct monitoring of ice loads has been fulfilled in a good way. To backward calculate the level of the ice loads from dam monitoring showed to be very difficult and further development is needed to be a reliable tool.

An update of RIDAS could be conducted in steps, where a first update is based on current knowledge and prediction models and later updates based on the experience from future monitoring campaigns. One obvious result from this study is that monitoring for many years is needed before an update of RIDAS can be made regarding design values for ice loads based on the developed prototype ice load panel.

Innehåll

1	Inledning	10
1.1	Bakgrund	10
1.2	Syfte	11
1.3	Disposition	12
2	Islaster	13
2.1	Styrande faktorer för islastens storlek	13
2.2	Mätning av islast	16
2.2.1	Mätning av spänningar i isen	16
2.2.2	Direkt mätning mot konstruktionen	17
2.2.3	Indirekt bestämning av islast genom numerisk bakåtanalys	17
3	Prediktion av istryck	19
3.1	Baserat på TIDIGARE Mätningar	19
3.2	Baserat på istjocklek	19
3.3	Baserat på temperatur	20
3.4	Sammanställning	21
4	Utveckling av lastpanel	22
4.1	Bakgrund till valet av mätmetod	22
4.2	Slutlig utformning av lastpanel	22
4.3	Montering	23
4.4	Kalibrering	24
5	Planering av mätprogram	26
5.1	Val av anläggning	26
5.1.1	Geografisk placering	26
5.1.2	Reservoaren	26
5.1.3	Dammanläggningens geometri och konfiguration	27
5.1.4	Befintlig instrumenteringsnivå	27
5.1.5	Övriga parametrar	27
5.1.6	Anläggningsval	27
5.2	Beskrivning av Rätans dammanläggning	28
6	Installation av lastpanel	31
6.1	Förberedelser	31
6.2	installation	31
6.3	Datainsamling	33
6.3.1	Nollvärdesavläsning	33
6.3.2	Mätning av islaster	34
7	Utvärdering av mätdata	36
7.1	Vintern 2016	36
7.2	Vintern 2017	37

7.2.1	Mätningar	37
7.2.2	Foton och observationer	42
7.3	Jämförelse MELLAN ISLAST OCH YTTRE FAKTORER	43
7.3.1	Statistisk utvärdering	44
8	Bakåtanalys av islastens storlek	46
8.1	Dammens respons till de uppmätta isLASTERNA.	47
8.2	Bakåtberäkning av islasten	49
8.2.1	Beräkna faktorn k , dammens statiska respons vid ökad islast.	49
8.2.2	Beräkna b , dammens säsongsrörelser utifrån temperatur och vattennivåvariationer.	50
8.2.3	Bakåtberäkna islastens storlek utifrån skillnaden mellan mätning och beräkning.	50
8.3	Mät noggrannhet vid bakåtberäkning	51
8.4	Modellfel vid bakåtberäkning	52
9	Uppskattning av svenska islaster baserat på nuvarande kunskap	54
9.1	Maximal islast baserat på Istjocklek	55
9.2	Maximal islast baserat på Temperatur	56
9.3	Slutsatser	57
10	Kunskapsbehov för uppdatering av dagens islaster	58
10.1	Behov av information för dimensionering	58
10.1.1	Dimensioneringsmetoder allmänt	58
10.1.2	Dimensioneringsmetoder för betongdammar	60
10.2	Möjliga metoder för framtagande av statistisk fördelning	60
10.2.1	Val och giltighet för statistisk fördelning	61
10.2.2	Framtagande av statistisk fördelning	61
10.2.3	Antal nödvändiga mätningar	65
10.2.4	Selection bias	66
10.3	Rekommendationer för Framtida arbete	67
11	Diskussion	69
11.1	Teoribakgrund och mätinstallation	69
11.2	Prediktion och uppmätta islaster	70
11.3	Bakåtanalys av islastens storlek	71
11.4	Framtida möjliga metoder att bestämma islastens storlek	72
11.5	Summering	72
12	Referenser	74

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Klimatet i Sverige innebär att våra dammar utsätts för islast, se t.ex. Figur 1. För att beakta detta rekommenderar de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS) att stabiliteten kontrolleras för de lastfall där islasten ingår.

Dimensioneringsvärdet enligt RIDAS (2012) varierar mellan 50 – 200 kN/m från söder till norr. Islastens storlek beror dock inte enbart på geografisk placering, andra faktorer påverkar såsom variation i vattennivå, lutning på stränder etc. (Comfort et al., 1993).

Adolfi och Eriksson (2013) sammanställde alla tillgängliga mätvärden avseende maximala uppmätta islast per år, i syfte att skapa en global statistisk fördelning för årlig maximal islast mot betongdammar. Baserat på tidigare mätningar så finns uppmätta islaster på upp emot 374 kN/m registrerade. Utifrån insamlade mätningar antogs islasten vara lognormalfördelad med ett medelvärde på 81 kN/m och en standardavvikelse på 86 kN/m.

Ovanstående värden visar att islasten kan utgöra en stor del av den totala horisontella lasten för en betongdamm, speciellt för lägre dammar. För en korrekt dimensionering är det angeläget att så noggrant som möjligt bestämma dess storlek och den osäkerhet med vilken den kan beskrivas. En bättre beskriven islast kan ge bättre kännedom om den faktiska säkerhetsnivån hos befintliga dammar.

Då islasten är svår att mäta och flera faktorer inverkar på dess storlek och variation är kunskapen om islasten behäftad med stora osäkerheter. Det är exempelvis inte säkert att de laster som uppmätts med den konventionella typen av lokala tryckgivare som monteras ute i isen, och som utgör underlag för de mätningar som sammanställdes av Adolfi och Eriksson (2013), representerar de laster som verkar på dammarna.



Figur 1-1. Is mot monolit mellan intag och flottningsutskov vid Krångfors kraftstation (Foto: Skellefteå Kraft), från Johansson et al (2013).

Under 2013 – 2014 genomfördes därför två projekt inom Elforsks Dammsäkerhetstekniska program i syfte att sammanställa kunskapsläget avseende islaster på dammkonstruktioner samt utvärdera alternativa metoder för att bestämma islastens storlek (Johansson et al. 2013, Johansson et al. 2014). I det senare projektet ingick att analysera möjligheterna att genomföra direkt mätning av islasten mot en betongdamm. Slutsatsen från denna analys var att detta utgör en möjlig väg framåt då metoden till stor del exkluderar de möjliga felkällor som en indirekt mätning med tryckgivare ute i isen är behäftad med.

I Elforsksprojektet (Johansson et al, 2014) studerades även möjligheten att använda numeriska analyser för att bakåträkna islasten utifrån indirekt mätning baserat på konventionella typer av givare som normalt finns på dammarna, såsom t.ex. pendel- och töjningsgivare. De analyser som genomfördes i projektet visade att för det studerade fallet krävdes relativt stora islaster på cirka 40-50 kN/m för att islastens inverkan på konstruktionen ska kunna särskiljas från övriga laster som konstruktionen utsätts för.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande projekt är att ta fram en strategi för hur dagens islaster i RIDAS kan uppdateras. I detta ingår att utveckla och prova en lastpanel in-situ för mätning av islasten mot en svensk damm, undersöka möjligheten att numeriskt bakåträkna uppmätt islast med lastpanelen, samt ta fram förslag till fortsatt forskning. Genom att göra direkta islastmätningar och studera dammens respons är tanken att kunna validera de rådande islastnivåerna mot en dammkropp.

Den fortsatta forskningen inkluderar att ta fram förslag till mätkampanj på svenska dammar och hur dessa mätresultat kan användas och extrapoleras med statistiska

metoder för att uppnå bättre underbyggda islaster i framtida riktlinjer för dammsäkerhetsberäkningar.

1.3 DISPOSITION

I föreliggande rapport presenteras först en kort sammanfattning av tidigare utförda litteraturstudier inkluderande vad som orsakar istryck mot en damm samt hur de vanligtvis mäts. Därefter presenteras uppbyggnaden av den lastpanel som använts för att mäta islasten mot en monolit i Rätans betongdamm, följt av utvärdering av mätdata från lastpanelen efter en säsongs mätningar. Detta kapitel följs av numerisk bakåtanalys av den uppmätta islasten. Därefter ges förslag till fortsatt arbete för en uppdatering av RIDAS samt behov av framtida mätkampanj.

2 Islaster

I följande kapitel presenteras en kortfattad sammanställning av de parametrar som är styrande för islastens storlek. Därefter presenteras olika metoder för mätning av islastens storlek och metodernas fördelar och begränsningar diskuteras. Kapitlet utgör en sammanfattning av tidigare studier utförda av Johansson et al. (2013 och 2014) och syftar till att ge läsaren en övergripande bild över de faktorer som påverkar islasten samt hur den kan mätas.

2.1 STYRANDE FAKTORER FÖR ISLASTENS STORLEK

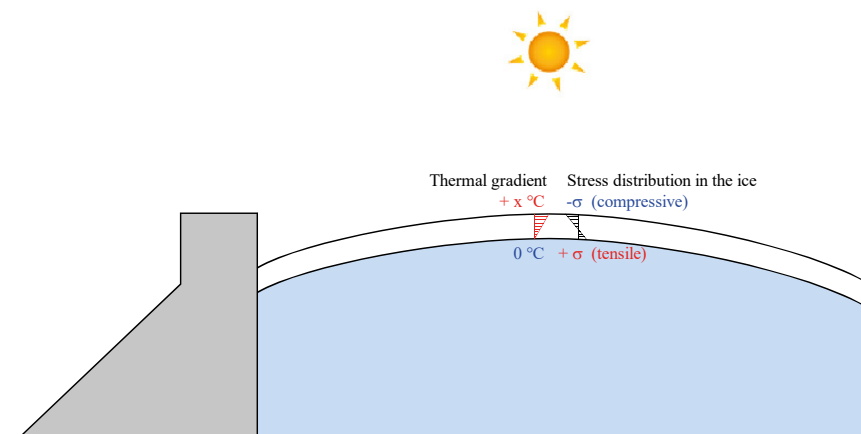
Såsom beskrivs i Johansson et al. (2013) kan den islast som verkar på en dammkonstruktion vara orsakad av flera olika mekanismer som verkar enskilt eller i kombination med varandra. De tre viktigaste är (1) krafter som uppkommer till följd av temperaturvariationer, (2) krafter på grund av vattenståndsvariationer och (3) krafter från vind och strömmande vatten.

Ökningar i isens temperatur innebär att isen expanderar. På isens undersida är emellertid temperaturen konstant 0°C, vilket hindrar översidan från att expandera. Istället uppstår böjspänningar som ger upphov till sprickor i isen. För att kunna uppskatta spänningarna i isen är det nödvändigt att kunna beräkna temperaturvariationerna över isens tjocklek. I temperaturberäkningen beaktas värmeöverföringen genom strålning, ledning och konvektion, se exempelvis Bergdahl (1977), varvid hastigheten på den termiska töjningen kan beräknas. Därefter beräknas spänningarna i varje punkt över isens tjocklek för att uppnå de termiska töjningarna. Genom integrering över isens tjocklek kan därefter den totala kraften per meter is beräknas (USACE 2002). Ett flertal olika teorier för beräkning av termiskt istryck har tagits fram, vilka bl.a. har beskrivits utförligt i Saether (2012).

Även om det rent teoretiskt är möjligt att uppnå höga värden på termiska istryck finns det ett flertal faktorer som kan reducera trycket och den frekvens då de höga trycken uppkommer. Ett exempel är snö på isen, där 5 cm snö enligt Löfquist (1987) avsevärt reducerar det termiska istrycket. Risker för höga termiska istryck bedöms därför som störst på för- och eftervintern. Vidare krävs det mycket kraftiga temperaturstegringar för att uppnå extrema termiska istryck. Löfquist (1987) anger exempelvis att i beräkningar antagna värden på temperaturstegringar från t.ex. -30 °C till 0 °C sannolikt inte är representativa för hela Sverige, utan främst för de norra delarna. En annan faktor som kan reducera den termiska islasten är strändernas mothåll. Exempelvis förslår Ko et al. (1994) att den termiska islasten delas in efter strändernas karaktäristiska förhållanden med avseende på lutning.

Såsom diskuteras i Johansson et al (2013) är det också långt ifrån säkert att de uppmätta lasterna i isen representerar de laster som verkar på dammen. En krökning av flytande is genererar en ojämn uppåtriktad tryckfördelning. Överslagsberäkningar utförda i Johansson et al (2013) visar att relativt små skillnader i tryckfördelning kan ge upphov till höga tryckkrafter i isens övre delar. Då det samtidigt kan finnas en tryckande normalkraft i isen kan detta ske utan att

isens underyta utsätts för stora dragspänningar. Detta innebär att den beräknade tryckkraften endast är bidraget av krökningen, vilket nödvändigtvis inte ger någon ökning av normalkraften. Därmed, att bestämma islasten från tryckspänningen i isen kommer överskatta islasten eftersom även momentet från böjning inkluderas i normalkraften, se Figur 2-1.



Figur 2-1 Illustration av böjning av isen pga temperaturgradient.

Utöver ovanstående faktorer finns det enligt Johansson et al (2013) ett antal andra möjliga orsaker till att uppmätta termiska istryck i de flesta fall är lägre än de teoretiska maxtrycken: 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 och istryckets medelvärde minskar med kontaktareans storlek.

En annan parameter som kan påverka islasten är vattenståndsvariationer. Mätningar av Carter et al. (1998) visade att uppmätta islaster korrelerade mot både ökande temperaturer i isen och vattenståndsvariationer. Liknande observationer gjordes även av Comfort et al. (2000a och 2000b) i ett åtta år långt program för mätning av islaster vid fyra dammar. Comfort et al. (2000b) delade in vattenståndsvariationerna i tre klasser;

- (1) små (10 - 15 cm) och långsamma höjningar (0-0,5 ggr/dag) vilka har en försumbar inverkan på islasten
- (2) stora (35 - 45 cm) och återkommande sänkningar (1-1,5 ggr/dag) vilka skapar låga islaster
- (3) mellanliggande höjningar (10 - 30 cm) som inträffar relativt ofta (1-2 ggr/dag) som ger upphov till de största islasterna.

Vid exempelvis Sevens Seters damm uppmättes lastbidraget från variationer i vattenstånd till mellan 150-300 kN/m medan övriga tre dammar uppmätte lastbidrag till följd av vattenståndsvariationer till mellan 0-100 kN/m. Vidare

observerades att enskilda större sänkningar större än istjockleken tenderar att kraftigt minska islasten under resten av året.

Inverkan på spänningarna i isen från variationer i vattenstånd studerades även av Stander (2006). Studien utgick från en hypotes som ursprungligen föreslogs av Willmot (1952) och som utgick ifrån att ett istäcke som är fastfruset i en stödmur kommer spricka när vattenytan i magasinet sänks. Dessa sprickor fylls med vatten och fryser igen vilket leder till en ökad sprickyta. Vid efterföljande höjning leder den nya större isytan till att tryck bildas mot stödmuren, då den nya större ytan måste passa in i den ursprungliga mindre ytan. Mätningar utförda vid La Gabelle reservoaren av Stander (2006) stödde fullt ut den föreslagna hypotesen av Willmot (1952). Långt ut i reservoaren korrelerade uppmätta spänningar väl mot isens temperaturvariationer, medan spänningarna närmare stranden uppvisade en stark korrelation med förändringar i vattennivå som överlagrade spänningarna till följd av temperaturvariationer.

Standar (2006) menade att följande punkter måste vara uppfyllda för att islasten till följd av vattenståndsvariationer ska uppstå: (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.

Vid strömmande vatten och blåst uppstår skjuvspänningar mot isen vilket genererar krafter i isen (USACE 2002). Den totala kraften som uppstår är proportionell mot isens area, men arean för att kunna beräkna den totala islasten mot en konstruktion är i många fall svår att uppskatta. Vid stora isytor kan den totala kraften från dessa mekanismer överskrida isens bärförmåga. Möjliga brottmoder är krossning, böjning, buckling och splittring. Beskrivningar av hur hållfastheten beräknas för dessa brottmoder presenteras i exempelvis USACE (2002).

En brottmod som kan begränsa den islast som verkar mot dammar är buckling. I studier utförda av Carter et al (1998) observerades vertikala sprickor parallellt med dammen på ett regelbundet avstånd som stämmer väl överens med det teoretiska bucklingsavståndet för ett tunt flytande isflak. Uppmätta islasten vid La Gabelle och LG Un stödjer denna teori då de låg i linje med en teoretisk modell föreslagen av Carter et al (1998) som beaktar buckling.

2.2 MÄTNING AV ISLAST

2.2.1 Mätning av spänningar i isen

Den vanligaste typen av fältmätningar för att bestämma islasten är genom s.k. "flatjacks", vilket innebär att en oljefylld plåt-kudde placeras i isen där oljetrycket mäts kontinuerligt, se exempelvis Fransson (1988) och Taras et al. (2011). Eftersom kudden är platt antas istrycket vinkelrätt mot plåtytan motsvara oljetrycket då den är ingjuten i isen. I princip samtliga mätningar fram till dagens datum, och som sammanställts av Adolphi och Eriksson (2013), har genomförts med dessa typer av mätningar.

Ett problem med dessa mätningar är att givaren kan värmas upp lokalt genom solinstrålning eller genom ledning från luft. Givaren kan också påverkas lokalt av isolerande snö. I samband med ingjutning kan också stora interna tryck uppstå. Dessutom kan sjunkande trycknivå uppstå vid uppvärmning av isen genom relaxation eller smältning av isen runt givaren. En annan försvårande faktor är att oljan expanderar vid temperaturhöjning, vilket innebär ett ökat uppmätt oljetryck vid konstant istryck. Dessa typer av fältmätningar är således mycket osäkra då syftet är att bestämma totala islasten som verkar på en damm. Eftersom dragspänningar inte kan registreras med dessa givare erhålls inte heller någon information om eventuell böjning/krökning eller uppsprickning av istäcket. Hypoteser kring hur vattenståndsvariationer påverkar istrycken kan därför inte undersökas korrekt då mätresultaten enbart förutsätts motsvara horisontella islaster på konstruktionen.

Ett exempel på relativt storskaliga mätningar med dessa typer av givare utfördes av Taras et al. (2011). Totalt användes 11 paneler med 4 stycken tryckceller med måtten 10 x 20 cm på varje panel för att mäta lasten över en sträcka på cirka 30 m. Lastcellerna mätte ca 2 kN per styck och lasten beräknades till maximalt 150 kN/m, vilket ger ett mycket litet förhållande mellan uppmätt och uppskattad last och kan således inte anses utgöra en fullskalemätning av islasten. Genom dessa mätningar av mindre områden erhålls också höga "punktlaster", vilka leder till en överskattning av den totala kraften om dessa värden antas verka mot hela dammen. Ett liknande mätförfarande har använts av t.ex. Petrich & al. (2015) där man också gjort mätningar på olika nivåer i istäcket.

Ett annat vanligt instrument, som bl.a. användes av Taras et al. (2011), är ett tjockväggigt stålrör som mäter det bi-axiella spänningstillståndet i isen. Instrumentet gjuts in i isen och vid termisk expansion av isen mäts de radiella deformationerna i röret med stor precision med hjälp av tre stycken svängande strängar. Beräkningarna för bestämning av spänningstillståndet bygger på antagandet om en oefftergivlig cylinder i ett elastiskt material. För att givaren ska registrera korrekt spänning bör rörets längd vara lika med istjockleken. Det är oerhört viktigt att kontakten mellan stålet och isen inte påverkas termiskt, vilket innebär att givaren är känslig för solinstrålning i klar kärnis om givaren sitter nära ytan.

2.2.2 Direkt mätning mot konstruktionen

En annan metod för att mäta islasten är att direkt mäta den kraft som verkar på konstruktionen genom att summera den totala kraften från ett flertal större lastpaneler. I Johansson et al. (2014) beskrivs olika möjliga metoder för att mäta den last som verkar på panelerna, exempelvis registrering av volymändring av en låda (s.k. Meadof panel), registrering av stödkrafter med lastceller, mätning av dragkraft i en tråd via resonans, taktila tryckgivare och fiberoptisk mätning av töjning.

En sådan mätning med flera lastpaneler genomfördes under åren 1999–2003 på Utsjöfyren Norströmsgrund utanför Piteå i Bottenviken. Fyren instrumenterades med mätpaneler som registrerade trycket från isen, se Figur 2. Panelerna som bestod av 9 stycken kraftiga lådor av stål ($1.6 \times 1.2 \text{ m}^2$) och täckte hela istjocklekens kontaktyta över en sträcka på ca 11 m. Varje panel hade en lastkapacitet på över 2MN och vägde ca 3 ton, där lasten mättes i varje panel mättes med fyra stycken lastceller som var monterade i lådan. Dessa typer av fältmätningar har stora fördelar när man söker laster för dimensionering, då totala lasten uppskattas och inte enstaka punktryck. En statistisk bearbetning av mätdata finns beskriven i Fransson & Lundqvist (2006).



Figur 2-1. Paneler för fullskalemätning av islast mot fyren vid Norströmsgrund (Foto: Lennart Fransson, LTU).

2.2.3 Indirekt bestämning av islast genom numerisk bakåtanalys

En tredje, indirekt metod, för bestämning av islast diskuterades i Johansson et al (2014). Metoden bygger på att dammens deformationer mäts med hög noggrannhet samtidigt som variationer i vattenstånd och omgivande lufttemperatur mäts. Baserat på dessa data genomförs därefter en numerisk

bakåtanalys av islastens storlek. Exempel på möjliga deformationsmätningar är mätning av krönrörelser med pendelgivare, mätning med töjningsgivare på betongen samt sprickviddsmätare.

Utifrån en befintlig modell av en lamelldammsmonolit beskriven av Malm et al (2009) analyserades vilka typer av mätningar som kunde vara lämpliga för att genomföra bakåtanalysen. Denna analys visade att mätning med direkt pendel utgör den mest lämpliga metoden, där pendelns noggrannhet uppgår till ca 0,1 mm vilket motsvarade en islast på 13 kN/m för den analyserade monoliten. Förväntad osäkerhet i den numeriska modellen bedöms emellertid uppgå till cirka 0,3-0,4 mm, vilket motsvarar en islast på 40-50 kN/m (Johansson et al. 2014). En annan möjlig mätning utgörs av töjningsgivare monterade på frontplattan. Noggrannheten vid en enskild kalibrerad givare uppgår till 90 kPa, vilket för den analyserade monoliten motsvarade en islast på 45 kN/m. Däremot visade analysen i Johansson et al. (2014) att sprickviddsmätning och mätning av förspänningskraft inte var lämpliga att använda. Sammanfattningsvis visade analysen att islaster på ca 40-50 kN/m krävdes för att islasten ska kunna bakåtanalyseras. Då det inte är säkert att islaster i denna storleksordning uppträder i ett magasin varje år konstaterades att det är viktigt att mätningarna planeras att fortgå under ett flertal år.

3 Prediktion av istryck

Som nämnt i kapitel 2 är det svårt att göra uppskattningar av istryckets storlek, både vid enskilda tillfällen eller maximala värden som kan uppstå. Detta beror till stor del på isens egenskaper men även på att tidigare mätningar och teorier ger vitt skilda resultat. I två tidigare Energiforskrapporter har olika teorier angående istryck mot dammar sammanställts och presenteras. För en mer utförlig genomgång hänvisas till dessa (Johansson & al, 2013, 2014). RIDAS ger riktlinjer på islastens storlek men poängterar samtidigt att högre laster än de angivna kan förekomma. En liknande försiktighet återfinns i andra svenska normer där riktlinjerna snarare är ett minivärde än ett maxvärde. Nedan presenteras ett urval av metoder och teorier för att bestämma det maximala istrycket mot en damm. Urvalet har gjorts med fokus på teorier där istrycket kan förutsägas från enkelt mätbara parametrar så som istjocklek och/eller utomhustemperaturer. Nedan presenteras både maxvärden, P_{max} och designvärden P_{design} . Designvärden används där författarna specificerat att detta avser designvärden. Ingen värdering har gjorts kring hur designvärdet valts och den bakomliggande säkerhetsfilosofin. Då flera av metoderna presenterats för över 30 år sedan är det troligt att deras säkerhetsfilosofi skiljer sig från den som används idag.

3.1 BASERAT PÅ TIDIGARE MÄTNINGAR

Den vanligaste metoden för att göra en uppskattning av islasten på en struktur är genom att utgå från referensmätningar från liknande förhållanden. I Timco et.al (2006) finns en workshop presenterad där utvalda isexperter från hela världen fått uppskatta den maximala islasten mot ett antal konstruktioner. Huvuddelen av experterna använde tidigare mätningar eller designkoder som grund för sin uppskattning. Författarna konstaterar vidare att tillgången på bra mätserier kraftigt minskade standardavvikelsen i uppskattningen jämfört med tidigare genomförda workshops. Även de tidigare presenterade teorierna av Comfort et.al visar att istrycket i Kanada varierar mellan olika regioner och att regionsbaserade koefficienter måste användas för att använda deras semiempiriska formler.

3.2 BASERAT PÅ ISTJOCKLEK

Istjocklekens betydelse för det maximala istrycket har under senare år marginaliserats. Då tryckkapaciteten för is vid krossning är mellan 1 och 5 MPa innebär det att teoretiskt kan även tunna istäcken bära höga islaster. Det finns dock ett antal instabiliteter som hindrar att dessa spänningar kan förekomma. Enligt Bergdahl (1978) begränsas den maximalt möjliga islasten mot en konstruktion av isens bucklingskraft. För is med istjockleken h bestäms därmed den maximala islasten, P_{max} , som

$$P_{max} = 2 \sqrt{\frac{\rho_w g E h^3}{12(1 - \nu)}} \quad (3.1)$$

där ρ_w är vattnets densitet, g är tyngdaccelerationen, E är isens elasticitetsmodul i mitten av istjockleken och ν är isens tvärkontraktionstal.

Utifrån studier vid fem kinesiska dammar föreslår Xu Bomeng (1986) att designvärdet för istrycket mot en damm kan sättas till

$$P_{design} = 13Kc_h m_t h g \quad (3.2)$$

m_t är en faktor som beror på hur hastigt temperaturen kan förändras i isen, för istjocklekar under 50 cm väljs värdet 1.0 och för större tjocklekar väljs 1.82. Skillnaden beror på antaganden om hur värmen sprids i isen. För istjocklekar större än 50 cm antas lasthändelsen pågå under två dygn vilket motiverar en högre temperaturkoefficient. Faktorn c_h tar hänsyn till isens tjocklek. Värdena 0.391, 0.311, 0.274, 0.252 och 0.237 anges för istjockleken 40, 60, 80, 100 respektive 120 cm. K är en faktor som tar hänsyn till isens sammansättning och varierar mellan 3.5 och 5.0.

Sodhi och Carter (1998) baserar sin uppskattning av den maximala islasten på en plastisk gränslastbetraktelse. Den islast som skapar ett instabilitetsbrott i isen och därmed begränsar den maximala islasten kan beräknas som

$$P_{max} = 253h^{1.5}. \quad (3.3)$$

Denna formulering används i den Norska dammsäkerhetsrekommendationen (NVE 2003), där koefficienten 253 avrundats till 250.

3.3 BASERAT PÅ TEMPERATUR

Generellt är teorier angående istryck ofta baserade på temperaturförändringar och många modeller kräver att temperaturprofilen innan och efter en lasthändelse är känd. Detta kräver i sin tur att istjockleken och snödjupet på isen är kända för att temperaturprofilen i isen ska kunna beräknas. Det finns dock exempel där den maximala islasten kan bestämmas enbart baserat på temperaturer. Fransson (1988) föreslog hur det maximala istrycket kan beräknas från den kallaste veckomedeltemperaturen T_0 under en tioårsperiod.

$$P_{design} = 2(-T_0)^{1.5} \quad (3.4)$$

Sambandet är giltigt för istjocklekar över 50 cm, men kan enligt Fransson (1988) möjligen överskatta istrycket för mindre istjocklekar. Carter (1998) baserar sin uppskattning på ackumulerade frysgraddagar, S enligt

$$P_{max} = 35.78\sqrt[4]{S} \quad (3.5)$$

Frysgraddagar beräknas här som luftens medeltemperatur under ett dygn, där minusgrader ger ett positivt värde och plusgrader ett negativt värde. De ackumulerade frysgraddagarna beräknas sedan genom att summera frysgraddagarna för de enskilda dygnen från den punkt där isen bildas på hösten. Carters använder sedan de ackumulerade frysgraddagarna för att beräkna isens tjocklek och därefter beräknas istrycket utifrån istjockleken enligt 3.3.

Ko et.al (1994) föreslår att designvärdet för islasten bestäms utifrån lutningen på reservoarens stränder och en temperetutur som endast 1 % av januaris timtemperaturer understiger. Reservoarens stränder delas upp i tre kategorier med plana stränder ($<20^\circ$), måttligt lutande stränder (20° till 45°) och kraftigt lutande stränder ($>45^\circ$). För en kraftigt lutande strand bestäms designvärdet till 1.5 gånger motsvarande värde för en plan strand. De värden som Ko et.al (1994) presenterar och som återgivs i Tabell 2 gäller för vad författarna kallar normala förhållanden. För älvar med branta stränder där snötäcke saknas på isen kan istrycket överskrida de rekommenderade värdena.

3.4 SAMMANSTÄLLNING

I tabell 3-1 visas resultat från de ovan presenterade metoderna. För ekvation 3.1 har $E=1\text{GPa}$ och $\nu=0$ använts. Bergdahls metod avviker från övriga och ger islaster som är 5-10 gånger större än övriga metoder. 3.2 och 3.3 ger liknande värden, särskilt om det lägre värdet på K används. De värden som ekvation 3.3 ger ligger generellt inom spannet för de värden som Bumeng föreslår.

Tabell 3-1 Maximala islaster utifrån istjocklek i kN/m.

Istjocklek [cm]	Bergdahl [kN/m]	Carter [kN/m]	Xu Bomeng	
			Min ($K=3.5$) [kN/m]	Max ($K=5.0$) [kN/m]
40	462	64	75	107
50	645	89	84	120
60	849	118	163	233
70	1069	148	179	256
80	1306	181	192	274
90	1559	216	207	296
100	1826	253	220	315

Tabell 3-2 visar maximala värden för islasten uppskattade utifrån lufttemperaturer. Franssonns metod baserad på kallaste medeldygnet ger istryck mellan 63 och 506 kN/m för temperaturen från -10 till -40 medan Ko et. al. ger islaster i spannet 90-150 kN. De angivna värdena i Tabell 3-2 går inte att jämföra rakt av då Fransson använder dygnsmedelvärden och Ko et.al använder värdet som motsvarar den kallaste första percentilen. Klart är dock att Ekvation 3.4 generellt ger större islaster än de föreslagna av Ko et. al (1994).

Tabell 3-2 Maximala islaster baserat på lufttemperatur i kN/m.

Temperatur [°C]	Fransson (1988) [kN/m]	Ko et. Al (1994) Kraftigt lutande [kN/m]
-10	63	90
-20	179	120
-30	329	150
-40	506	150

4 Utveckling av lastpanel

4.1 BAKGRUND TILL VALET AV MÄTMETOD

Det konstaterades i tidigare förstudier (Johansson et al., 2014) att det var nödvändigt att mäta islasten direkt mot dammen och inte som tidigare ofta skett göra beräkningar av islaster baserat på in-situ mätningar av tryck i isen. För att öka tillförlitligheten i mätningarna krävdes utveckling av ett nytt mätinstrument som täckte hela istjockleken och som var i det närmaste oeftergivligt. Styvhet och vidhäftning skulle helst vara i paritet med isen/dammen för att undvika överbrygging av islaster eftersom mätbredden av kostnadsskäl måste begränsas.

Isförhållandena närmast en damm skiljer sig till viss del från andra områden eftersom de påverkas av vattenståndsvariationer och värmeledning från dammen. Isen kan dessutom förväntas vara sprucken, uppvattnad och tjockare än typisk sjöis. Tidigt i projektet valdes följande ingångsparametrar för instrumentet som här fortsättningsvis benämns *lastpanel*:

- Höjd = 3 m
- Bredd = 1 m
- Max istryck = 1 MPa

I samband med mätningar av islaster mot fyren Norströmsgrund i Bottenviken utvecklades en robust lastpanel som fungerade under fyra vintrar. Målet var att kunna förenkla denna konstruktion och samtidigt förlänga livslängden. Antalet lastceller minskades från fyra till tre, med två av lastcellerna ovanför vattenlinjen. Säkerhet mot haveri på grund av vattenläckage prioriterades framför mätnoggrannhet. Risken för överbelastning minskades genom viss överdimensionering.

4.2 SLUTLIG UTFORMNING AV LASTPANEL

Lastpanelen, som visas i Figur 4-1, tillverkades av stålplattor med en yttre form som påminner om en gigantisk smartphone. Den stora höjden syftade till att täcka in vattenståndsvariationer och att med säkerhet täcka hela istäckets tjocklek oavsett nivå i reservoaren. Bredden på 1m korrelerar bra mot den enhet i kN/m som islasten brukar anges i. Det hade varit önskvärt att placera flera paneler bredvid varandra för att se variationer längs med dammen, men detta fick utgå av kostnadsskäl. Locket var gjort av homogent stål, 16 cm tjockt och var upplagt på tre inbyggda lastceller som endast kunde registrera tryckkrafter. Den stora tjockleken syftar till att skapa så hög styvhet att den beter sig som en stelkropp under trycket från islasten. Tätningen mot vatten bestod av en o-ring i ett spår runt bottenplattan och ett vulkaniserat gummiskydd runt sidorna. Locket och bottenplattan förspändes med hjälp av tre skruvförband i linje med lastcellerna som var utformade med en sfärisk kontaktyta mot undersidan av det plana locket. Lastceller och skruvar placerades så att locket kan betraktas som en fritt upplagd balk. Den nominella spännkraften justerades så att alla tre lastcellerna visade 100 kN då lastpanelen låg horisontellt utan yttre last. Syftet med den stora åtspänningskraften var dels att med trycket mot o-ringen skapa ett vattentätt

utrymme mellan lock och botten och dels att möjliggöra mätning av både drag- och tryckkrafter från isen.

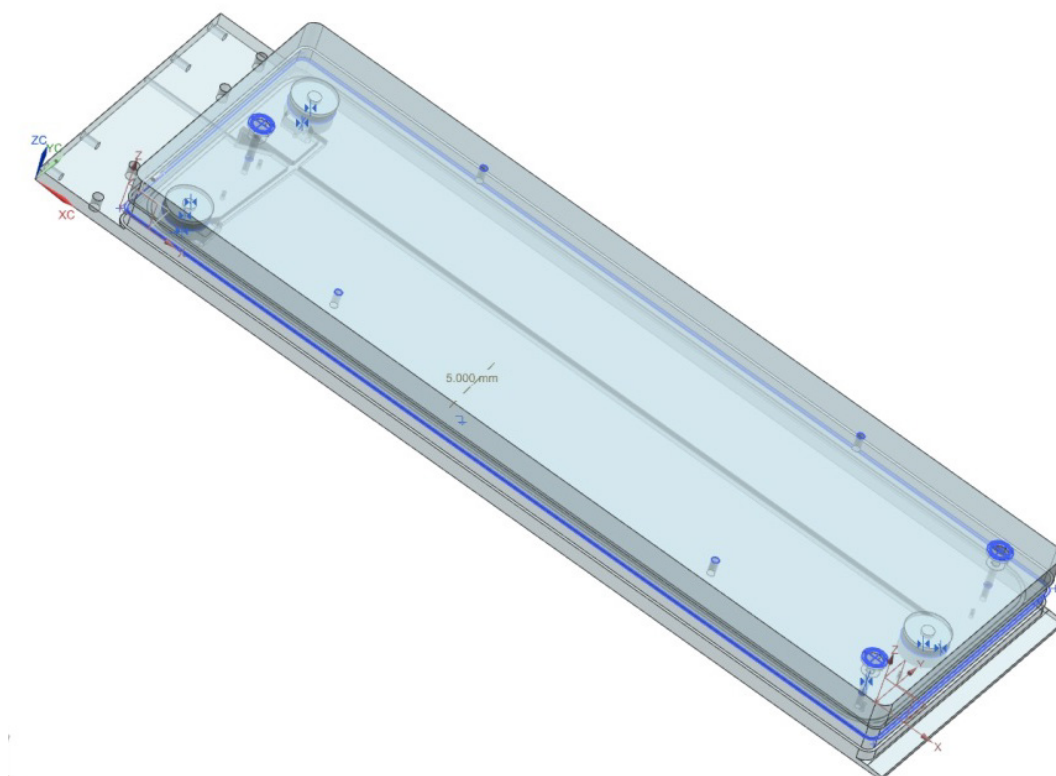
Lastpanelen var tänkt att kunna fungera tillsammans med flera likadana paneler för att täcka in en större bredd. Panelens övre del kan fästas direkt med expanderbult mot en plan betongyta. Flänsen är relativt hög för att ge ett visst motstånd mot rotation i händelse av att isen orsakar dragkrafter. Panelens nedersta del har gjorts kilformad och kan sänkas ner mot ett stöd som förbereds under vatten av en dykare. Idealet hade varit att även kunna fästa panelens underkant, men vi avstod från det av kostnadsskäl.

4.3 MONTERING

Lastpanelens ståldelar tillverkades av Nybergs mekaniska verkstad i Piteå, efter konstruktionsritningar utförda av Martin Lund vid LTU. Delarna till panelen som vägde ca 6,5 ton levererades till LTUs labb 2016-01-12. Avståndet mellan lock och botten kontrollerades runtom där o-ringen skulle placeras. Stålämnena hade värmebehandlats före bearbetning vilket resulterade i en tillräckligt god planhet på ca +/- 0,1 mm. En 12 mm o-ring (ors, nitril) placerades i ett spår som var 14 mm brett och 5 mm djupt. Avståndet justerades med tunna schimsplåtar under lastcellerna så att o-ringen trycktes ihop 2,0 mm då locket var monterat. Glappet mellan lock och botten blev därmed 5 mm vilket ger plattans tillåtna nedböjning.

Lastpanelen provbelastades med en yttre last på 500 kN över varje lastcell. Därigenom gjordes en liten intryckning i stålloket i kontakten med den sfäriska kontaktytan. Mätkablar från lastcellerna fixerades i kabelrännorna med smältlim. Invändiga stålytor behandlades med ett rostskyddande färglager.

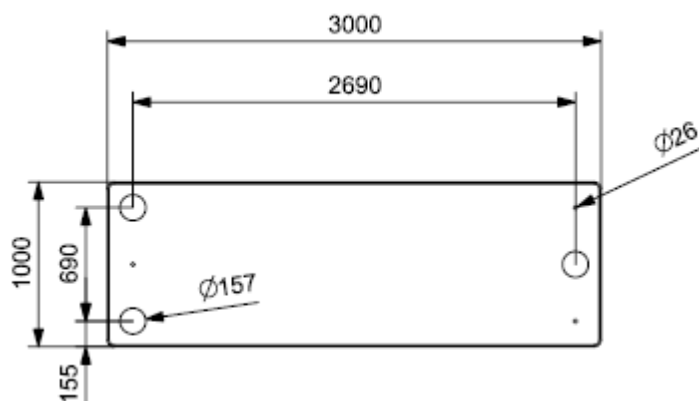
Förspänningen gick till så att varje skruvförband smörjdes och försågs med fjäderbrickor. Åtdragningen gjordes manuellt med momentdragare samtidigt som lastcellernas registrering kunde avläsas på en monitor. De i locket nedsänkta skruvförbanden tätades med smörjfett och ett plåtskydd. Kabelgenomföringen längst upp på lastpanelens bottenplatta tätades med ett marint tätningsmedel.



Figur 4-1. Konstruktionsritning på lastpanelen.

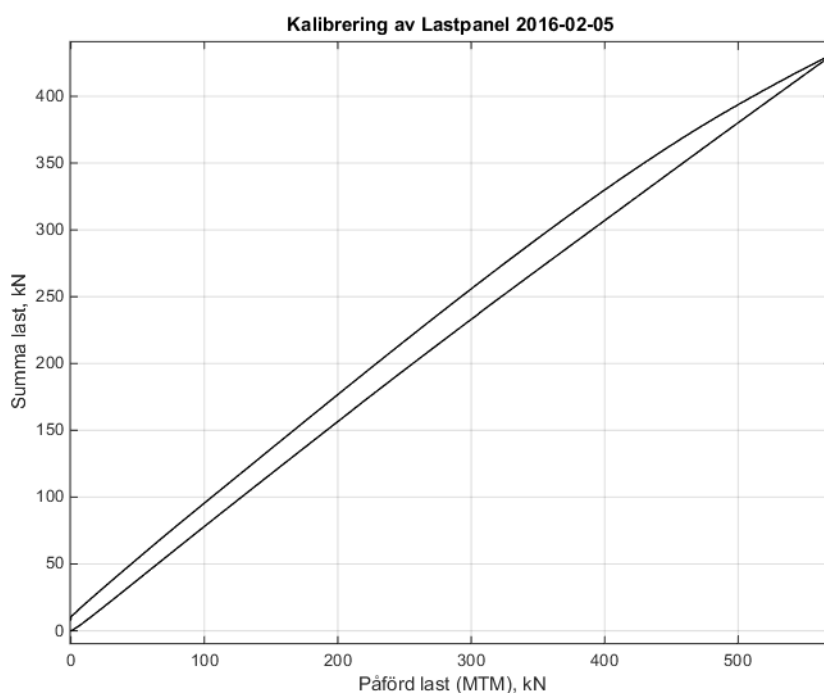
4.4 KALIBRERING

De tre lastcellerna med typbeteckningen HBM (50t, C2) kalibrerades vid LTUs labb och visade sig var linjära mot pålagd last upp till 500 kN. För att öka precisionen har de uppmätta individuella kalibreringsvärdena använts som indata i mätprogrammet Catman. Lastcellerna uppges, av tillverkaren, tåla en last på det dubbla (1 MN) utan att skadas. Lastcellernas och förspänningsskruvarnas exakta placering i lastpanelen framgår av Figur 4-2.



Figur 4-2. Planskiss över lastpanelens lock med plats för de tre lastcellerna. Mått i mm.

Efter att lastcellerna monterats och förspänts i lastpanelen utfördes en kalibrering med panelen liggande horisontellt. Lasten påfördes med en servohydraulisk domkraft (MTM) på mitten och rakt över respektive lastcell. Tätningen runt om tog upp en viss del av den pålagda kraften så att summan av uppmätt kraft var något lägre än den pålagda. Lastpanelen visade sig vara relativt linjär mot pålagd last upp till 800 kN. Upp till 500 kN visar kalibreringen att den pålagda lasten oavsett position kan beräknas som summan av lastcellernas registrering multiplicerad med en korrektionsfaktor på 1,25. Resultatet av kalibreringen visas i Figur 4-3.



Figur 4-3. Kalibrering av lastpanelen liggande horisontellt. Summa last i figuren är minskad med förspänningskraften som var ca 300 kN. Påförd last (MTM) var vertikal och angreppspunkten var centralt placerad 1,5 m från panelens övre kant. Islasten mot panelen föreslås kunna beräknas som registrerad summalast multiplicerad med 1,25.

5 Planering av mätprogram

5.1 VAL AV ANLÄGGNING

Islasternas storlek och verkan mot en dammkropp är inte bara beroende på geografisk placering i landet (köldmängd), utan en mängd olika lokala parametrar är också av stor betydelse. För att söka välja ut en lämplig anläggning där islasten anses vara någorlunda idealiserad mot dammkroppen och där man kan förväntas mäta istryck som är representativa för många anläggningar har ett antal urvalskriterier mejslats ut. Även parametrar som kopplar till det praktiska arbetet med att uppföra och underhålla pilotinstallationen har inkluderats. I det följande avsnittet redovisas ett antal parametrar som kan anses vara av värde för valet av anläggning. De som primärt beaktats är:

- Geografisk placering
- Reservoarens utformning och amplitud
- Dammanläggningens geometri och konfiguration
 - × Dammtyp
 - × Möjligt maximalt avstånd till utskovsluckor och intag
 - × Isoleringsvägg på dammkroppen (nedströms) & uppvärmning av dammens innerutrymmen
- Instrumenteringsnivå
- Ev. övriga parametrar

5.1.1 Geografisk placering

För att säkerställa ett bra underlag för bedömningen av islastnivåer valdes en anläggning i norra Sverige. Anläggningens placering valdes för att säkerställa isläggning och att ett istryck säkert uppstår varje vinter. Enligt RIDAS rekommenderas att använda ett istryck om 200 kN/m för anläggningar norr om en linje mellan Stockholm och Karlstad. Anläggningen borde därför lämpligen befinna sig i detta område för att mäta så höga islaster som möjligt.

Luleå Tekniska Universitet har varit huvudman för framtagandet av en testpanel och all nödvändig kringutrustning som krävdes för att mäta islasterna på en anläggning under minst en vintersäsong. (se avsnitt 4). Avståndet till installationen har därför också beaktats, men eftersom endast ett fåtal resor förväntades så fick det underordnad betydelse. När installationen väl var på plats förväntades att all övervakning och överföring av mätdata kunde ske på distans genom ett GSM-modem. I slutänden visade sig systemet vara något instabilt i start- och stoppfasen och därför valdes att resa till anläggningen för att hämta mätdata vid ett par tillfällen.

5.1.2 Reservoaren

För att minimera inverkan av ränder på magasinet önskades en anläggning med en relativt lång damm och lång reservoar (stryklängd). Syftet med det var då att undvika effekter av ispressning mot stränder som kunde ge ytterligare förhöjda istryck.

För att begränsa islastpanelens utsträckning i höjddled önskades en anläggning med och liten amplitud mellan dämpnings- och sänkningsgräns (helst mindre än 1 m) och liten normalvariation i uppströms vattenstånd. En så jämn magasinsyta som möjligt minskar även risken för inverkan av att isen bryts av och istället ger ett så konstant, horisontellt istryck som möjligt.

5.1.3 Dammanläggningens geometri och konfiguration

En vertikal uppströmssida i höjd med isläggingsnivå önskades, så att istrycket skulle verka vinkelrätt mot dammen och lastpanelen.

Avståndet till luckor önskades vara så stort att inte uppvärmning i luckorna eller ev. isfrihållning påverkade islasten mot dammen. På samma sätt minskades risken för inverkan från vaktbildning p.g.a. närhet till intag eller utskov med risk för vinterspill. Det skulle kunna riskera ett tunnare istäcke och lägre uppmätt islast än magasinets maximalt möjliga islast. För att sätta ett kriterium ansattes att vald monolit borde vara minst 50 m från intag och 20 m från utskov (om vinterspill kan förväntas).

I vissa anläggningar där inomhusluft från maskinsalen ventileras ut i inspektionsutrymmet under dammen kan det förväntas att höga temperaturer kan uppstå och därför även ge en påverkan på isen (och därigenom istrycket) närmast frontplattan. En anläggning utan kraftig uppvärmning av innerutrymmet eftersträvades därför (max. 5°C i inspektionsutrymmet vintertid).

5.1.4 Befintlig instrumenteringsnivå

Att mäta islastens storlek och påverkan på dammkroppen underlättas om dammen har en hög instrumenteringsnivå. Önskvärt var därför att välja en damm med t.ex. direkta pendlar installerade för att kunna mäta dammens ev. krönrörelser samt sprickviddsmätare för bedömning av ev. förändringar av sprickvidden under påverkan av islast. För förenklad korrigering av temperaturrörelser i betong och damm önskades även mätningar av temperatur i såväl luft (inne/ute), vatten (reservoaren) och i själva betongen.

5.1.5 Övriga parametrar

Tillgängligheten till den tilltänkta placeringen av testpanelen önskades vara så god att montage med kranbil/mobilkran och övriga besök vid utrustningen skulle bli enkelt. Helst ett uppvärmt utrymme med strömförsörjning för att placera mätutrustning i och GSM-täckning för överföring av data.

5.1.6 Anläggningsval

I tabellen nedan redovisas de anläggningar som studerades som potentiella för att husera pilotinstallationen. Identifierade fakta kring anläggningarna har sammanställts i tabellen eller skattats utifrån tillgängliga data på internet.

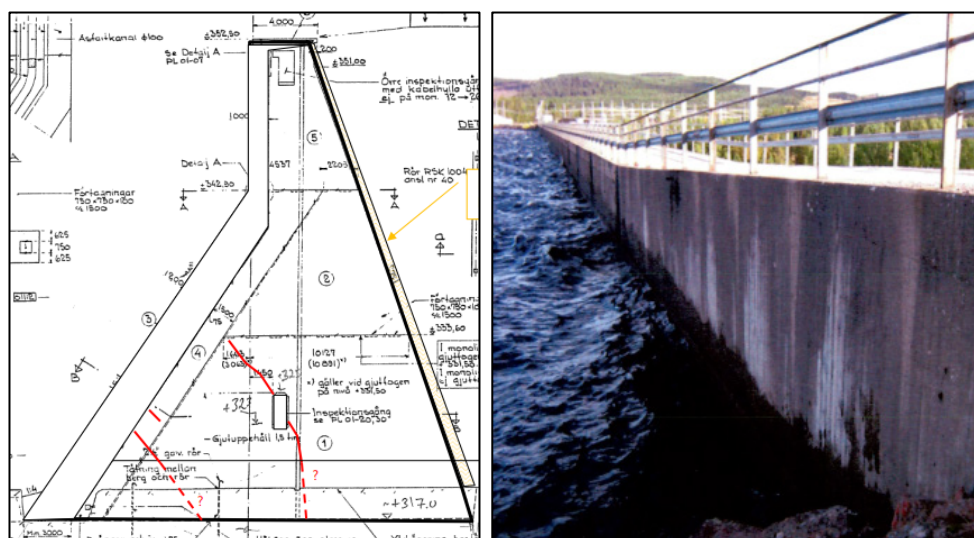
Tabell 5-1 – Anläggningsdata för potentiella kandidater för installation av prototypgivare.

Anläggning	Älv	Dammtyp	Höjd	Amplitud i reservoar (m)	Instr.	Max.avstånd till luckor (m)	Max.avstånd till intag (m)	Isolering nedströms	Uppvärmning i damm	Kommentar
Bålforsen	Umeälven	Lamell (kort klumpd, vä)	30	1.0	Pendel, sprickgivare, temp	148	360	Ja	Ja, mycket	Lutande frontplatta
Rätan	Ljungan	Lamell	28	0.5	Pendel, sprickgivare, temp	135	250	Ja	Nej	Rörelser beräknade
Laxede	Luleälven	Lamell	24	1.5	Porttrycksgiv.	23	90	Nej	?	Kort ansl.damm, vinterspill!?
Stornorrfor	Umeälven	Lamell	25	1.5	Ingen	ca 100	-	Ja	Nej	Ingen instr.
Tuggen	Umeälven	Lamell	26	1.5	Ingen	ca 100	ca 140	Betongvägg	?	Ingen instr.
Krångfors	Skellefte-älven	Ambursen	33	1.0	Sprickvidd, porttryck	20	74	Betongvägg	Ja	Komplicerad geometri
Storfinnforsen	Faxälven	Lamell	40	0.5	Ingen	>250	>500	Ja	Nej	Instr. delvis borta för tillfället
Ramsele	Faxälven	Lamell	40	0.5	Ingen	>200	ca 300	Ja	Nej	Instr. delvis borta för tillfället

Den dammen som vid närmare betraktelse visade sig ha bäst förutsättningar med avseende på alla urvalsparametrar är Rätan i Ljungan. Tyvärr är avståndet till Luleå Tekniska Universitet långt, men eftersom antalet resor till anläggningen förväntades bli få efter att panelerna monterats bedömdes det inte ha en avgörande betydelse. Istället värderades de andra grundläggande parametrarna högre. De viktigaste parametrarna som liten reservoaramplitud, bra instrumenteringsnivå och en bra geometri (vinkelrät frontplatta i läget för istrycket) är uppfyllda för anläggningen. I tillägg till detta har även numeriska beräkningar av dammrörelser genomförts tidigare, vilket utgör ett bra underlag för tolkningar av istryckets inverkan och bakåträkning vilket redovisas i avsnitt 8.

5.2 BESKRIVNING AV RÄTANS DAMMANLÄGGNING

I figur 5-1 nedan visas en tvärsektion över dammkroppen och en bild över uppströms-sidan av anläggningen. Dammen är en traditionell svensk lamelldamm uppförd 1968. Sedan 2011 har dammen försetts med en isolerande klimatvägg på nedströmssidan för att minska temperaturrörelserna som uppstår p.g.a. skillnaderna mellan sommar- och vinterklimatet. Propageringen av de existerande sprickorna (tysprickor visade i figur 5-1, vänster) förväntas bli mycket lägre efter installationen. Klimatväggen förväntades också underlätta utvärderingen av islasternas inverkan på dammens rörelser.

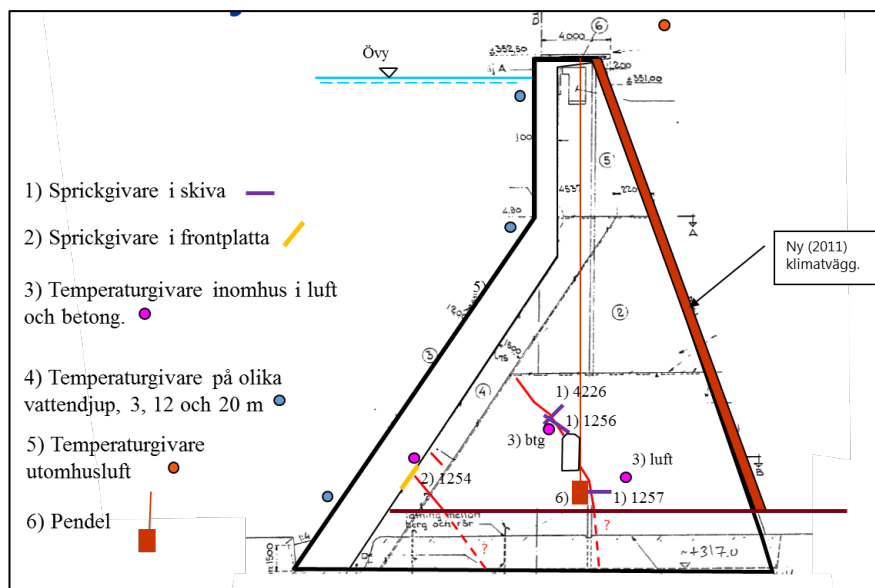


Figur 5-1 Rätans dammanläggning. Tvärsektion lamelldamm (vä). Vertikal uppströmssida (hö). Från Ekström (2009)

Dammanläggningen i Rätan är relativt välinstrumenterad med följande mätningar installerade:

- pendelmätning av krönrörelser från brobanans underkant,
- sprickviddsgivare (frontplatta/stödskena)
- temperaturmätning i luft (inspektionsgång/utomhus) och betong (frontplatta/stödskena)
- temperaturmätning i vatten (på olika djup).

I Figur 5-2 visas hur monolit nr. 15 är instrumenterad och i Figur 5-3 en översigtsbild från nedströms om anläggningen.



Figur 5-2 Rätans dammanläggning. Instrumentering M15. Från Ekström (2009).



Figur 5-3 Översiktsbild av Rätans dammanläggning från nedströmssidan. Foto: Martin Rosenqvist.

6 Installation av lastpanel

6.1 FÖRBEREDELSE

Lastpanelen transporterades med kranbil från Luleå till Rätans kraftverksdamm. För att installationen enkelt och snabbt skulle kunna göras med kranbilen stående på dammen krävdes vissa förberedelser. Först drogs elektrisk ström till mätplatsen via en ca 50 meter lång gummikabel som anslöts till dammens befintliga elnät. Därefter monterades fästen för lyftkättingar som skulle fungera som permanent upphängning även efter det att lastpanelen hade fixerats mot betongväggen. Fästena bestod av två stålplattor med vardera 4 st M16 expanderbultar (Fig 5-1). Lyftkättingen var typgodkänd för 10 ton. Eftersom det redan fanns ca 80 cm tjock is där panelen skulle placeras sågades en vak upp på ca 1,2 m x 0,3 m. (Fig 5-2). Trots ett envetet arbete med att rensa betongen från fastfrusen is fanns det uppskattningsvis 3-4 cm is kvar mellan panelen och betongen vid installationen.



Figur 6-1. Fäste för lyftkätting.



Figur 6-2. Uppsågning av isvak.

6.2 INSTALLATION

Lastpanelen monterades mot Rätans damm 2016-02-25. Kranbilens lyftkätting kopplades i de två mittersta öglorna och de förberedda kättingarna som var fixerade på dammkrönet kopplades i de yttre öglorna. När panelen hade säkrats med två M20 expanderbultar lossades kranbilens lyftanordning. Därefter fästes panelen med ytterligare två M20 expanderbultar. Glappet mellan lastpanel och fast is fylldes med iskross och vatten.

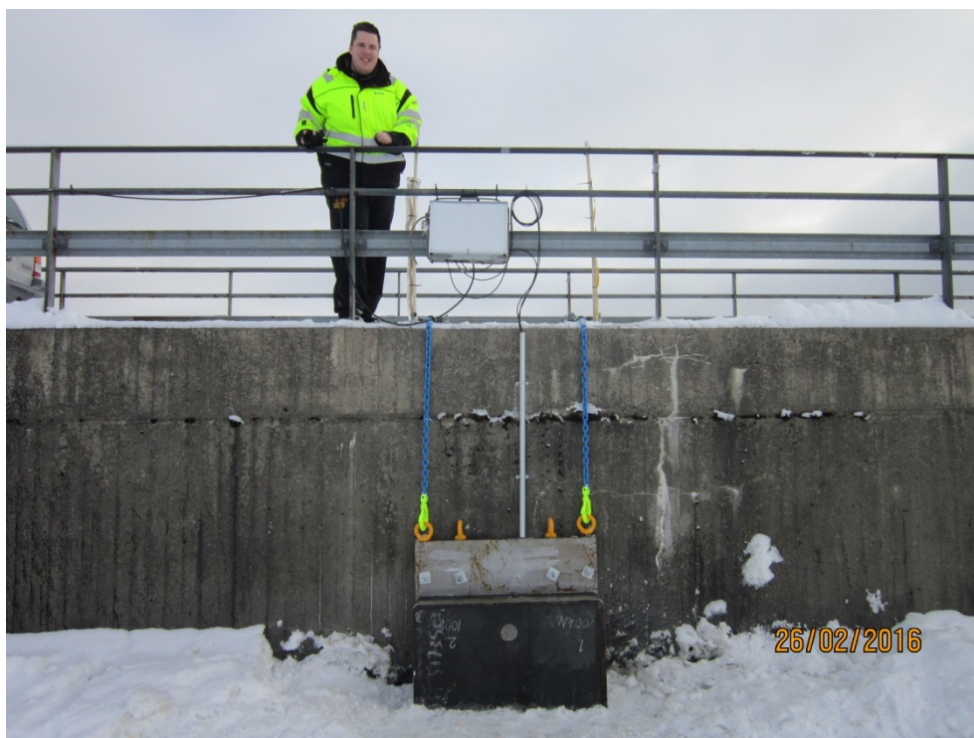


Figur 6-3. Lyft av lastpanel med kranbil.

Tre mätkablar med färdiga kontakter kopplades till en mätförstärkare (Spider8) och vidare till en Dell laptop. Mätprogrammet (Catman) användes för långtidsmätning med registrering var 5:e minut. Laptop och förstärkare placerades i en isolerad låda rakt ovanför lastpanelen (Fig 6-4). Värmeförlusterna från dator och batteriladdare bedömdes räcka till för att säkerställa funktionen hos hårddisk, mm. Lastmätningen avbröts tillfälligt efterföljande dag för kontroll och startades på nytt. Den färdiga installationen ses tillsammans med Rikard i Figur 6-5.



Figur 6-4. Laptop och förstärkare i väderskyddad låda.



Figur 6-5. Lastpanelen och Rikard Hellgren dagen efter installationen vid Rätans damm.

Lastpanelen hamnade med de övre lastcellerna ca 0,5 m över isytan. Vattenståndet var då vid installationen +350,08 m. Lastcell nr 1 (HBM_1) ses till höger i Figur 6-5 och lastcell nr 2 (HBM_2) till vänster. Lastcell nr 3 (HBM_3) finns centralt ca 2,2 m under isytan.

6.3 DATAINSAMLING

6.3.1 Nollvärdesavläsning

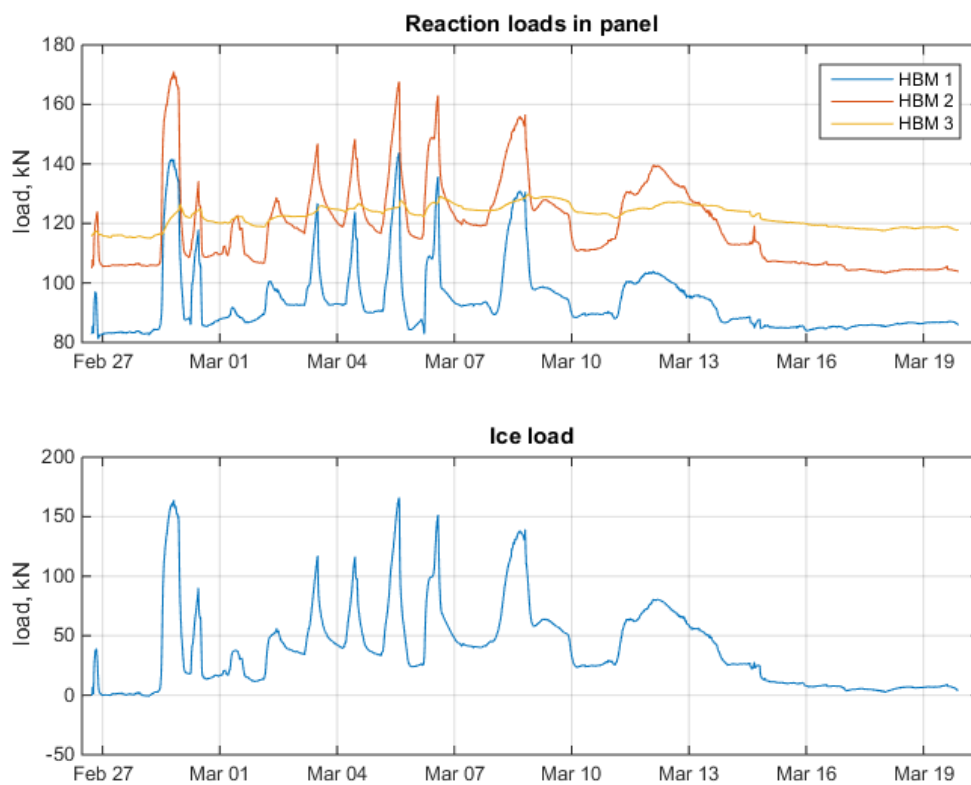
Kort efter installationen registrerades lastcellernas nollvärden, d.v.s. de mätvärden som motsvarade reaktionskrafterna då panelen var i obelastat tillstånd. Dessa värden jämfördes sedan med vad som registrerades i slutet av juli 2016. Lastsumman var avrundat lika med 304 kN då mätningen påbörjades och 308 kN efter mätsäsongen var avslutad. Utdrag från mätfilerna visas i Tabell 6-1.

Tabell 6-1. Nollvärdesavläsningar före och efter islastmätningarna 2016.

Time	HBM_1	HBM_2	HBM_3
hh:mm:ss	kN	kN	kN
2016-02-25			
17:02:45	81.09763	106.1864	116.5549
17:02:55	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:05	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:15	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:25	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:35	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:45	81.09763	106.1864	116.5549
17:03:55	81.09763	106.1864	116.5549
17:04:05	81.09763	106.1864	116.5549
17:04:15	81.09763	106.1864	116.5549
17:04:25	81.44757	106.2449	116.5549
17:04:35	81.09763	106.1864	116.5549
17:04:45	81.09763	106.1864	116.5549
17:04:55	81.09763	106.1864	116.5549
2016-07-28			
23:07	86.78409	103.4674	117.2836
23:13	86.81325	103.5259	117.3127
23:18	86.87157	103.5551	117.3419
23:22	86.84241	103.5259	117.3419

6.3.2 Mätning av islaster

Med början 2016-02-26, kl 11:16 mättes reaktionskrafterna i lastpanelen inklusive förspänningskrafterna. Islasten har här beräknats genom att subtrahera lastcellernas nollvärden, summera och multiplicera med kalibreringsfaktorn som var 1,25. Rådata och beräknad islast visas i Figur 6-6 för resterande del av issäsongen 2016.

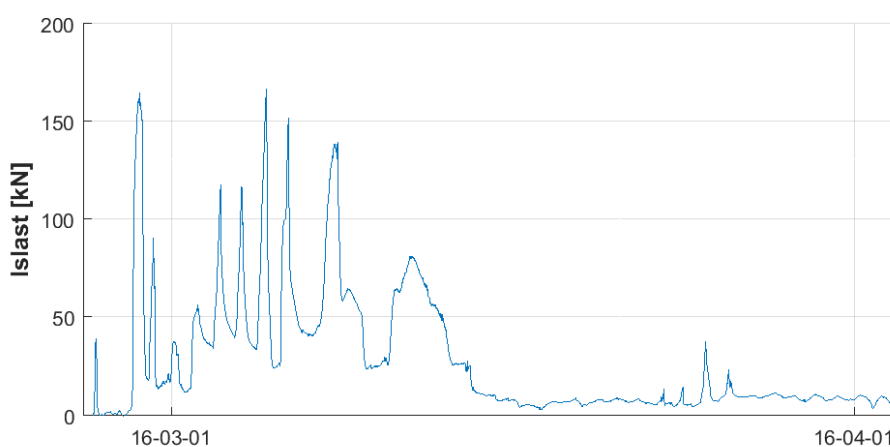


Figur 6-6. Reaktionskrafter i lastpanelen och beräknad islast vid Rätans damm under issäsongen 2016.

7 Utvärdering av mätdata

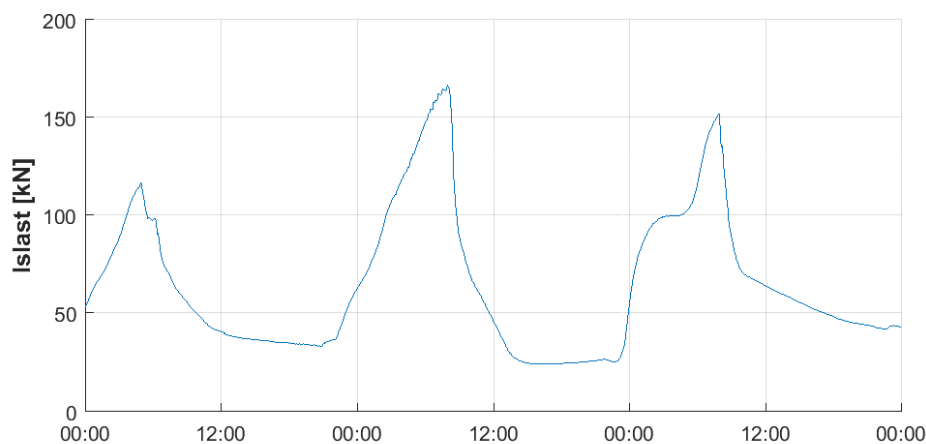
7.1 VINTERN 2016

Panelen installerades vid Rätan den 26:e februari 2016, vid panelens installation uppmättes en istjocklek om 80 cm. I samband med installationen återfylldes det hål som sågats ut med vatten. Det innebär att återfrysning påbörjades på kvällen den 26:e februari. Mätningar finns tillgängliga från och med den dagen och fram till i juli, då loggern kopplades bort och tömdes. Figur 7-1 visar panelens värden från lastpanelens installation fram till början på juni.



Figur 7-1 Mätningar under vårvintern 2016 efter att panelen installeras.

Anmärkningsvärt höga islaster har uppmätts med toppvärden strax under 170 kN. Dessa toppar är relativt kortvariga med varaktighet under en till två timmar. Dessa höga toppar förekommer enbart under de första två veckorna och därefter är det uppmätta trycket konstant lågt med enskilda kortvariga spikar. Efter de första två veckorna uppmäts inte en högre last mot panelen än 30 kN. Figur 7-2 visas mätresultat under de tre dygn då högst tryck mot panelen registrerats. Trycket mot panelen ökar från strax innan midnatt och byggs sedan upp så att maxvärdet för de tre topparna sker på efterföljande morgon. Trycket avtar därefter och avtar fram till klockan 12:00.



Figur 7-2 Mätningar under perioden 2016-03-04-2016-03-07.

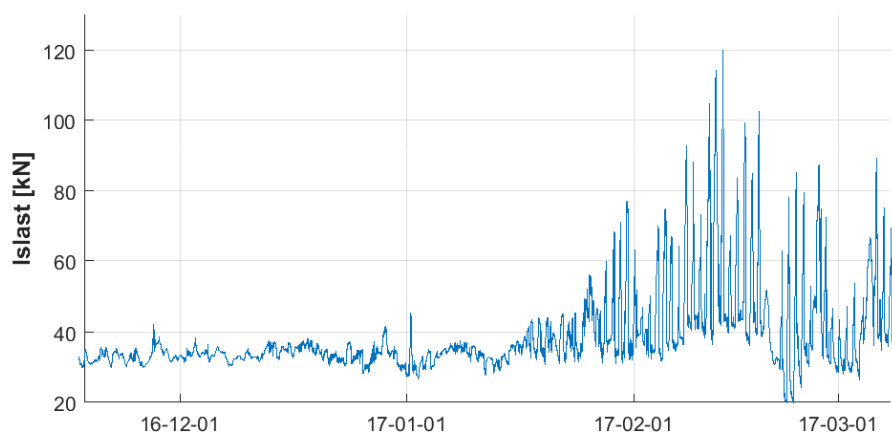
Detta beteende skulle kunna vara orsakat av dygnsregleringen, alternativt orsakat av störningar från montaget av givaren. Det är därmed svårt att avgöra om den första perioden är representativ och att de efterföljande låga nivåerna beror på vårens ankomst och bortsmältning av is, eller om de stora variationerna i den första perioden beror på den störning det innebär att såga ut isen för att göra plats för panelen.

7.2 VINTERN 2017

Panelen lämnades monterad på dammen över sommaren och var på så sätt vid isläggningen och genom infrysningen. Loggern kopplades in i november och trycket mot panelen registrerades under resterande vinter.

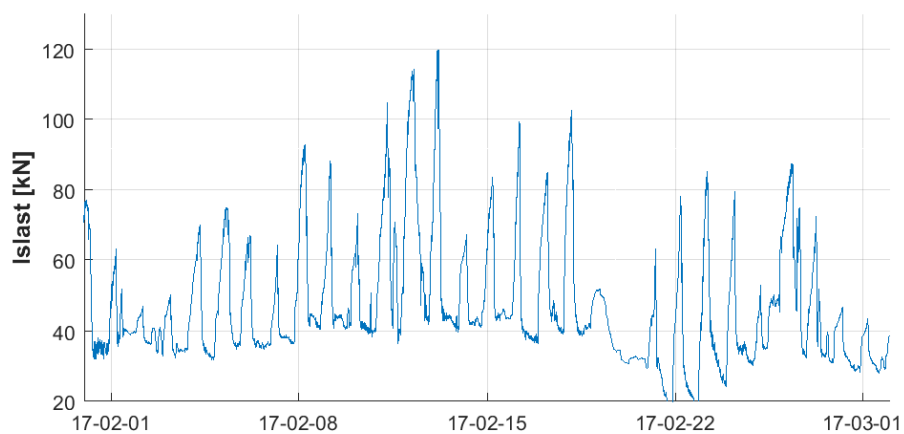
7.2.1 Mätningar

Figur 7-3 till 5 visar mätvärden från vintern 16/17 i tre olika upplösningar. Figur 7-3 visar hela vintern, Figur 4 visar resultat under februari och Figur 5 visar de tre dygn då de högsta värdena registrerats. Fram till slutet på januari är trycket mot panelen relativt konstant med variationer mellan 30 och 40 kN. Därefter sker dygnskykler med gradvis stegrande toppar. Toppvärden nås i mitten av februari med en uppmätt last om ca 120 kN.



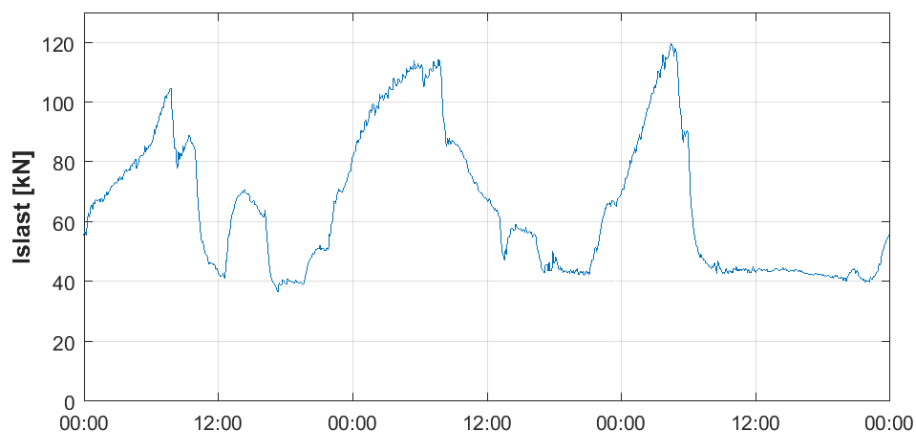
Figur 7-3 Registrerade mätvärden under vintern 16/17.

Februari innehåller dagliga toppar där intradygnvariationen är över 40 kN. Cyklerna karakteriseras av en hastig lasttillväxt där ökningen av trycket mot panelen sker under några timmar. Detta följs av en ännu hastigare avlastning där kraften avtar i princip momentant.



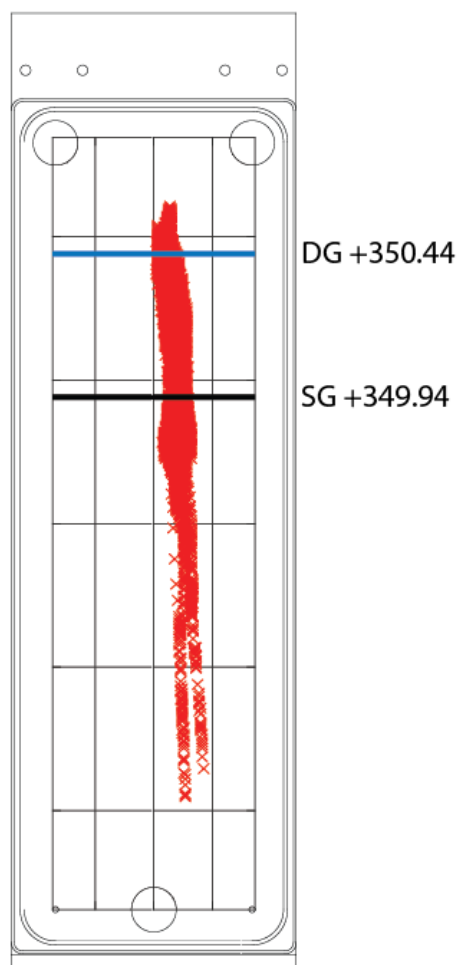
Figur 7-4 Mätvärden från februari 2017.

Över dygns cyklerna sker uppbyggnaden av istryck på samma sätt som för mätningarna under våren 2016. Trycket mot panelen ökar under kvällen och natten för att nå maxvärden på morgonen, därefter avtar trycket hastigt.



Figur 7-5 Mätningar under perioden 2017-02-11-2016-02-14.

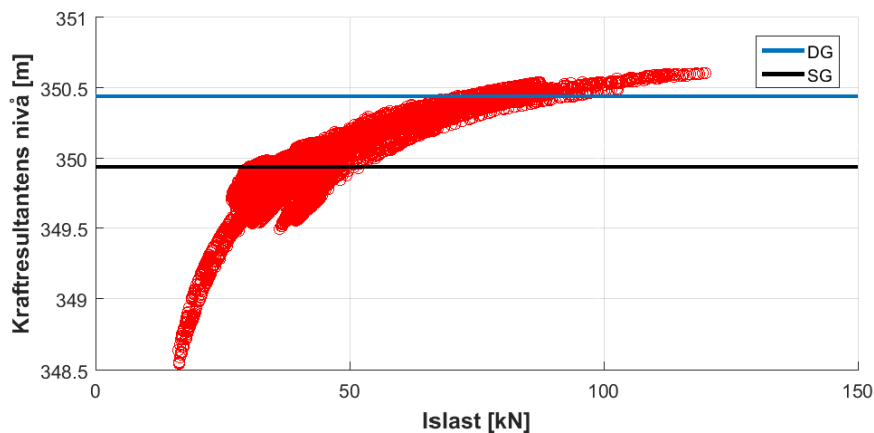
Islastens angreppspunkt har beräknats utifrån registrerade krafterna i de tre lastcellerna. Figur 7-6 visar lastresultantens angreppspunkter under vintern 2017 och Figur 7-7 visar hur angreppspunkten varierar i höjdlängd under tidsperioden. Lastpanelens höjd är 3 m och bredd 1 m enligt Figur 4-1. Majoriteten av resultaten är inom det område som vattenytan varierar på men noterbart är att angreppspunkten varierar nästan två meter i höjdlängd mellan högsta och lägsta värdet.



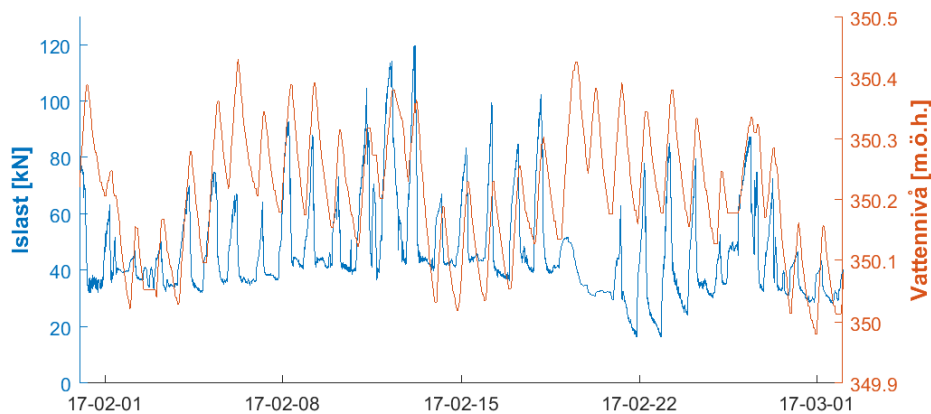
Figur 7-6 Lastens angreppspunkt under vintern 2017. Panelens höjd är 3 m och bredd 1 m.

Angreppspunktens variation är starkt korrelerad med islastens storlek vilket visar att de stora lastökningarna registreras främst i de två övre lastcellerna. Att de högsta lasterna inträffar samtidigt som islasten når sin maximala hävarm är negativt ur dammsäkerhetssynpunkt med avseende på brottmoden stjälpning. Vid vissa av topparna är angreppspunkten till och med högre än dämmningsgränsen. Detta innebär att antagandet i RIDAS om att islastens resultant är placerad 33 cm under vattennivån är icke-konservativt jämfört med mätningarna.

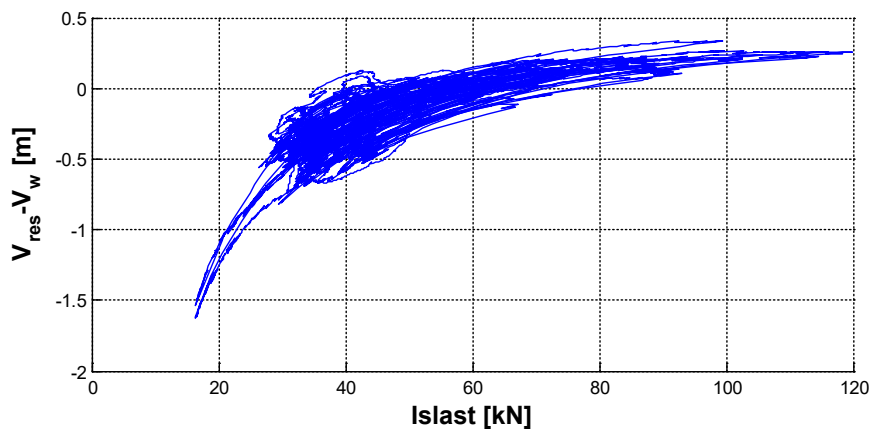
Dygnsvariationerna överensstämmer bra med vattenståndsvariationerna, vilket syns tydligt i Figur 7-8. Förändringen i islastens angreppspunkt överensstämmer bra med vattennivån i magasinet. Detta syns t.ex. i Figur 7-9 som illustrerar kraftresultantens läge i förhållande till vattennivån. Denna graf har nästintill samma form som Figur 7-7 vilket visar att islastens angreppspunkt följer med förändringarna i vattennivån. Intressant att notera i Figur 7-9 är att samtliga uppmätta islastvärden över 80 kN/m faktiskt ligger ovanför vattennivån. Det är endast vid relativt små islast (< 50 kN/m) som islasten är vid nivån 33 cm under vattennivå eller lägre.



Figur 7-7 Förhållande mellan uppmätt islast och läget för dess kraftresultant.



Figur 7-8 Variation i islast och variation i vattennivå.



Figur 7-9 Illustration av islastens tyngdpunktsläge i förhållande till vattennivån (positivt värde innebär att islasten angriper ovanför vattennivån)

7.2.2 Foton och observationer

Utöver mätningarna har även foton tagits av isen vid ett antal tidpunkter under vintern 16/17. Figur 7-10 visar foton tagna i mitten av februari, strax efter att de största värdena registrerats. Fotona visar en tydlig spricka utmed dammlinjen samt en trolig spricka ett antal meter ut från dammen där isytan ändrar lutning.



Figur 7-10 Spricka i istäcket som löper parallellt med dammlinjen. I fotot syns även att sprickan kröker runt lastpanelen. Foton tagna 2017-02-17

Vidare går det att se att isen runt lastpanelen skiljer sig från isen vid den övriga dammlinjen. Sprickan har en bågformad form runt panelen samt att en isansamling skett vid panelen. Dessa bågformade sprickor syns tydligare i Figur 7-11 som är tagna på vårvintern när snön och det översta istäcket smält. Även sprickan längre ut i magasinet syns tydligare på dessa bilder.



Figur 7-11 Spricka i istäcket som löper parallellt med dammlinjen. I fotot syns även att sprickan kröker runt lastpanelen Foton tagna 2017-03-29

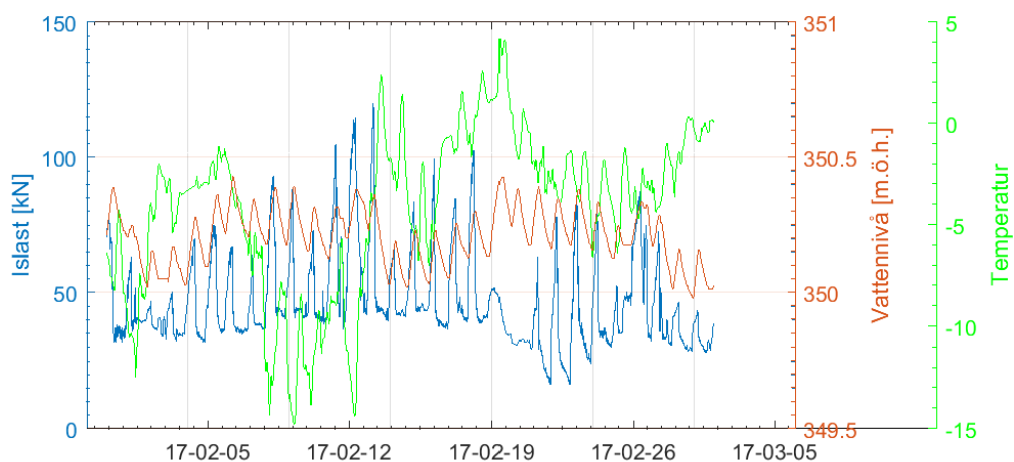
Utifrån dessa foton tagna vid panelen under vintern är det tydligt att panelen stör istäcket, isen vid panelen skiljer sig från den övriga isen utmed dammen. Om och hur mycket detta påverkar mätningarna går inte att avgöra. Det är möjligt att denna skillnad leder till att för låga värden mäts av panelen, då spänningar i isen kan föras via bågverkan runt isen till monoliten. Det är även möjligt att panelen mäter för höga laster, då utsticket gör att den delen bär mera last. Denna hypotes stärks av is-ansamlingen som tyder på att isen deformerats och krossats i större utsträckning vid panelen. Slutligen är det även möjligt att denna skillnad inte har någon påverkan då störningen är liten i förhållande till mätningens skala.

7.3 JÄMFÖRELSE MELLAN ISLAST OCH YTTRE FAKTORER

Som presenterat i tidigare kapitel kan islasten delas upp i två huvuddelar.

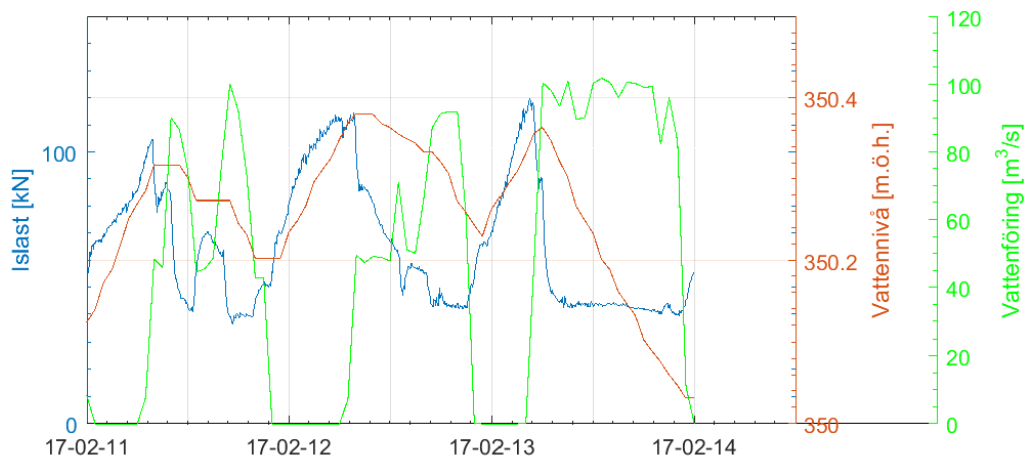
- Krafter från temperaturvariationer
- Krafter från vattenståndsvariationer

Dessutom kan krafter från vind och ström uppstå under speciella förhållanden. Figur 7-12 visar islasten under februari tillsammans med vattennivån i magasinet och utomhustemperaturen uppmätt vid dammen. Samtliga tre mätvärden varierar över dygnet där vattennivån är som högst under natten. De högsta topparna i mitten av februari registreras efter en kallare period. Utöver det är det svårt att se några tydliga trender eller samband. Vattenvariationen och islasten visar ett tydligt samband där islasten ökar då magasinsnivån ökar. Det förekommer dock dygn när samma vattenståndsvariation förekommer utan att islasten ökar.



Figur 7-12 Jämförelse av islast, vattennivå och temperatur.

Sambandet mellan vattennivå, maskinvattenföring och islast presenteras mer detaljerat i Figur 7-13. Här syns sambandet mellan islastens ökning och vattenståndsvariationen tydligare. Intressant är dock att islasten avtar innan vattennivån börjar sjunka. Och islastens verkar snarare börja avta när kraftverket startas. Detta indikerar att det krävs väldigt liten vattennivåminskning eller väldigt lite strömmande vatten för att istrycket ska avta.



Figur 7-13 Jämförelse av islast, vattennivå och vattenföring.

7.3.1 Statistisk utvärdering

För att se inverkan av dessa parametrar har regressionsanalyser genomförts. De mätningar som finns vid dammen har omtolkats för att passa in i teorin. Lastpanelens resultat har modellerats utifrån de faktorer som presenteras i Tabell 7-1. I ett första steg har korrelationen mellan de uppmätta krafterna och de yttre faktorerna kontrollerats en och en. Dessa analyser ger en fingervisning kring vilka faktorer som påverkat resultatet från mätningarna, men det är viktigt att påpeka att en korrelation inte automatiskt innebär ett samband.

Tabell 7-1 Studerade variabler

Egenskap		Enhet	Förklaring
Utetemperatur	T	°C	Utomhustemperatur uppmätt vid dammen.
Temperaturförändring	$\Delta T_{1 \text{ timme}}$ $\Delta T_{12 \text{ timmar}}$	°C	Förändringen i dygnsmedeltemperatur över en respektive sex timmar.
Magasinnivå	H	m	Magasinvattennivån mätt i meter över havet
Magasinnivåförändring	ΔH	m	Förändringen i magasinnivå över ett dygn
Vattenflöde	Q	m ³ /s	Mätt som det totala flödet genom generatorer och utskov.

För att modellera lastpanelen har en linjär regression genomförts där målet är att beskriva Islastens variation utifrån de enskilda variablerna. Varje faktor har modellerats som linjärt beroende $y_t = \beta X_t + m$, där X är den aktuella variabeln, k är en koefficient som anger förändringen i islast vid en enhetsförändring av textvariabeln och m är den konstant som ger bäst överensstämmelse. Tabell 7-2 visar koefficient, konstant, determinationskoefficient (R^2), korrelationstal (r) och p-värde.

Tabell 7-2 Resultat från regressionerna.

Variabel	Koefficient	Konstant	R^2	R	P
T	-0.92	37.3	0.09	-0.30	<10 ⁻⁹ ***
$\Delta T_{1 \text{ timme}}$	0.15	40.8	<0.01	0.01	0.75
$\Delta T_{12 \text{ timmar}}$	-0.93	40.8	0.05	-0.22	<10 ⁻⁹ ***
H	32.4	-11318	0.07	0.26	<10 ⁻⁹ ***
ΔH	346.49	40.8	0.29	0.54	<10 ⁻⁹ ***
Q	-0.13	47.9	0.21	-0.45	<10 ⁻⁹ ***

Samtliga variabler förutom temperaturförändring under en timme är signifikant förklarande variabler men samtliga variabler visar dock låg förklaringsgrad och låga korrelationstal¹. Detta är i linje med tidigare forskning som indikerar att istrycket inte avgörs av en enskild faktor utan av en kombination av faktorer. De faktorer som visar störst korrelation med istrycket är vattenföringen och magasinsnivåförändring. Dessa två faktorer är i princip samma då vattenföringen är det som påverkar magasinsnivån. Magasinnivåförändring och vattenflödet förklarar 29 % respektive 21 % av variansen i istrycket. Detta får anses som lågt, särskilt på ett dataset som är utvalt för att ge så hög korrelation som möjligt genom att data från november och december exkluderats.

¹ Det finns ingen fast tolkning av korrelationsgrad men en ungefärlig uppskattning kan göras från följande gränser: 0=ingen korrelation, $\pm 0,3$ =svag korrelation, $\pm 0,5$ =måttlig korrelation, $\pm 0,7$ =stark korrelation, 1,0 = perfekt korrelation.

8 Bakåtanalys av islastens storlek

Skaleffekter är ett problem som uppkommer vid mätning av islast.

Betongkonstruktioner i Svenska dammar är ofta mellan 3 och 8 m breda. Som presenterat tidigare i denna rapport är de flesta mätningar av islastens storlek av betydligt mindre storlek och det finns hypoteser om att det maximala istrycket avtar över en större sträcka. En möjlig metod för att undvika skaleffekter är att använda dammen som mätinstrument. Där betongdammars strukturella beteende så som krönrörelser, sprickvidder och töjningar mäts och övervakas finns möjligheten att utifrån dessa mätningar bakåtberäkna islastens storlek.

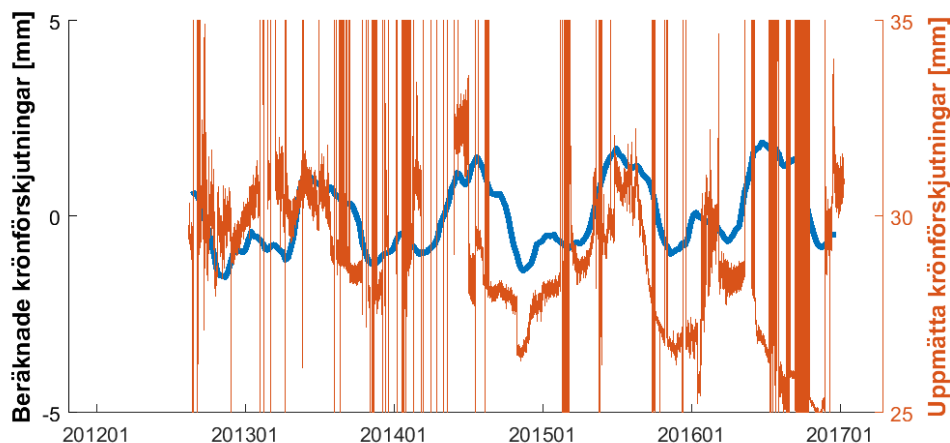
Johansson et.al (2014) presenterade en indirekt mätmetod för att mäta islastens storlek utifrån pendelmätning av dammonolit krönrörelse. Metoden går kortfattat ut på att jämföra dammätningar med simuleringar av dammens säsongsbeteende. Genom att simulera dammens respons när yttre faktorer så som temperaturer och vattennivå varierar kan ett förväntat beteende estimeras. Om modellen kan göras tillräckligt bra kan islasten urskiljas genom att jämföra de simulerade och uppmätta rörelserna. Islasten inkluderas inte i simuleringarna och skillnaden mellan simuleringen och mätningen skulle därför kunna bero på islasten. Särskilt troligt är detta om simuleringarna konstant underskattar dammens rörelse under vinterperioden. Utifrån beräkningar av dammens beteende vid en viss islast kan skillnaden mellan mätning och beräkning omräknas till en islast.

Inom ramen för detta projekt har försök till bakåtanalys av islasten vid den monolit vid Rätan där islastpanelen är fäst genomförts. Ett av urvalskriterierna vid val av dammanläggning var instrumenteringsgraden, se kapitel 5. Detta för att kunna jämföra den uppmätta islastens storlek med bakåtberäkningarna och målet med analysen är dels att testa metoden men även att kunna verifiera metoden mot lastpanelmätningarna. Ett problem med islastpanelen är att det i dagsläget inte går att validera att islastpanelens mätningar är representativa för hela dammbredden och att den uppmätta lasten de facto verkar på dammen. Genom att jämföra de två mätmetoderna är det möjligt att uppnå en konvergerande validitet där mätresultaten från de två metoderna överensstämmer. I så fall ökar tron på mätningarna från lastpanelens riktighet, men skulle även bekräfta möjligheten att använda bakåtanalys som en metod för att mäta/uppskatta islasten.

Beräkningsmodellen samt genomförda beräkningssteg finns presenterade i Bilaga 1.

De beräknade förskjutningarna jämförts med de uppmätta krönförskjutningarna i **Figur 8-1**. I figuren går det att se att pendelmätningen innehåller stora mängder brus och störningar. Det går möjligen att urskilja viss korrelation mellan mätning och simulering, men överlag är mätserien så störd att bakåtberäkning av islastens storlek är omöjlig. Dammen har en beräknad krönrörelse på 2-3 mm från sommar till vinter. Dessa rörelser stämmer väl överens med både mätningar och simuleringar från andra likartade dammar. Utöver de stora hopp och spikar som är tydligt urskiljbara i **Figur 8-1** innehåller även pendelmätningarna dygnsrörelser som är större än dammens förväntade årliga rörelser. Detta gör att det tyvärr inte går att genomföra bakåtanalys på pendelmätningen. Monoliten är även

instrumenterad med ett antal töjningsgivare som mäter sprickvidder och töjningar i betongen. Johansson et.al (2014) visade att sådan mätning inte har erforderlig mätnoggrannhet för bakåtanalyser, en slutsats som bekräftats i arbetet med denna studie. Fokus i detta kapitel ligger istället på att studera hur dammen beter sig vid de uppmätta islasterna, redovisa beräkningsmetodiken för bakåtanalys samt undersöka hur pass stora mätfel som kan tillåtas för att fortfarande kunna genomföra bakåtanalyser.

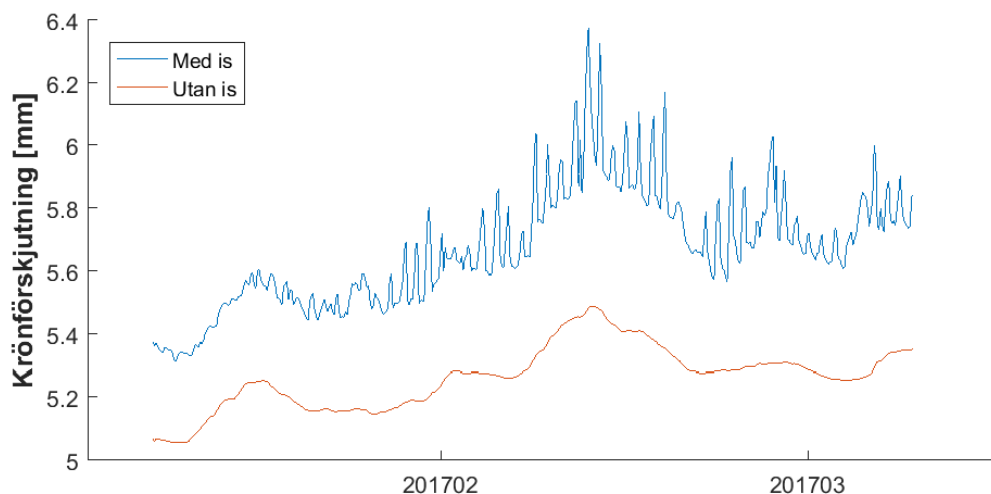


Figur 8-1. Pendelmätning jämfört med beräknade krönrörelser.

8.1 DAMMENS RESPONS TILL DE UPPMÄTTA ISLASTERNA.

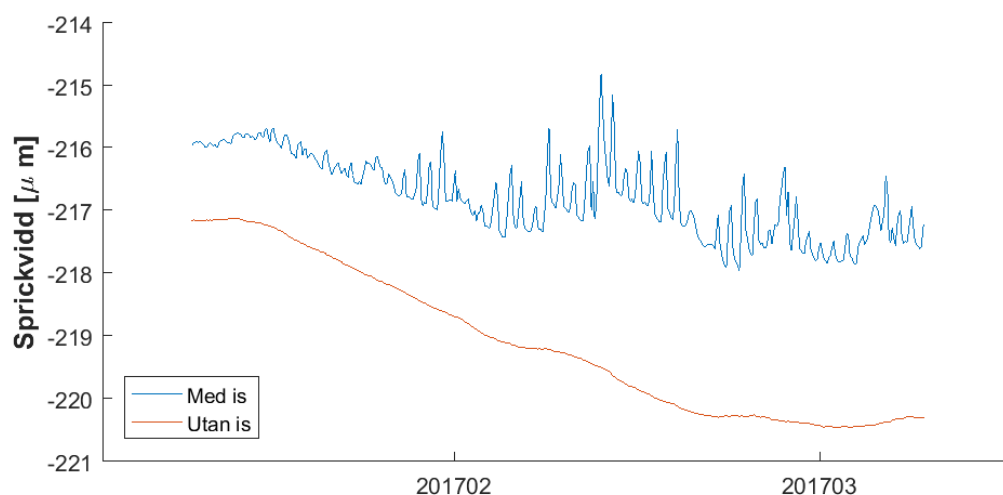
I ett första skede har jämförande beräkningar genomförts mellan en damm utsatt för islast och en som inte är utsatt för islast. Mätresultatet från islastpanelen har använts och antagits verka på hela monolitbredden. Då mätningarna från islastpanelen visar stora intradygnsvariationer har beräkningarna genomförts med korta beräkningssteg. Under perioden januari-mars 2017 har dammens respons beräknat i tretimmarssteg med temperaturer och islast som varierande yttre faktorer.

Figur 8-2 respektive Figur 8-3 visar simulerad krönrörelse och sprickvidd för modellen med och utan islast. För båda resultaten finns en tydlig skillnad mellan de två modellerna. För krönrörelsen gäller att modellen med istrycket inkluderat ger en allmänt större krönutböjning. I mitten av februari har dammkrönet som påverkas av islasten rört sig ca 1 mm mer nedströms än krönet utan islast. Jämfört med dammens totala årsvariationer på 2-3 mm är detta mycket. Även dygnsbeteende skiljer sig åt, där modellen med istryck visar tydliga dygnsvariationer korrelerade med istrycket. Vid de största istryckstopparna rör sig krönets ca 0,4 mm fram och tillbaka under ett dygn.



Figur 8-2 Krönrörelse från simulering med och utan islast.

Resultaten för sprickmätaren liknar de från pendeln och samma slutsatser som ovan gäller. Här är dock skillnaderna i storleken $1\text{ }\mu\text{m}$ och dessa skillnader är för små för att kunna utmätta i förhållande till mätfelet hos en traditionell sprickviddsmätare.



Figur 8-3 Sprickvidd motsvarande mätning med och utan applicerad islast.

I både pendelmätning och sprickmätning finns det i modellen med islast tydliga dygnsrörelser och om islasten av den uppmätta storleken är representativa för hela dammen bör dessa vara spårbara i en pendelmätning. Islastens dygnsvariation kräver dock att pendelns rörelser loggas minst var tredje timme, gärna oftare. På svenska dammar är denna typ av övervakning ovanlig och enligt vår kunskap finns det i dagsläget (Mars 2017) ingen damm utöver Rätan där detta görs. En möjlig väg framåt är ett internationellt samarbete där krönrörelser från andra länder med liknande klimat studeras. Det är då två frågeställningar som är intressanta:

1. Har man uppmätt rörelser under vinterhalvåret som liknar de blåa kurvorna i Figur 8-2 och Figur 8-3? Om beteendet överensstämmer med det beräknade kommer sådana dygnsrörelser endast mätas under vintern, förutsatt att magasinivån hålls relativt konstant under den isfria delen av året.
2. Går det att uppskatta islastens storlek utifrån pendelrörelsen och metoden presenterad i detta kapitel?

Fråga 1 ovan borde vara relativt enkel att undersöka medan fråga 2 kräver ett större samarbetsprojekt.

8.2 BAKÅTBERÄKNING AV ISLASTEN

Nedan redovisas principen för bakåtberäkning av islasten. Då pendelmätningen inte går att använda för detta används istället de två beräkningsmodellerna med och utan islast presenterade ovan. Sammanfattningsvis beräknas islastens storlek, I_t , vid tiden t som

$$I_t = k(m_t - b_t) \quad (8.1)$$

där m_t och b_t är uppmätt respektive beräknat värde vid tiden t och k är förhållandet mellan ökad islast och en förändring i det studera beteendet. Om det studerade beteendet är krönrörelse representeras m_t av pendelmätning och k har enheten N/m. Bakåtberäkning av islasten består alltså av följande tre steg förutsatt att mätningar av dammens beteenden finns tillgängligt.

- Beräkna faktorn k , dammens statiska respons vid ökad islast.
- Beräkna b , dammens säsongsrörelser utifrån temperatur och vattennivåvariationer.
- Bakåtberäkna islastens storlek utifrån skillnaden mellan mätning och beräkning.

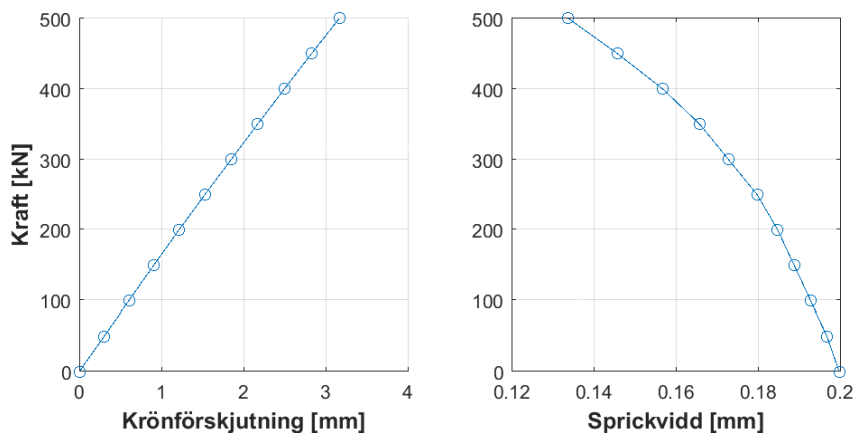
Vid en bakåtberäkning finns många potentiella felkällor och för att på ett korrekt sätt beräkna b och k krävs en beräkningsmodell som på ett korrekt sätt beskriver dammen. I tillhörande kapitel används två beräkningsmodeller varvid modellfel inte existerar. Vid jämförelse mellan en beräkning och mätningar finns det dock många potentiella felkällor och i praktiken kommer mycket arbete behöva genomföras med kalibrering och uppdatering av beräkningsmodellen.

Utifrån förutsättning att den blå linjen i Figur 8-2 motsvarar uppmätta krönrörelser m , presenteras nedan ett exempel på metodiken för bakåtberäkning av islasten.

8.2.1 Beräkna faktorn k , dammens statiska respons vid ökad islast.

I det första steget har monolitens statiska beteende vid ökad islast simulerats. I de statiska analyserna har först egentytngd och hydrostatiskt vattentryck applicerat på monoliten. Därefter har monolitens respons på ökad islast beräknats genom att islasten gradvis höjts från 0 till 500 kN. Islasten har applicerats som ett jämt fördelat tryck på den översta metern under vattennivån. Utifrån detta har förhållandet mellan dammkrönets rörelse och islastens storlek bestämts. Figur 8-4 visar hur krönförskjutningen hos monolit 21 ökar med ökad islast, förutsatt konstanta temperaturer och vattennivå. Sambandet är linjärt med lutning $k=114$. 6

(kN/m)/mm. Det betyder att en islast om 114,6 kN/m kommer trycka dammkrönet 1 mm i nedströmsriktningen.



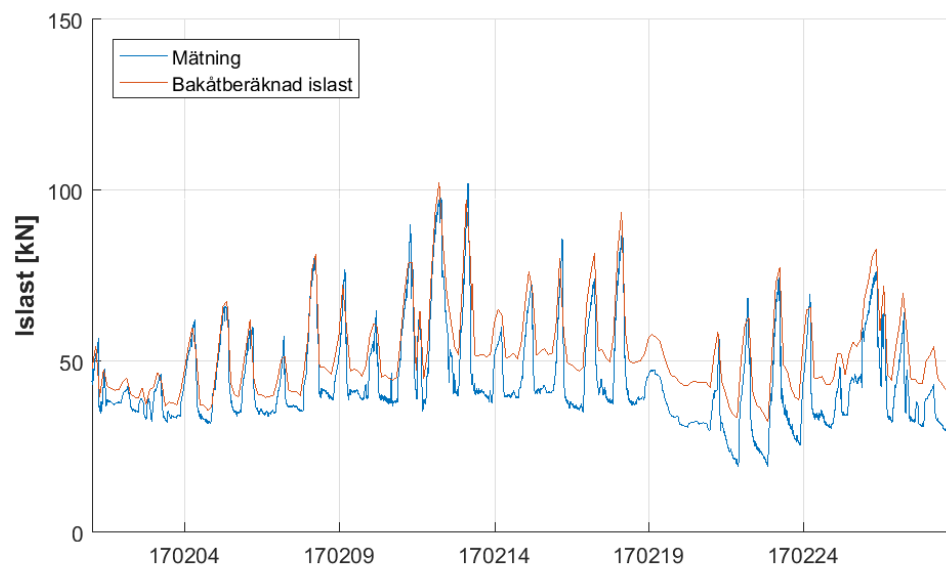
Figur 8-4. Förhållande mellan islast och krörförskjutning.

8.2.2 Beräkna b , dammens säsongsrörelser utifrån temperatur och vattennivåsvibrationer.

Därefter beräknas dammens förväntade rörelser utifrån variationer i temperaturer och vattennivåer. Islasten inkluderas inte i dessa beräkningar. Resultat från beräkningarna av dammkrönets rörelse finns presenterade ovan i Figur 8-2, där den röda linjen presenterar de beräknade värdena b .

8.2.3 Bakåtberäkna islastens storlek utifrån skillnaden mellan mätning och beräkning.

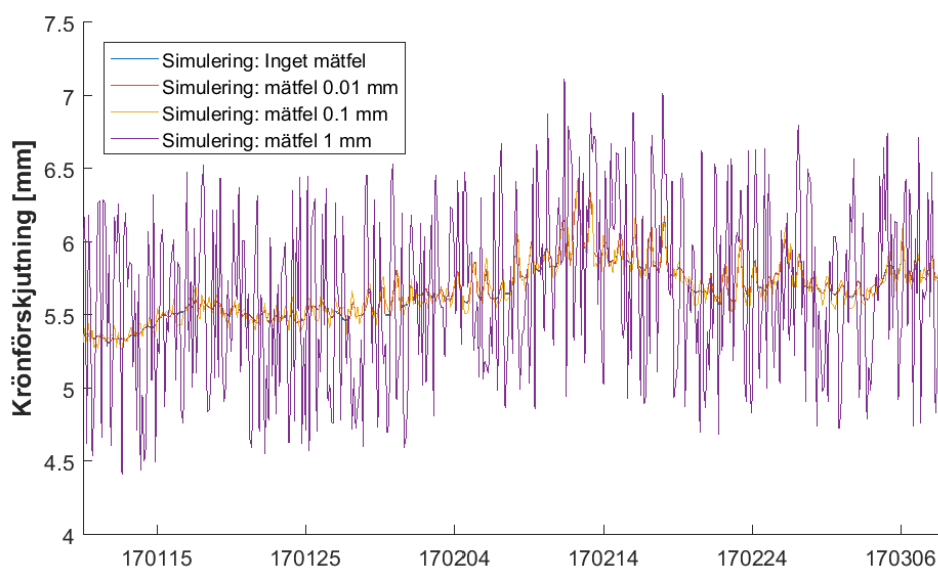
Utifrån ekvation 8.1 har sedan islastens storlek under beräknats.



Figur 8-5 Uppmätt och bakåtberäknad islast.

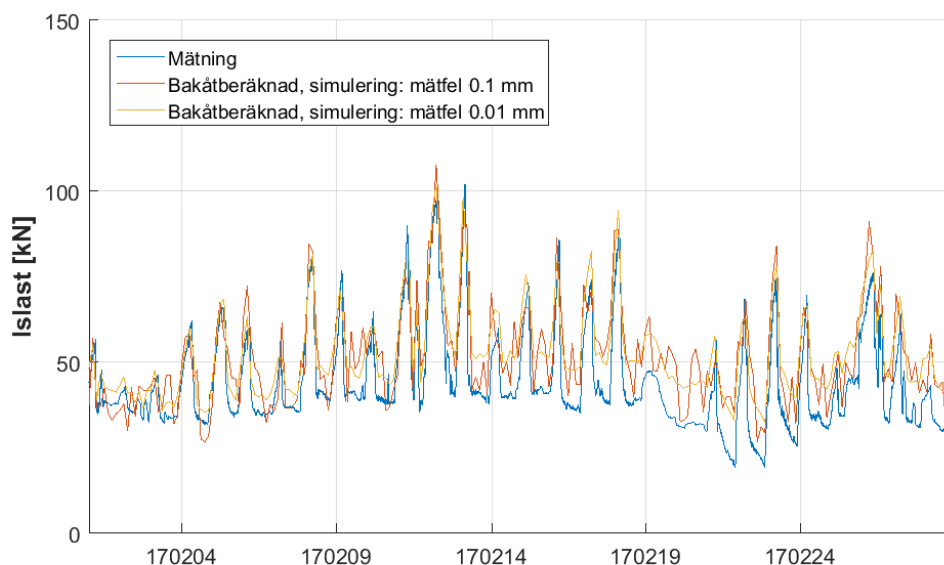
8.3 MÄTNOGRANNHET VID BAKÅTBERÄKNING

En potentiell felkälla vid bakåtberäkningar av islast är pendelns mätfel. För att studera mätfelets påverkan på bakåtberäkning av islasten utifrån pendelmätning har manipulationer på simuleringsresultaten från del 1 gjorts. Ett slumpvist mätfel har applicerats på resultaten från simuleringsmetoden där felet har slumpats fram för mätfelet ± 1 mm, ± 0.1 mm och ± 0.01 mm, se Figur 8-6. För mätfelet 1 mm är resultatet tydligt stört och med ett mätfel av den storleken går inte serien att använda för vidare analys. För mätfelet 0.1 mm är det en tydlig skillnad mellan den ostörda och störda serien medan det mindre ger serier som är i princip oskiljbara.



Figur 8-6. Simulering av mätfelets inverkan på krönförskjutningen.

Utifrån de störda serierna har en islast beräknats utifrån ekvation 8.1 med det k som beräknats i kapitel 8.2.1. Då mätfelet 1 mm ger en så pass tydlig störning har det exkluderats från vidare beräkningar. Figur 8-7 visar uppmätt istryck på panelen tillsammans med bakåtberäknad islast från de störda serierna.



Figur 8-7. Uppmätt islast jämfört med simulerad islast för olika nivå på mätfelet.

Överlag ger de störda serierna god överensstämmelse med den uppmätta islasten. För mätfelet 0.1 mm går det urskilja perioder där den beräknade islasten skiljer sig tydligt från den uppmätta. Bakåtberäkningen lyckas fånga de stora topparna och för en pendel med mätnoggrannheten ± 0.1 mm är mätfelet tillräckligt litet för att bakåtberäkning av islasten är möjligt. Om de istryck som mätts på panelen är representativa för hela dammbredden innebär det att dessa rörelser är urskiljningsbara i en pendelmätning som mäter med $\pm 0,1$ mm noggrannhet. Omräknat till sambandet för islast presenterat i del ett innebär det ett rent mätfel på 11 kN. Islastens designvärde för en damm med Rätans geografiska placering är 200 kN, vilket innebär att pendelns mätfel är av storleksordningen 6 %. Utöver detta tillkommer modellfel när en simuleringsmodell som ska återskapa dammens beteende används. I denna del används således perfekta förhållanden för bakåtberäkningar, då "mätningarna" och simuleringsmodellen är densamma.

8.4 MODELLFEL VID BAKÅTBERÄKNING

En ytterligare felkälla vid bakåtberäkning är beräkningsmodellens förmåga att korrekt beskriva dammens beteende. Bakåtberäkningarna kräver en modell som väl överensstämmer med dammens verkliga beteende. I två examensarbeten har betongdammars säsongsrörelser simulerats och jämförts med mätdata. Syftet med dessa projekt har varit att skapa modeller som kan användas för övervakning av dammarna där beräkningsresultat och mätningar jämförs. Utifrån deras arbete går det att få en uppskattning om modellnoggrannheten för en FEM-beräkning av svenska betongdamm. I båda arbetena har beräkningsmodellen uppdaterats flertalet gånger i syfte att skapa en modell som stämmer så bra överens med mätningarna som möjligt. Tabell 8-1 visar standardavvikelsen för skillnaden mellan beräkningar och mätningar tillsammans med beräknad rörelse mellan vinter och sommar.

Tabell 8-1. Skillnader mellan beräknad och uppmätt rörelse och standardavvikelse för denna

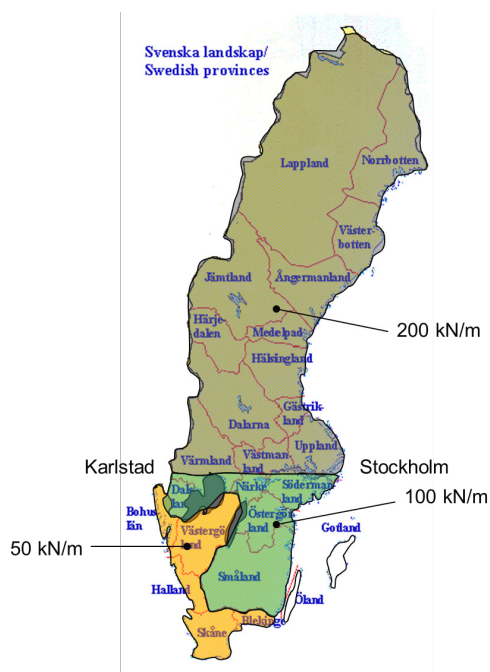
	Dammtyp	Skillnad vinter-vår [mm]	Standardavvikelse [mm]
Andersson och Seppälä (2015)	Valvdamm	25	1.97
Svensen (2016)	Lamelldamm	10	1.99

Standardavvikelsen i de båda studierna är strax under 2 mm. Under förutsättning att felet mellan mätning och beräkning är normalfördelade innebär det att ca en tredjedel av mätvärdena kommer ligga utanför intervallet beräkningsresultat plus/minus en standardavvikelse. I Johansson et.al (2014) beräknades k för den damm som Svensen (2016) studerade. Johansson et.al (2014) beräknade att krönförskjutningen ökar med ca 1,5 mm om islasten utmed hela monoliten är 200 kN/m. Det innebär att ett k -värde på 133 (kN/m)/mm. Jämförs detta med standardavvikelsen från Svensens (2016) beräkning innebär det att vid ca en tredjedel av alla mätvärden ger bakåtberäkningsmetoden en islast som är större än ± 265 kN/m. Eventuella islaster kommer därmed att försvinna i modellfelet jämfört med mätningar och utifrån detta är det tydligt att modellen inte är tillräckligt bra för att användas för bakåtberäkning.

Rätan har dock valts som studieobjekt eftersom den har en isolervägg installerad nedströms vilken begränsar de temperaturberoende rörelserna. Jämfört med lamelldammen i Svensens studie är Rätans årliga krönrörelserna ca fem gånger mindre. Detta leder troligen till en mindre standardavvikelse i faktiska belopp. Förutsätter vi att en beräkningsmodell av Rätan kan göras med samma relativa fel innebär det en standardavvikelse i intervallet 0,2-0,5 mm. Det innebär ett modellfel motsvarande 23-70 kN/m islast. För att med precision kunna bakåtberäkna islasten och göra en användbar uppskattning av islastens storlek krävs en väldigt bra modell. Modellfelet bedöms vara det största hindret mot att kunna bakåtberäkna islasten och jämfört med mätfel och metodfel den helt dominerande faktorn.

9 Uppskattning av svenska islaster baserat på nuvarande kunskap

I RIDAS (2012) finns det angivet vilka islaster som ska användas vid dimensionering av betongdammar. En stor nackdel med dagens version av RIDAS är dock att det inte framgår vilken återkomsttid som förväntas gälla för de redovisade islasterna. Dessutom är variationen i islast endast baserad på geografisk fördelning i Sverige, med stora skillnader i islast vid övergångszonerna, t.ex. norr om en linje mellan Stockholm och Karlstad så ökar islasten från 100 kN/m till 200 kN/m. En illustration av hur fördelningen av islaster ser ut i Sverige illustreras i Figur 9-1.



Figur 9-1 Islaster enligt RIDAS.

Uppdateringen av islasternas storlek i RIDAS bör genomföras i etapper. Som ett första led bör avsnittet om islaster uppdateras baserat på nu tillgänglig information och framförallt för att islasterna ska vara enhetliga med koncepten i Eurokoderna. Detta har diskuterats i t.ex. rapporten av Andersson et al. (2016). Dessutom, om ovanstående uppdatering genomförs är det även rimligt att uppdatera islastens värde baserat på aktuell forskning och dagens kunskapsnivå. Detta beskrivs ytterligare i avsnitt 9.1.

Sett ur ett längre perspektiv, så kan det bli aktuellt att även justera islasternas storlek om framtida mätningar med lastpanelen visar att tidigare mätningar av spänningar i isen (med flatjacks) ger upphov till mätvärden som inte är representativa för den last som verkar på dammen. Detta beskrivs ytterligare i Kapitel 10.

En uppdatering av kraftindustrins riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS) rekommenderas att genomföras på basis av dagens information, dvs baserat på mätningar av spänningen i isen (se t.ex. Figur 9-2 b) eller baserat på temperaturer (se t.ex. Figur 9-3 b). Det är otydligt om de islaster som anges i RIDAS (2012) är någon form av extremvärden (t.ex. karakteristiska eller dimensioneringsvärden) eller rent av medelvärden. Dessutom är indelningen av islasternas variation på grund av geografiskt läge mycket grov och rimligtvis inte särskilt väl överensstämmande med islasternas storleksfördelning över landet. För att illustrera vilka islaster som erhålls beräkningsmässigt som dimensionerande islaster i Sverige, har de prediktionsmodeller som redovisades i Kapitel 1 tillämpas.

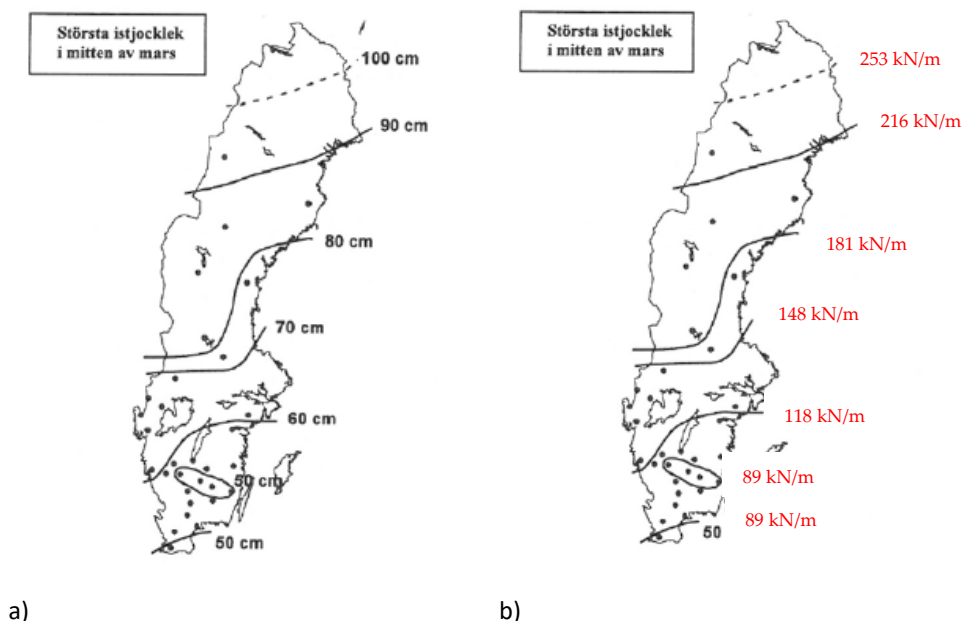
9.1 MAXIMAL ISLAST BASERAT PÅ ISTJOCKLEK

Som första metod som redovisas, används information angående fördelningen i maximal istjocklek i Sverige baserat på statistiska data från SMHI. Eklund (1998) sammanställde bl.a. statistik avseende maximal istjocklek för på 30 svenska sjöar baserade på mätvärden för en 40 års-period. Dessutom, inkluderades fem sjöar där något kortare mätserier (16 till 39 år) fanns tillgängliga. Sammanställningen från Eklund (1998) illustreras i Figur 9-2 a). I figuren, illustreras en streckad linje för ett område där istjockleken är en meter, denna indelning är osäker enligt Eklund (1998) då den baseras på få mätstationer.

Baserat på denna istjocklek, har maximal islast beräknats med hänsyn till buckling i enlighet med Carter (1998), vilket illustreras i Figur 9-2 b). Som det framgår av figuren, erhålls högre islaster i södra Sverige (söder om Stockholm – Karlstad) enligt Carter, jämfört mot nuvarande laster enligt RIDAS och dessutom i norr (norr om en linje mellan Luleå – Klimpfjäll) fås islaster enligt Carter som överskrider 200 kN/m. För området däremellan erhålls dock en högre islast enligt RIDAS än enligt Carter (1998).

Islasten som erhålls enligt Carter (1998) är dock att anse som en övre gräns, eftersom den beskriver lastnivån när buckling av isen uppstår. Med tanke på detta är Figur 9-2 b) att betrakta som väldigt konservativ. Figuren visar dock på en mer lämplig geografisk fördelning av islasterna med mindre variationer vid övergångszonerna jämfört mot nuvarande fördelning enligt Figur 9-1. Det kan därför vara lämpligt att en uppdatering av RIDAS baserat på denna fördelning, men i så fall bör islasterna i Figur 9-2 b) reduceras.

Jämfört med maximala islasterna enligt Carter (1989) så är RIDAS ca 40 % lägre i södra Sverige (50 kN/m respektive 89 kN/m) och ca 20 % lägre i Norra Sverige (200 kN/m respektive 253 kN/m). Om islasten i mellersta Sverige skulle reduceras i samma storleksordning så skulle islasten norr om Gävle vara ca 83 – 117 kN/m (istället för 148 kN/m) och norr om Örnsköldsvik vara 101 – 143 kN/m (istället för 181 kN/m).



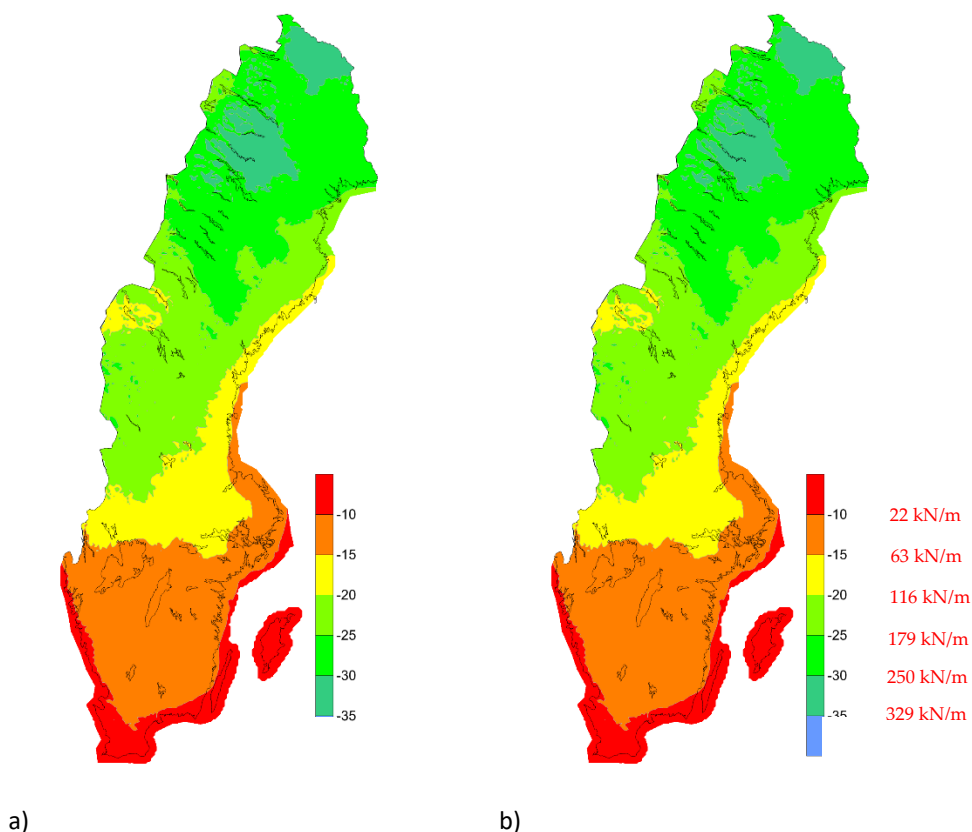
Figur 9-2 a) Största istjocklek i mitten av mars, b) motsvarande istryck enligt. Carter (1988).

Det bör även poängteras att t.ex. Ko et al. (1994) skriver att istjockleken har relativt liten inverkan på islastens storlek, där en istjocklek större än 300 mm har liten inverkan på ökningen i islast. Detta avser dock endast islasten orsakad av isens temperaturexpansion. Som nämntes i kapitel 2 så kan detta bero på att en temperaturgradient över istjockleken främst bör ge upphov till böjning av istäcket och därmed inte resultera i stora normalkrafter.

9.2 MAXIMAL ISLAST BASERAT PÅ TEMPERATUR

Som en alternativ metod för att beskriva islastfördelningen över Sverige tillämpas även metoden enligt Fransson (1988), där islastens storlek beräknas utifrån lägsta medelveckotemperaturen för en 10 års-period. Från SMHI:s klimatdatabas har kartor för lägsta medeldygnstemperatur för mätperioden 1990/91 till och med 2013/14 tagits fram. Enligt Fransson (1988) kan dygnstemperaturen överslagsmässigt översättas till en veckomedeltemperatur genom att öka respektive sänka temperaturen med 5 °C för vinter respektive sommar. Temperaturkartan som presenteras i figuren är att anse som konservativ då den baseras på en längre mätperiod (23 år) än vad som angavs av Fransson (1988).

Baserat på ekvationen för prediktion av islast enligt Fransson (1988), fås betydligt lägre islast jämfört mot Carter (1998) förutom i Norrlands inland där islasterna är till och med högre än enligt Carter (1998). Baserat på denna metod fås dessutom, islaster som är lägre än 63 kN/m för hela Götaland, Svealand ligger generellt under 116 kN/m och Norrland är under 179 kN/m förutom norra Norrland och delar av Norrlands inland som är upp mot 329 kN/m.



Figur 9-3 a) Lägsta dygnsmedeltemperatur, enl. SMHI 1990/91 tom 2013/14 , b) motsvarande istryck enligt Fransson (1998).

9.3 SLUTSATSER

Det finns naturligtvis fler metoder för att prediktera maximal islast och resultatet för dessa kommer att avvika något, vilket presenterades i Kapitel 1. Generellt, visar dock de presenterade fallen ovan att islasterna enligt RIDAS verkar vara ungefär i linje de lastvärden som presenteras i beräkningarna ovan, men att en ytterligare zon eventuellt skulle införas som delar södra Norrland i två regioner.

Det är dock viktigt att islasten presenteras som karakteristisk eller dimensioneringsvärde (t.ex. med 50 års återkomsttid) i framtida versioner av RIDAS och att det framgår hur denna ska kombineras med eventuella partialkoefficienter. Detta diskuteras ytterligare i efterföljande kapitel.

10 Kunskapsbehov för uppdatering av dagens islaster

10.1 BEHOV AV INFORMATION FÖR DIMENSIONERING

För att kunna bestämma vilken information som behövs gällande islaster måste utgångspunkten vara att beakta vad som är nödvändigt för framtida dimensionering och utvärdering av betongdammars säkerhet, både avseende stabilitet och tvärsnittsdimensionering.

Som beskrivet i avsnitt 2 och 9 är bakgrunden till nuvarande rekommendationer i RIDAS oklar.

I första delen av detta avsnitt görs en genomgång av olika dimensioneringsmetoder, för att med detta som utgångspunkt föra en diskussion om vilken information som är nödvändig i riktlinjerna.

10.1.1 Dimensioneringsmetoder allmänt

Vid dimensionering av konstruktioner verifieras att konstruktionens lastbärande förmåga är större än verkande lasteffekt. Olika metoder finns för att göra denna verifikation, från enkla modeller där säkerhetsmarginalen ges som en säkerhetsfaktor, till mer avancerade modeller där sannolikhet för brott jämförs mot en acceptabel brottsannolikhet.

Säkerhetsfaktor

För svenska betongdammar används i nuläget rekommendationerna i RIDAS TV (2012) vilka är baserade på säkerhetsfaktorer. För glidning uttrycks säkerheten som

$$\mu = \frac{\sum H}{\sum V'} \leq \frac{\tan \phi}{sf}$$

Där μ är friktionskoefficient, H krafter parallella med glidplanet, V' krafter vertikala mot glidplanet och ϕ friktionsvinkeln. Tillåten friktionskoefficient beror på friktionsvinkel och säkerhetsfaktorn sf .

Sannolikhetsbaserade metoder

I en sannolikhetsbaserad verifikation beräknas sannolikheten för att ett i förväg definierat gränstillstånd $G(\mathbf{X})$ skall överskridas. $\mathbf{X}$ är stokastiska variabler som beskriver problemet, d.v.s. material, laster m.m. Sannolikheten för brott betecknas P_f och beräknas som

$$P_f = P(G(\mathbf{X}) \leq 0) = \int_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

För att möjliggöra denna beräkning krävs därför statistisk information om ingående variabler, så som fördelningsfunktion (t.ex. normal, log-normal, Gumbel), samt medelvärde och variationskoefficient). Vanligtvis används approximativa metoder för beräkning och då beräknas säkerhetsindex β istället för

brottsannolikhet P_f . För standard-normalfördelade variabler finns en direkt relation mellan β och P_f , något som även kan användas som en approximation.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

Där Φ är kumulativ standard normalfördelning. β jämförs sedan med en fördefinierad minsta säkerhetsnivå. För nya och befintliga betongdammar har denna säkerhetsnivå i Westberg Wilde & Johansson (2016) föreslagits vara enligt Tabell 10-1.

Tabell 10-1. Minsta β /år med avseende på dammsäkerhetsklass (föreslaget i Westberg Wilde & Johansson, (2016).

Dammsäkerhetsklass	Minsta β /år
A	5,2
B	4,8
C	4,2
U	3,8

För att beräkningar av brottsannolikhet ska bli korrekta krävs att samtliga variabler, om de är tidsberoende, är baserade på samma referensperiod. Ovanstående siffror är baserade på referensperioden 1 år.

Partialkoefficientmetoden

Flertalet dimensioneringsstandarder är sedan en längre tid baserade på partialkoefficientmetoden. Partialkoefficientmetoden är s.k. semi-probabilistisk, vilket i korthet innebär att viss statistisk information kring laster och bärförmåga inkluderas, detta genom att grundvariabler omvandlas till dimensioneringsvärden genom tillämpning av partial-koefficienter och ψ -faktorer. Sedan görs verifiering för att tillförsäkra att inget aktuellt gränstillstånd överskrider.

I EN 1990 görs verifiering av statisk jämvikt för bärverket som

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \text{ och för brott eller deformation av byggnadsdel som } E_d \leq R_d$$

Där $E_{d,dst}$ är dimensioneringsvärdet för effekten av stjälpande laster, $E_{d,stb}$ är dimensioneringsvärdet för effekten av stabiliserande laster, E_d är dimensioneringsvärdet för lasteffekt och R_d är dimensioneringsvärdet för motsvarande bärförmåga. Det allmänna uttrycket för lasteffekter är

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}, j \geq i > 1$$

Där γ är partialkoefficienter, Ψ är faktor för kombinationsvärde för variabel last, G är karakteristiskt värde för permanenta laster, P karakteristiskt värde för spännkraft, Q_{k1} karakteristiskt värde för variabel huvudlast och $Q_{k,i}$ är karakteristiska värden för övriga variabla laster.

I EN 1990 beskrivs att kalibrering av partialkoefficienter och ψ -faktorer kan göras på grundval av historiska/empiriska metoder, eller med sannolikhetsbaserade metoder. För Eurokoderna har historiska/empiriska metoder kompletterats med sannolikhetsbaserade metoder. Vid framtagandet av Boverkets konstruktionsregler

(BKR) användes i större utsträckning sannolikhetsbaserade metoder som beskrivs i NKB (1995).

Karakteristiska värden för klimatlaster ska enligt EN 1990 baseras på att deras tidsvarierande del överskrider med en sannolikhet av 0,02 under en referensperiod av ett år. Detta motsvarar ett medelvärde för en återkomsttid av 50 år. I vissa fall gör emellertid karaktären hos lasten eller den valda dimensioneringssituationen att en annan fraktil eller återkomsttid är mer riktig.

Vid lastkombineringen tas därmed hänsyn till karakteristiskt värde, osäkerhet och spridning för enskilda parametrar (genom partialkoefficienterna) samt sannolikhet för att laster ska inträffa samtidigt (via Ψ).

10.1.2 Dimensioneringsmetoder för betongdammar

I dagsläget är, som ovan beskrivet, RIDAS baserad på en säkerhetsfaktor-metodik. Fördelen är att den är enkel, men nackdelarna är flera, så som oklar definition av säkerhetsfaktor (beror på hur villkoret ställs upp) och att osäkerheter inte inkluderas, vilket gör att samma säkerhetsfaktor innebär olika faktisk säkerhet för olika dammar. Detta har diskuterats av t.ex. Westberg Wilde & Johansson (2016), Gustafsson et al (2008), m.fl.

En omarbetning av RIDAS tillämpningsvägledning pågår och inför detta har ett underlag tagits fram i syfte att anpassa laster och förutsättningar för tvärsnittsdimensionering av betongdammar till Eurokoderna (Bond et al, 2016). I Westberg Wilde & Johansson (2016) beskrivs en sannolikhetsbaserad metodik för stabilitetsanalys. I det arbetet visades att samma säkerhetsfaktor kan betyda olika brottsannolikhet.

Med pågående utveckling i beaktande kan konstateras att det vore önskvärt att få fram en statistisk beskrivning för islasten. Detta för att möjliggöra beräkning med en sannolikhetsbaserad metodik, såväl som för att på ett tillförlitligt vis kunna ta fram karakteristiskt lastvärde och partialkoefficient för dimensionerande värde, för att kunna använda partialkoefficientmetoden. Oavsett val av dimensioneringsmetodik är det mycket viktigt att dimensionerande islast är känd och att det är klarlagt vad den baseras på.

10.2 MÖJLIGA METODER FÖR FRAMTAGANDE AV STATISTISK FÖRDELNING

Som framgår av tidigare avsnitt finns i dagsläget inte någon generell modell för skattning av islaster som är fullt verifierad och accepterad. Gebre et al (2013) pekar på behov att utveckla och validera numeriska islastmodeller (termiska såväl som dynamiska) som kan skatta dimensionerande värden på ett mer tillförlitligt vis. En sådan modell skulle naturligtvis kunna vara ett möjligt sätt att ta fram statistisk fördelning eller dimensionerande laster. Enligt Johansson et al (2013) är man dock i dagsläget mycket långt ifrån att uppnå en tillförlitlig fysikalisk modell och även den senaste halvempiriska modellen av Comfort et al (2003) har vissa brister. Med utgångspunkt från svårigheten att fysikaliskt beskriva islasten har flera studier istället fokuserat på mätning av islast.

För att baserat på mätdata kunna få fram en statistisk fördelning som korrekt beskriver islastförhållanden för en specifik damm skulle man i teorin kunna göra mätningar av islasten (med verifierad metod) under en mycket lång tid. Som diskuterades under avsnitt 10.1.1 baseras säkerhetsindex på referensperioden 1 år. Det innebär att även de laster som ingår i beräkningen måste ha denna referensperiod. Mätning under en säsong ger därmed ett värde och det krävs en mycket lång period för att få en tillförlitlig statistisk fördelning (diskuteras senare i avsnitt 11). Antagandet om att en statistisk fördelning för islasten då skulle vara möjlig att ta fram bygger dock på att relevanta förhållanden inte ändras markant; klimatiförhållanden måste vara konstanta över tid, regleringsstrategi (vattenståndsvariationer) måste vara konstant över tid och inspänningsförhållanden får inte ändras.

I följande delavsnitt diskuteras olika möjliga vägar framåt för att bestämma statistiska fördelningar och dimensionerande islaster.

10.2.1 Val och giltighet för statistisk fördelning

Det första frågetecknet är vilken statistisk fördelning som bäst beskriver islasten. Detta är i dagsläget oklart.

Med utgångspunkt från kunskap om statistiska fördelningar för andra typer av laster verkande på byggnadsverk (snölast, vindlast, trafiklast mm) är det troligt att islasten bäst beskrivs av en extremvärdesfördelning, t.ex. Gumbel eller Fréchet). Utmärkande för extremvärdesfördelningar är att de inte är symmetriska (som t.ex. en normalfördelning) samt att de har en lång svans mot extrema värden.

Adolfi & Eriksson (2013) fick bäst passning för en lognormal fördelning, vilket också kan vara en möjlighet.

Nästa frågetecken som behöver diskuteras är vad en statistisk fördelning representerar. De viktigaste faktorerna som påverkar islasten är troligtvis (se avsnitt 1 och 2):

- Isegenskaper så som istjocklek (beror t.ex. på kallgraddagar mm.).
- Temperatur, perioder med mycket låga temperaturer, temperaturökningar mm.
- Vattenståndsvariationer, förefaller vara en av de viktigaste parametrarna (kan troligen bero på både vattenståndsvariations storlek och magasininsändringshastighet).
- Mothåll från stränder.
- Andra parametrar.

En statistisk fördelning som är giltig för en anläggning på en viss plats och med vissa egenskaper i vattenståndsvariation, mothåll, m.m. är inte säkert giltig även för andra anläggningar med andra egenskaper.

10.2.2 Framtagande av statistisk fördelning

Nedan diskuteras olika metoder som kan vara möjliga för att ta fram en statistisk fördelning av islastens storlek.

Metod baserad på mätningar

Antag nu att vi (i teorin) hade möjlighet att mäta islasten i på n st dammar under x år (lång tid). Då skulle vi för vardera damm ha mätresultat av typen

$$I_1 = i_{11}; i_{12}; \dots i_{1x}$$

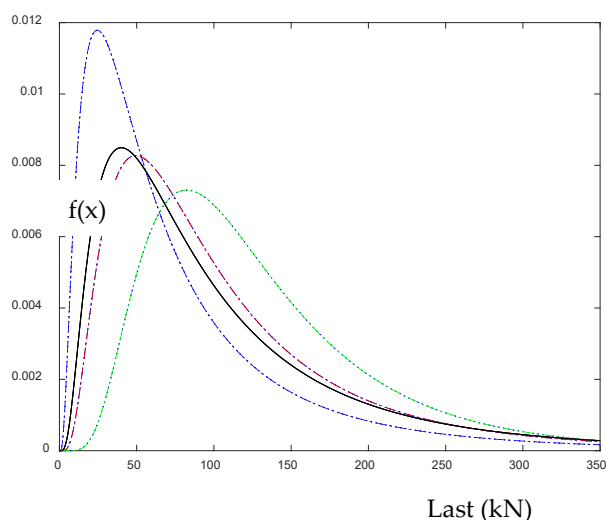
$$I_2 = i_{21}; i_{22}; \dots i_{2x}$$

..

$$I_n = i_{n1}; i_{n2}; \dots i_{nx}$$

och för vardera skulle en statistisk fördelning kunna tas fram. Enligt författarnas kännedom har inte mätningar gjorts på någon enskild damm under så lång period att en statistisk fördelning kan tas fram.

Om materialet från samtliga dammar sammanställs kan en statistisk fördelning av möjlig islast tas fram, $I_M \sim$ fördelning (medelvärde, standardavvikelse, mm.). Denna fördelning representerar då inte faktiska förhållanden på en specifik anläggning, utan representerar "medeldammen", och således inkluderas i denna fördelning olika vattenståndsvariationer, olika mothållsförhållanden, olika klimatförutsättningar mm. Denna fördelning får därmed en större spridning som inte återspeglar förhållanden för en specifik damm.



Figur 10-1 Exempel på statistiska fördelningar som de skulle kunna se ut för damm 1, 2 och 3 (streckprickade). För "medeldammen" (sammanställning av alla värden) blir fördelningen enligt den svarta helstreckade kurvan.

Denna metod kan troligtvis användas som en utgångspunkt, men det måste noteras att det finns statistiska tveksamheter att inkludera samtliga dammar på grund av att islasterna kan antas variera med hänsyn till ovan beskrivna faktorer. Som ett minimum bör indelning efter temperaturzon göras. Genom att sedan förbättra detaljeringsnivån och dela in dammar efter t.ex. vattenståndsvariationer och mothåll bedöms metoden kunna förbättras ytterligare.

För en specifik damm kan islasten troligen bedömas genom att använda Bayesisk uppdatering. Då används statistisk fördelning för "medeldammen" som en *à-priori* fördelning, d.v.s. det som antas innan mätning. Sedan görs mätningar på dammen under ett par säsonger. Årsmaximivärden från mätningarna kan sedan

används för att uppdatera antagande om statistisk fördelning och en α -posteriori-fördelning fås fram som kan antas representativ för den aktuella anläggningen. För extremvärdesfördelningar är Bayesisk uppdatering krångligt men möjligt och finns beskrivet i t.ex. Wei (2014). För att en sådan uppdatering ska vara giltig bör det säkerställas att aktuell damm har likartade förhållanden som dammarna i originalfördelningen. För att en sådan uppdatering ska fungera behöver islastens variationskoefficient vara känd, vilket den inte är, i dagsläget är denna typ av uppdatering därmed inte möjlig.

Den fördelning som tagits fram i Adolphi & Eriksson (2013) är en sammanställning av samtliga i litteraturen redovisade mätningar, och i den ingår dammar av olika typer och olika mothållsförhållanden, vattenståndsvariationer mm. Denna fördelning kan därmed, om använda mätmetoder kan verifieras, förväntas representera "medeldammen".

Metod baserad på kombination av mätningar litteraturgenomgång och numeriska/laborativa metoder

En väg som möjligen kan vara framkomlig är en kombination av mätning, litteraturgenomgång och numeriska metoder/laborativa metoder.

Utgångspunkten för följande diskussion är att islasten kan delas upp i delparametrar som var och en kan skattas för sig. Sådan uppdelning används till exempel för snölast som enligt Eurokoderna består av en "naturlig snölastparameter" som bl.a. beror på geografiskt läge och höjd över havet, kombinerad med anläggningsspecifik information så som taklutning och värmeavgång genom taket.

Antag nu att det, synonymt med ovan, är möjligt att beskriva islasten som bestående av dels en "naturlig del", dels några andra parametrar, på likartat sätt som för snölasten. De övriga parametrarna skulle kunna vara en platsspecifik del som tar hänsyn till en del som tar hänsyn till vattenståndsvariationernas påverkan samt mothåll från stränder, magasinets utformning mm (ev. varierande över längden på en damm där vissa delar får mer mothåll än andra delar). Fler parametrar kan visa sig vara nödvändiga, men antalet bör hållas på en låg nivå för att minimera antalet nödvändiga mätningar.

Islasten skulle då beskrivas som

$$I_{Tot} = I_N \cdot R \cdot V$$

Alternativt som

$$I_{Tot} = I_N + R + V$$

Där I_{Tot} är total islast, I_N är "naturlig islast" som beror av klimatologiska effekter; temperatur, istjocklek, sprickor, snötäcke, m.m. V är vattenståndsvariationer, R är mothåll/inspänningsförhållanden från stränder, magasinutbredning mm. Liknande beskrivningar finns beskrivna av Comfort et al (2003).

Vid mätning på dammanläggningar (med en verifierad metod) fås värden på I_{Tot} .

För övriga parametrar (R, V) görs en litteraturgenomgång av de metoder som föreslagits för skattning, eventuellt kombineras detta med numeriska eller laborativa undersökningar. Även multipel linjär regression (diskuteras i avsnitt 7) kan vara en möjlighet för att få fram faktorerna R och V.

Ko et al (1994) diskuterar mothållets effekt och kan ge viss vägledning i relation mellan islast för olika anläggningar. Det kan även vara möjligt att med hjälp av numeriska modeller få fram relationer mellan mothåll för olika dammar/olika ställen på samma damm. Genom att sätta upp en FE-modell där is modelleras som ett utbrett täcke vilandes på en "fjäderbädd" (vatten), isens egenskaper modelleras med tex E-modul, temperaturfördelning, expansionsstal, krymptal mm. Dammen ansätts som en styv konstruktion.

Vattenståndsvariationerna har visats vid flera tillfällen att de har mycket stor inverkan på islastens storlek, se t.ex. Comfort et al (2003) samt diskussionen i avsnitt 7. Möjliga sätt att kvantifiera vattenståndsvariationernas inverkan kan vara att utgående från i litteraturen presenterade modeller och teorier skatta vattenståndsvariationernas inverkan och sedan kontrollera teoriernas effekt mot uppmätta islaster. Det kan även vara möjligt att mäta på flera närliggande dammar med likartade klimatologiska förutsättningar och mothåll, men med olika vattenståndsvariationer och jämföra mätvärden.

Kontrollerade labbförsök för att skatta effekter av vattenståndsvariationer (och eventuellt mothåll) kan vara möjligt. Vid kontrollerade förhållanden skulle då effekter av konstant vattenyta kunna jämföras med effekter av varierande vattenyta och på så vis skulle inverkan av vattenståndsvariationer kunna skattas.

Metodik baserad på användande av maskininlärning eller artificiella neurala nätverk

En möjlighet kan även vara att testa av maskininlärningsmetoder så som t.ex. artificiella neurala nätverk. Ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) är antal självlärande algoritmer som försöker efterlikna funktionen i biologiska neuronnät. Området maskininlärning utforskar studier och konstruktioner av algoritmer som kan lära sig av och göra förutsägelser gällande data. Sådana algoritmer fungerar genom att bygga en modell från exempelmatningar för att göra datadrivna prognoser eller beslut.

De flesta ANN arbetar i två faser, först en inlärningsfas där nätet tränas genom att matas med kända data och kända svar. Nätet genomför algoritmer och om resultatet skiljer sig från det kända svaret beräknas felets storlek och vikterna på ingångarna i varje neuron justeras (där beräkningar utförs). Detta förfarande itereras och om nätet är rätt designat (där faktorer såsom val av nätverk, antal neuroner, val av träningsdata spelar en avgörande roll) så konvergerar nätet i riktning mot att ge de önskade svaren. Efter inlärningsfasen tillämpar nätet det den lärt sig.

Exempel på användningsområden är mönsterigenkänning, signalbehandling, reglerteknik, prognoser (till exempel väderprognoser) och medicinska diagnoser.

För att ett neuralt nätverk ska kunna användas behövs stora mängder data som kan analyseras. Detta skulle för en damm kunna vara lufttemperatur, nederbörd,

vattenståndsvariationer, (lägen på sprickor), (istjocklek), mothåll från stränder, mm. Det resultat som ska uppnås är överensstämmelse med uppmätta islaster. Genom att mata in stora mängder data från olika dammar skulle det därmed kunna vara möjligt att få fram ett ANN som kan skatta islaster.

För att få fram statistisk fördelning för islasten på damm z, där inga mätningar gjorts, skulle det då i teorin gå att mata in data så som lufttemperatur, nederbörd, vattenståndsvariationer, mothåll från stränder mm. för en längre tidsperiod. Denna typ av information finns normalt sett för våra dammar.

Det bör dock noteras att det krävs omfattande indata och att metoden är något av en "black box," (d.v.s. inte möjligt att i detalj förstå hur lasten fås fram) samt att det finns tveksamheter kring överensstämmelse för områden utanför det "kända", därmed kan det eventuellt vara svårt att säkerställa att de extrema lasterna blir korrekta.

10.2.3 Antal nödvändiga mätningar

Det antal mätningar som är nödvändiga för att på ett tillräckligt noggrant sätt bedöma islastens storlek är inte enkelt att bedöma.

Den första och viktigaste frågan är verifiering av mätningar. Det gäller då

1. Frågan om huruvida tidigare rapporterade mätningar ger bra skattning av den last som dammen utsätts för.
2. Om de islaster som uppmätts inom föreliggande projekt ger en bra skattning av den last som dammen utsätts för.

Vidare undersökningar bör därför först och främst fokuseras på att verifiera mätmetoder och att jämföra mätresultat från olika metoder. Resultatet av detta har stor påverkan på mätbehovet eftersom det kan visa antingen att det finns ett större antal relevanta mätningar som då kan kopplas till svenska förhållanden, eller att tidigare mätningar inte kan betraktas som relevanta för svenska förhållanden eller för lasten som verkar på dammen, varvid mätinsatsen blir betydligt mer omfattande.

För en normalfördelning kan antalet tester, n , som krävs för att skatta medelvärdet så att felet är mindre än E , med en sannolikhet av $1-\alpha$, beräknas som

$$n = \left\lceil \frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma}{E} \right\rceil^2$$

Islasten är troligen inte normalfördelad varvid värdena i Tabell 10-2 underskattar antalet nödvändiga test något, men den kan trots det användas som en skattning för att visa antal nödvändiga mätningar för en population av mätvärden. Antag att vi vill ha 95% konfidens att felet i medelvärde inte är större än E . $\alpha/2 = 0,025$ vilket ger $Z_{\alpha/2} = 1,96$.

Tabell 10-2. Antal nödvändiga tester för att nå visst maximalt fel och en given standardavvikelse.

Maximalt fel E	Antal tester n givet standardavvikelse 50 kN	Antal tester n givet standardavvikelse 80 kN
10 kN	96	246
20 kN	24	61
25 kN	15	40

Antalet test är därmed relativt stort, särskilt för stora standardavvikelser. I vårt fall är även standardavvikelsen okänd, vilket ytterligare ökar behov av mätningar.

Beakta även ett test där värden slumpas fram från en Gumbelfördelning med parametrar [37,9; 50,6]. Denna har dimensionerande värde (98% fraktil) 199 kN. Antag att vi nu från denna fördelning slumpar fram 10 värden ("10 mätresultat"). För dessa anpassas en Gumbelfördelning och från denna Gumbelfördelning beräknas ett dimensionerande värde. Detta görs 10 gånger. Dimensionerande värde varierar då mellan 100-290kN. Om istället 20 värden slumpas fram ("20 mätresultat") varierar dimensionerande värde mellan 190-230kN, alltså betydligt bättre precision.

I EN 1991-3 (2009) anges för snölaster att de kan baseras på mätningar under minst 20 år.

Slutsatsen är att det troligen behövs i storleksordningen 20-40 mätresultat för att ta fram en statistisk fördelning. Som tidigare diskuterats är det sedan troligen nödvändigt att dela in dammar efter olika egenskaper så som klimatzon, vattenståndsvariation och mothåll. Islaster som bedöms giltiga för en damm med vissa egenskaper kan inte utan vidare antas giltiga för en damm med andra egenskaper. Dessa 20-40 mätvärden är således vad som behövs för EN uppsättning egenskaper.

Om mätning utförs på 5 anläggningar med en viss uppsättning egenskaper (åtminstone inom samma klimatzon) behövs därmed en mätperiod om ca 4-8 år. Vid fler anläggningar behövs därvid kortare period.

Det måste även nämnas att val av statistisk fördelning har mycket stor inverkan på slutresultatet. Som exempel kan nämnas att för tidigare rapporterade mätvärden kan tänkas en lognormalfördelning med medelvärde 79 kN, standardavvikelse 81 kN, eller en Gumbelfördelning med medelvärde 72,5 kN och standardavvikelse 49 kN, vilket ger dimensionerande islast (98%-fraktil) 317kN respektive 199kN. Ett större antal mätvärden ger en bättre skattning av fördelningsfunktion.

10.2.4 Selection bias

En försvarande omständighet som är troligt förekommande vid mätning av istryck är "selection bias", d.v.s. att urvalet inte är slumpmässigt, se avsnitt 5.1 om val av dammanläggning lämplig för installation av lastpanel. Detta kommer av att vid mätning av islasten så önskar vi ett resultat, därför kommer val av dammar där mätningar utförs göras så att det är troligt att islast uppkommer och därmed där det är troligt att isen är relativt tjock. Det innebär att mätningar troligen inte alls görs i samma utsträckning där det misstänks att islasterna är små eller där

förekomsten är ovanlig. Detta är en rimlig utgångspunkt för att bestämma stora islaster, men det ska noteras att det inte nödvändigtvis går att dra slutsatser kring islaster för dammar t.ex. i Sydsverige baserat på mätningar från dammar i norra delarna av landet.

10.3 REKOMMENDATIONER FÖR FRAMTIDA ARBETE

Slutsatserna i tidigare Energiforsk-projekt såväl som i detta är att fortsätta mätningar av islast bedöms vara nödvändiga. Nedan beskrivs de steg som rekommenderas:

1. Verifiera den mätmetod som föreslagits i detta projekt, se vidare diskussion i avsnitt 11.
2. Jämföra de vanligast förekommande mätmetoderna (se beskrivning av metoder i avsnitt 2) på samma anläggning under samma tidsperiod, detta för att möjliggöra analys av överensstämmelse och för att se på vilket sätt tidigare presenterade mätresultat kan användas.
3. Utforma en större mätkampanj för svenska förhållanden. Denna mätkampanj bör fokuseras till en och samma klimatzon i syfte att ge en statistisk fördelning för "medeldammen". Det är dock nödvändigt att notera de begränsningar som finns avseende möjlighet att använda mätningar på dammar med olika klimatförutsättningar, vattenståndsvariationer och mothållsförhållanden.

Parallellt med 3) bör forskningsläget på respektive område sammanställas, d.v.s. för de parametrar som mest troligt har störst inverkan på islastens storlek bör beskrivas utifrån känd information.

Vidare analyser bör göras för att testa de halvempiriska modeller som finns beskrivna på de islastmätningar som hittills utförts för att se hur överensstämmelsen blir.

Utformning av mätkampanj

Även om det vore önskvärt att utforma flera olika mätkampanjer fokuserade på olika förhållanden (klimatzon, vattenståndsvariationer och mothåll) bedöms detta som orealistiskt.

En större mätkampanj på ca 4-5 anläggningar inom samma klimatzon under ca 4-5 års tid bör ge omfattande information och möjlighet att få fram statistisk fördelning. Önskvärt är att mätsystemet utformas så att mätning kan utföras över en längre period än så, men det tuffa klimatet och lasterna gör att lastpaneler/mätkuddar/givares livslängd kan bli begränsad.

Mätningarna bör utökas så att de även omfattar istjocklek och snötäcke (detta kan t.ex. göras genom placering av en mindre radar i lastpanelens närhet varvid informationen även kan omfatta snö och istäcktes densitet). Mätning av krönrörelser (t.ex. pendel eller mycket noggrann differentiell GPS) är önskvärt.

Det vore även önskvärt att mäta på flera ställen längs med en damm för att se hur islasten varierar över dammlängden (och för att verifiera modell för mothåll), och

även att mäta på flera lastpaneler bredvid varandra för att se hur islasten verkar i sidled.

Övriga metoder

Bedömning av inverkan av mothåll kan möjligen modelleras med numerisk modell, eller genom kontrollerade labbförsök. Vattenståndsvariationernas inverkan på islasten kan vara möjligt att skatta utifrån labbförsök.

Test av någon typ av maskininlärningsmetoder t.ex. artificiella neurala nätverk. För att möjliggöra detta krävs en stor mängd indata. En första approach kan vara att kontakta forskare som genomfört mätningar av islast för att se om det går att ta del av deras data (både mätningar, temperatur, nederbörd mm behövs). Mätdata från en ny mätkampanj kan användas i en sådan modell.

Mätning av spänning på en utskovslucka (utan isfrihållning) kombinerat med numerisk modellering och bakåtberäkning kan eventuellt användas för att skatta islasten. Det kan även vara möjligt att från information om deformerade luckor bakåtberäkna de islaster som luckorna varit utsatta för.

11 Diskussion

11.1 TEORIBAKGRUND OCH MÄTINSTALLATION

Spridningen i islastens storlek är mycket stor i de mätningar som har rapporterats. Mätmetoderna som använts tidigare kan grovt delas in i tre typer där spänningsmätningar i isen är den vanligast förekommande med infrysning av en tryckcell som mäter det tryck som utvecklas mot den infrusna cellen. Fördelen med den infrusna cellen är att istryckets maximala storlek sannolikt mäts eftersom tryckcellens position följer med istäcket i eventuella nivåörelser i reservoaren. Nackdelen är att man möjligen överskattar den maximala islasten eftersom huvuddelen av reservoarerna har någon nivåfluktuation som således ger upphov till sprickbildning bl.a. närmast dammkroppen, alternativt att man om cellen installerats långt från dammen inte får påverkan av infrysning i sprickor nära dammen som kan orsaka höga tryck vid nivåförändring. Dessutom, om islasten baseras på mätning av töjningar eller tryck i övre delen av istäcket så kommer även inverkan av böjning att inkluderas som en normalkraft vilket leder till en överskattning av islasten. Behovet av bättre mätdata från direkta mätningar med lastpaneler är därför stort. I föreliggande pilotstudie provas både direkt mätning mot konstruktionen med lastpanel och indirekt bestämning av islast genom numerisk bakåtanalys från installerad damminstrumentering.

Utöver valet av mätmetod påverkas de uppmätta islasternas storlek av klimatologiska faktorer (temperatur, vind, snömängd etc.), reservoarens nivåförändringar, randvillkor från älvsträndernas närhet och bottenpografi samt avstånd till fritt vatten vid t.ex. intag eller utskov. Sannolikt påverkas islasten också av hur dammkroppens uppströmssida är utformad och huruvida dammens egna rörelser är små eller stora vid förändrade temperaturer. Även isens egna mekaniska egenskaper och förekommande sprickbildning påverkar islastens storlek. I föreliggande pilotstudie har ett försök gjorts till att välja en mätplats med så idealiserade mätförhållanden som möjligt i de påverkbara parametrarna. Resultatet blev att lamelldammen i Rätan utsågs som ett lämpligt objekt. Rätans små vattenståndsvariationer, vertikal uppströmssida i höjd för isläggning, hög instrumenteringsnivå och isolerat men ej uppvärmt inspektionsutrymme var avgörande parametrar.

Den höga instrumenteringsgraden för att vara en svensk betongdamm ökar möjligheterna att studera eventuell inverkan av islasten på dammen eller om möjligen dammens egna rörelser av temperatur och vattenstånd kan tänkas påverka islasten. Det öppnar också goda möjligheter till bakåträkning med numerisk modellering.

Islastpanelens utformning med direkt mätning av istryck mot betongytan grundar sig på bl.a. tidigare erfarenheter från liknande mätningar ute till havs. Viktiga parametrar vid utformningen har varit tillräcklig höjd och bredd för att kunna mäta över hela istäckets tjocklek och att undvika påverkan av valvbildning över själva mätpanelen i dammens längdriktning. Önskvärt hade förstås varit att placera flera lastpaneler bredvid varandra eller med s.k. "dummies" (utan mätutrustning) på ömse sidor för att få en längre slät yta mot istrycket, men

eftersom projektet primärt är ett pilotprojekt för att kontrollera mätprinciperna och panelens generella utformning har det av kostnadsskäl begränsats till en panel. I framtida mätningar är det önskvärt att komplettera med detta. Ur fotodokumentation ses att sprickbildningen i isen någon decimeter ut från dammen gör en båge över panelen och det går inte att utesluta att det har påverkat mätresultatet. I så fall troligen genom att underskatta islasterna. Det är dock också möjligt att islasten är högre genom det faktum att panelen sticker ut och på så sätt möjligen bär mer last. I framtida forskningsprojekt bör det studeras eventuell inverkan från randeffekter på grund av lastpanelens bredd alternativt från att dummies placeras intill panelen.

En hög styvhet på lastpanelen bedöms också vara avgörande för att undvika eftergivlighet under islast och på så sätt få felaktiga mätvärden. Därav den mycket robusta designen av lastpanelen som också gav en totalvikt på 6,5 ton för en panel.

11.2 PREDIKTION OCH UPPMÄTTA ISLASTER

Eftersom det skulle vara mycket kostsamt att genomföra mätningar på alla anläggningar behöver metoder utvecklas för att prediktera islasten utifrån givna förutsättningar. De i projektet uppmätta islasterna har jämförts med t.ex. enkelt kvantifierbara parametrar som istjocklek och utomhustemperatur. Det visar sig en annorlunda bild än den i RIDAS antagna med både högre största islast (250-300 kN/m) och en nyanserad fördelning med t.ex. betydligt lägre islaster närmast Norrlandskusten (150-200 kN/m). Att enbart utgå från uppmätta spridningar på istjocklek och utomhustemperatur (köldmängd) och utelämna randvillkor från stränder och magasinsvariation skulle kunna ge både för låga och för höga dimensionerande islaster.

Vid en framtida mätkampanj bör det eftersträvas jämförande mätningar med enklare metoder (infrysning av enkla tryckceller) för att på så sätt se om de går att korrelera med de mer kostsamma lastpanelerna för direkt mätning. Då kan mätningar på ett billigare sätt utföras vid fler anläggningar och på flera platser vid en enskild anläggning.

De mätningar som genomförts i föreliggande projekt var primärt avsedda för att testa den nyutvecklade prototypen av lastpanel. Mätningarna som genomförts är därför att beakta som stickprov där första året dessutom är behäftat med stora osäkerheter då infrysningen av panelen ej skett på naturligt sätt. Trots att panelen är i ett tidigt stadium av utveckling och validering så verkar den ge rimliga och mycket intressanta resultat.

De vid Råtan uppmätta islasterna under första vintern (2016) gav mätvärden på upp emot 140 kN/m i början på mars, men eftersom det efter islossningen och sommarperioden visades en lastnivå om ca. 10-15 kN/m får man anta att den uppmätta lasten snarare låg på nivån 125-130 kN/m. Vid installation av lastpanelen sågades isen upp för att placera den och istjockleken uppmättes till 80 cm vilket borde gett upphov till nivåer över 180 kN/m om man utgått enbart från tjockleken. En analys av mätdata från 2016 gav att islasterna korrelerar bra till utomhustemperaturen på lång sikt, men också att variationerna p.g.a. dygnsreglering av reservoaren i hög utsträckning påverkar islasten. En tydlig cykel

för islasten kan ses med ökande islast under natten när flödet genom aggregaten står stilla och reservoaren stiger samt en mycket snabbt sjunkande islast så snart aggregaten startas på morgonen och reservoaren sjunker. Det stärker hypotesen om att möjligen både strömningarna och vattenståndsvariationerna i reservoaren påverkar islastens storlek. Totalnivån på islasten ökar också genom att medelnivån i reservoaren stiger och att utomhustemperaturen (medel) också ökar. Under utvecklingen av de högsta islasterna var också betongtemperaturen i dammen fortfarande relativt konstant vilket indikerar att det vid den tidpunkten inte fanns någon stor inverkan av dammens egna temperaturrörelser.

Under 2017 uppmättes något lägre högsta islaster (max 85-90 kN/m) för säsongen i slutet av februari. Utöver andra potentiella påverkansfaktorer så kan även det faktum att lastpanelen under vintern 2016/2017 fanns på plats under isläggningen och att inte ett hål behövde sågas upp i isen (som vid installation 2016) ha inverkat. Beteendet på islasten var dock det samma med ökande islaster under nätterna vilket korrelerar främst till utebliven drivvattenföring genom aggregaten och stigande reservoarnivå.

Comfort et al. (2000b) beskriver att fall med måttliga vattenståndsvariationer (ca 10 – 30 cm) som inträffar en till två gånger per dygn ger upphov till de största variationerna. Deras förklaring är att avsänkningen orsakar vertikala sprickor i isen och deformationen av istäcket sker primärt i dessa sprickor vilket innebär att istäcket inte rör sig till någon större utsträckning. Sprickorna leder därmed att tvånget försvinner (eller reduceras) vilket resulterar i att islasten sjunker. I dessa sprickor sker dock ny istillväxt vilket leder till att ett nytt tvång byggs upp och därmed så ökar islasten återigen.

11.3 BAKÅTANALYS AV ISLASTENS STORLEK

Metodiken med att bakåtberäkna bidraget från islast till betongdammens rörelser med en numerisk modell har provats i uppdraget. Kvaliteten på framförallt mätdata från de direkta pendlarna är dock låg och det gör jämförelsen med beräkningarna mycket svår. Uppmätta rörelser fluktuerade mer än den totala förväntade krönrörelsen. Trots olika filtreringar gick det inte att kvantifiera islastens storlek ur dessa även om dammens förväntade rörelser över året kvalitativt stämmer överens med de uppmätta.

På samma sätt gjordes ett försök att utläsa islastens påverkan på sprickvidden, men det visar sig att mycket höga islaster krävs för att få ett statistiskt säkerställt utslag på sprickvidden. Sprickviddsgivarnas noggrannhet är anpassad för sprickviddsmätning och inte att detektera lastskillnader.

Rapporten presenterar p.g.a. svårigheterna med jämförelse mot mätdata en generell metodbeskrivning kring hur bakåtberäkning kan göras utifrån mätdata. Det visar sig ur detta att utöver potentiella mät-/noggrannhetsbrister ur bakåträkningsperspektiv så kan även den modell man använder för att simulera dammens normalbeteende innehålla modellfel. I jämförelsen mellan mätfel och modellfel verkar modellfelet vara den största osäkerhetsfaktorn. Särskilt för t.ex. dammar som har rörelser p.g.a. stora årsvariationer och avsaknad av t.ex. klimatvägg.

11.4 FRAMTIDA MÖJLIGA METODER ATT BESTÄMMA ISLASTENS STORLEK

I syfte att förbättra dimensioneringsberäkningar behöver islastens statistiska fördelning tas fram (åtminstone dimensionerande lastvärde motsvarande last med återkomsttid ca 50 år). I dagsläget är såväl fördelningsfunktion som parametrar (medelvärde, varians) okända. Det finns ett antal olika metodiker som i framtiden skulle kunna användas för att beskriva islastens storlek t.ex. genom en fysikalisk modell, mätningar på flera anläggningar, kombination av mätning och numeriska metoder eller användning av neurala nätverk/machine learning. Alla metoder har sina för och nackdelar och i den metod som bedöms ha mest potential är mätning av islast, eventuellt kombinerat med numeriska/laborativa metoder. Det finns svårigheter med mätning för dammar med olika egenskaper eftersom det statistiskt är tveksamt om dessa verkligen tillhör samma statistiska fördelning. Av praktiska skäl är det troligen ändå nödvändigt att göra på det sättet, men det vore önskvärt att åtminstone dela upp dammar utifrån klimategenskaper. Med mer kunskap kan man förhoppningsvis även dela upp utifrån vattenståndsvariationer, mothåll från stränder och eventuellt andra egenskaper.

Troligtvis behövs ca 20-40 mätvärden för att skatta en statistisk fördelning. Det är nödvändigt att i ett första steg verifiera använd mätmetod med den last som faktiskt verkar på dammen. Sedan bör jämförelse göras mellan vanligt förekommande mätmetoder för att se om/hur dessa kan korreleras. Efter det kan en större mätkampanj utformas för svenska förhållanden. Omfattningen kan vara ca 4-5 anläggningar (i samma klimatzon) och mätningar under ca 4-5 år. Utöver mätning av islasten bör också istjockleken och förekommande snötäcke mätas.

Vidare analyser bör göras av vilken inverkan vattenståndsvariationer och mothåll har på den totala islasten. Detta kan eventuellt göras med multipel linjär regression då detaljerade mätvärden finns tillgängliga. Viss information kan även hittas i litteraturen. Labbförsök eller numeriska analyser kan också vara möjligheter.

Ett framtida forskningsprojekt baserat på mätningar vid flera anläggningar och under ett flertal år innebär naturligtvis en stor investering. Dock så är islasten storlek behäftad med väldigt stora osäkerheter och flera anläggningar (särskilt de mindre) förstärks för ofantligt mycket större belopp på grund av att de inte kan uppfylla dagens säkerhetskrav med dagens lastnivåer på islasten. I relation till väldigt stora kostnader för felaktiga eller onödiga åtgärder på vattenkraftsanläggningarna, så är därmed kostnaderna för en framtida mätkampanj att se som ringa.

11.5 SUMMERING

Projektets syfte att göra in-situ-mätningar med en lastpanel för direkt mätning av islasten verkar ha fungerat och med modifieringar för att eliminera risken för valvbildning bedöms metoden tillförlitlig för magasin med små vattenståndsvariationer (< 1-2 m).

Ansatsen att bakåträkna islasternas storlek mot insamlade dammätningar visade sig vara mycket svårt. Dels p.g.a. bristande kvalitet i indata, men också för att modellfelet i den numeriska modellen är okänt och sannolikt även kan vara större

än mätfelen. Metodiken bedöms i dagsläget behöva vidare utveckling för att vara ett tillförlitligt verktyg.

Ett tydligt resultat från studien är att det behövs mer mätningar som läggs upp på ett strukturerat sätt och helst genom kombination av direkta mätningar mot damm och med tryckceller infrusna i isen för att skapa så stor mängd data som möjligt. Helst bör också metoder för att prediktera islast på anläggningar utvecklas baserat på en större mängd mätdata från flera olika anläggningar.

Sammanfattningsvis krävs sannolikt flera års mätningar, utveckling av metoder för numerisk modellering och prediktering av islaster innan en ändring av RIDAS kan göras med avseende på dimensionerande islaster baserade på mätresultat från lastpanelen.

För att kompensera för detta, rekommenderas därför att nuvarande islaster i RIDAS uppdateras så att de baseras på befintliga prediktionsmodeller (se Kapitel 9) där man åtminstone inför en ytterligare zon som delar Norrland i två regioner. Dessutom bör islasterna anpassas till ett koncept baseras på partialkoefficienter, detta har t.ex. redan föreslagits i den rapport som utgör underlag till revideringen av RIDAS tillämpningsvägledning, Andersson et al (2016).

12 Referenser

- Adolfi, E & Eriksson, J.** (2013). *Islastens inverkan på brottsannolikheten för glidning och stjälpning av betongdammar*. Master thesis, KTH Royal institute of technology, Stockholm.
- Andersson, O. & Seppälä, M.** (2015). *Verification of the response of a concrete dam subjected to seasonal temperature variations*. Master thesis 485, KTH Royal institute of technology.
- Andersson, P., Blomdahl, J., Bond, H., Ekström, T., Hallgren, M., Janhunen, T., Malm, R., Stenmark, M., Westberg Wilde, M.** (2016) *Eurokoder för dimensionering av betongdammar – Förslag på tillämpning i Sverige*. Energiforskrapport 2016:309,
- Bergdahl, L.** (1977). *Physics of ice and snow as affects thermal pressure*. Departement of hydraulics, Chalmers University of Technology, Report, series A:1.
- Bergdahl, L.** (1978). *Thermal ice pressure in lake ice covers*. Doktorsavhandling, Institutionen för vattenbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Bomeng, X.** (1986). *Design value of pressure due to expansion of ice sheet in reservoir*. Proceedings of the 8th IAHR International Symposium on Ice, Iowa City.
- Bond, H & al.** (2016). *Eurokoder för dimensionering av betongdammar*. Energiforsk rapport nr 2016:309.
- Carter, D., Sodhi, D., Stander, E., Caron, O. & Quach, T.** (1998). (1998). *Ice thrust in reservoirs*. Journal of Cold Regions Engineering, 12(4), 169-183.
- Comfort, G & al.** (1993). *Phase II: Static Ice Loads on Hydro-Electric Structures: Field Measurements and Large Scale Test Conducted During the 1992-93 Winter*, CEA Project 9038 G 815
- 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.
- Eklund, A.** (1998). *Istjocklek på sjöar – en statistisk bearbetning av SMHIs mätningar*. SMHI, hydrologi, rapport nr 76.
- Ekström, T. & al.** (2009). *Dammsäkerhetsbesiktning vid Rätan 14 Maj 2009*. EnergoRetea
- EN 1990.** (2004). *Basis of Design*. CEN, Brussels.
- EN 1991-3.** (2009). *Laster på bärverk - Del 1-3: Allmänna laster - Snölast*
- Fransson, L.** (1988). *Thermal ice pressure on structures in ice covers*. Doctoral thesis 88:67D, Tekniska högskolan i Luleå.

- Fransson, L. & 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.
- Gebre, S. & al.** (2013). *Review of ice effects on hydropower systems*. J. Cold reg. Eng. ASCE, December.
- Gustafsson, A., Johansson, F., Rytters, K. Stille, H.** (2008) *Betongdammars glidstabilitet – förslag på nya riktlinjer*. Elforskrapport 08:59.
- ICOLD.** (1996). *Dams and related structures in cold climate. Design guidelines and case studies*. Bulletin 105. International Commission on Large Dams, Paris.
- Johansson, F., Spross, J. & Fransson, L.** (2013). *Islast mot dammkonstruktioner – Sammanställning av kunskapsläget samt förslag till forskning och utveckling*. Elforsk, rapport nr. 13:56.
- Johansson, F., Malm, R. & Fransson, L.** (2014). *Islaster mot dammkonstruktioner – fördjupad studie*. Elforsk, rapport nr 14:57.
- Ko, P.K., Ho, M.S., Smith G.F.** (1994). *Thermal ice forces on concrete dams recent developments*. Dam Safety.
- Löfquist, B.** (1987). *Istryck mot bropelare*. Publikation 187:43, Vägverket, Sverige.
- Malm, R & al.** (2009). *Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method*. PhD thesis. Trita-BKN.Bulletin 97.Department of Civil and Architectural Engineering.KTH Royal Institute of Technology. Stockholm
- NKB** (1995) *Basis of design of structures. Calibration of partial factors*. Nordiska kommittén för byggbestämmelser. ISSN 0359-9981.
- NVE.** (2003). *Retningslinjer for laster och og dimensionering*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Petrich, C. & al.** (2015). *Time-dependent spatial distribution of thermal stresses in the ice cover of a small reservoir*. Elsevier, Cold Regions Science and Technology, paper 0165-232X.
- RIDAS.** (2012). *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet - Tillämpningsvägledning*. Svensk Energi.
- 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.
- Svensen, D.** (2016). *Numerical analyses of concrete buttress dams to design dam monitoring*. Master thesis 492, Concrete Structures, KTH Royal institute of technology.
- 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.

Timco, G. W., & Croasdale, K. R. (2006) *How well can we predict ice loads?*. Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice, Sapporo, Japan, Aug. 2006.

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

Wei, X. (2014). *Parameter Estimation and Prediction Interval Construction for Location - Scale Models with Nuclear Applications*. Dissertation, McMaster University, Ontario, Canada.

Westberg Wilde, M & Johansson, F. (2016). *Probabilistic model code for concrete dams*. Energiforsk report no. 2016:292.

Willmot, J.G. (1952). *Measurement of ice thrust on dams*. Ontario hydro research news, vol 4.3, pp. 23-25.

LASTFÖRUTSÄTTNINGAR AVSEENDE ISTRYCK

Klimatet i Sverige innebär att vattenkraftdammar utsätts för islaster som varierar stort mellan dammar i södra och norra Sverige. Syftet har här varit att ta fram en strategi för hur de islaster som anges i nuvarande RIDAS kan uppdateras.

Det har handlat om att utveckla och prova en lastpanel för att mäta islasten mot en svensk damm och att undersöka möjligheten att numeriskt bakåträkna den uppmätta islasten med lastpanelen.

De uppmätta islasterna har jämförts med exempelvis isens tjocklek och utomhustemperaturen. Men att enbart utgå från uppmätta spridningar på istjocklek och utomhustemperatur och att utelämna randvillkor från stränder och magasinvariation visar sig kunna ge både för låga och för höga dimensionerande islaster.

En eventuell uppdatering av RIDAS skulle kunna göras stegvis där en första uppdatering sker baserat på nuvarande kunskap och prediktionsmodeller, och en framtida baseras på erfarenheter från fortsatta mätkampanjer. Ett tydligt resultat är att man behöver göra mätningar under flera år innan en ändring av RIDAS kan göras för dimensionerande islaster baserat på den utvecklade prototypen för islastpanel.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se