

UTVÄRDERING AV MODELLER FÖR PREDIKTION AV ISLAST MOT DAMMAR

RAPPORT 2019:631



Utvärdering av modeller för prediktion av islast mot dammar

**RIKARD HELLGREN
RICHARD MALM
MARIE WESTBERG WILDE**

ISBN 978-91-7673-631-9 | © Energiforsk december 2019

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

Förord

I detta projekt har prediktionsmodeller för uppskattning av islaster jämförts med resultaten från en prototypgivare för mätning av islast installerad på Rätans betonglamelldamm.

Genom att korrelera modellerna med uppmätta värden har ett av projektets mål varit att identifiera vilka förhållanden som är extra viktiga att bevaka vid framtida mätningar med givaren.

Studien har genomförts av projektledare Rikard Hellgren (WSP) tillsammans med Richard Malm (Sweco) och Marie Westberg Wilde (ÅF). Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Mats Persson (Vattenfall) och Petter Westerberg (Uniper).

Projektet har genomförts inom det dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

De kalla svenska vintrarna innebär att betongdammarna riskerar att utsättas för istryck. I *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS)* anges ett dimensioneringsvärde som varierar mellan 50 – 200 kN/m från söder till norr. Särskilt vid låga dammar i norra Sverige så kan islasten utgöra en stor andel av den horisontella kraften som verkar på dammen. Trots islastens stora påverkan, är kunskapen om den faktiska islasten som verkar direkt mot dammen relativt låg.

Inom det tidigare SVC projektet "Lastförutsättningar avseende istryck" har en prototyp av en lastpanel utvecklats, vilken är avsedd för att mäta islaster som verkar på betongdamm. Panelen sitter sedan 2016 installerad på Rätans betongdamm och har sedan dess mätt islasten mot dammen.

I denna rapport presenteras en utvärdering av olika prediktionsmodeller avsedda för att förutsäga istryck, där dessa prediktioner jämförs mot de uppmätta istrycken vid Rätan. För detta har två befintliga modeller använts:

- En halvempirisk modell föreslagen av Comfort, et al. (2003).
- En mekanisk modell där istryck modelleras utifrån spänningar i isen, där isen modelleras med Norton-krypning enligt Petrich, et al. (2015).

Beräkningarna visar att de modeller som tillämpas i denna rapport ger signifikanta avvikelser jämfört med de islastmätningar som genomförts vid Rätan. Detta gäller både den maximala islasten och den relativa skillnaden mellan de dagliga islasttopparna som sker under säsongen. Det är utifrån dagens kunskapsläge inte möjligt att avgöra om orsaken till denna avvikelse mellan modeller och mätningarna beror på felaktigheter i modellerna eller mätningarna, eller om det är en kombination av båda. Det framgår dock tydligt vid utvärderingen att avvikelsen mellan dessa främst beror på den del av islasten som uppkommer till följd av vattenståndsvariationer.

Tidigare studier visar att islaster orsakade av vattennivåvariationer är den mekanism som resulterar i de största islasterna mot dammar. Trots detta, så är denna effekt exkluderad i majoriteten av alla modeller för islaster. Det finns således ett tydligt gap mellan de mekanismer som observerats i mätningar och befintliga prediktionsmodeller. Modellen som utvecklats av Comfort beaktar inverkan från vattenståndsvariationer, men resultatet visar att just denna del av modellen ger sämst överensstämmelse med mätningarna.

Summary

Concrete dams in the cold Swedish climate may be subjected to a pressure load from the ice. *The hydropower industries guidelines for dam safety (RIDAS)* specify that dams should be designed for an ice load between 50-200 kN/m, varying from south to north. This load can thereby be significant and may constitute a large portion of the total horizontal load, especially for smaller dams in the northern part of Sweden. Despite this, the current understanding of ice loads is limited.

In the previous SVC project, "Load conditions for ice pressure," a prototype ice load panel was developed. The panel was installed on Rätan's concrete dam in 2016 and have measured the ice load against the dam since then.

In this report, different models intended to predict ice load are presented and these models are applied to predict the measured ice load from Rätan. For this, two models were used:

- A semi-empirical model proposed by Comfort et al. (2003).
- A mechanical model where ice pressure is modelled based on ice-stresses, where the thermal ice stresses are modelled with Norton creep as proposed by Petrich, et al. (2015).

Both models inaccurately predict the total and the relative magnitude of the measured ice load peaks, and underestimate the maximum measured load during the winter. It is from today's knowledge not possible to determine whether the measurements are correct and if the prediction from the models is wrong, vice versa or a combination of both. Especially the part of the model that predicts the ice loads from water level variations shows low explanatory value, and currently no model exists that accurately can predict ice loads caused by water level variations.

Two things seem obvious regarding the modelling of ice loads; ice load caused by water level variations is the mechanism that provides the most significant contribution to ice load on the dam, and at the same time almost all prediction models for ice load on dams only consider thermal loads. There is thus a clear gap between the mechanisms found by measurements and the development of models. The model developed by Comfort takes into account the impact of water level variations. Still, the result shows that this particular part of the model gives the least agreement with the measurements.

Innehåll

1	Introduktion och bakgrund	7
1.1	Modelltyper	8
1.2	Syfte och metodik	10
2	Istrycksmätningar och relaterad data	11
2.1	Panelen	11
2.2	Yttre faktorer	14
3	Modellering av istjocklek på sjöar	16
3.1	Stefans ekvation	16
3.2	Istjocklek enligt Comfort et.al (2003)	16
3.3	Finita differens metoden	18
4	Modellering av istryck	20
4.1	Comfort et al (2003)	20
4.1.1	Definitioner	21
4.1.2	Termisk islast	22
4.1.3	Islast från vattennivåförändring	22
4.1.4	Residuallast	23
4.2	Petrich et al, 2015	23
5	Tillämpning av modeller	26
5.1	Klövsjön	26
5.2	Rätan	28
5.2.1	Istjocklek	28
5.2.2	Islast enligt Comfort	30
5.2.3	Islast enligt Petrich et al	34
5.2.4	Sammanställning	35
6	Prediktion av vinter 18/19.	37
6.1	Istjocklek	37
6.2	Islast	38
7	Diskussion och slutsatser	40
8	Litteraturförteckning	43

1 Introduktion och bakgrund

De kalla vintrarna i Sverige innebär att betongdammarna riskerar att utsättas för istryck. I *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet* (RIDAS TV 7.3 2017) rekommenderas det att dammsäkerheten utvärderas för lastfall som inkluderar islast. I RIDAS anges ett dimensioneringsvärde som varierar mellan 50 – 200 kN/m från söder till norr. Särskilt för låga dammar i norra Sverige innebär det att islasten kan utgöra en stor andel av den totala horisontella kraften som verkar på dammen och får därmed en avgörande roll i huruvida dammen anses stabil eller ej. Trots islastens stora påverkan är kunskapen om den faktiska islasten som verkar direkt mot dammar låg (Gebre, o.a. 2013, Comfort, Gong, et al., Static ice loads on dams 2003).

Det finns dessutom andra faktorer än geografisk placering som påverkar islastens storlek. Två viktiga faktorer är spänningar orsakade av temperaturförändringar i isen (Bergdahl 1978, Fransson 1988, Carter, o.a. 1998, Petrich, o.a. 2015); och vattennivåvariationen vid dammen (Comfort, Gong, o.a., Static ice loads on dams 2003, Stander 2006). Högst islaster uppnås vid små (30 – 70 cm) dagliga variationer medan enstaka vattennivåförändring större än istjockleken minskar istrycket under resten av vintern (Comfort, Gong, o.a., Static ice loads on dams 2003). Andra faktorer som kan påverka istryckets storlek är magasinets storlek och form, lutning på stränder (Azarnejad och Hrudey 1998, Carter, o.a. 1998). Att bestämma islastens storlek försvåras av att den uppvisar stor rumslig variation och att spänningen i isen kan variera stort över endast några meter (Taras, o.a. 2011).

Inom tidigare SVC projektet *"Lastförutsättningar avseende istryck"* har en prototyp av en lastpanel avsedd för att mäta islaster som verkar på betongdamm utvecklats (Malm, o.a. 2017). Panelen sitter installerad på Rätans betongdamm och har sedan 2016 mätt istrycket som verkar på dammen. Det projektets fokus var att ta fram ett möjligt mätprogram för islast i Sverige samt utveckla en mätanordning för detta.

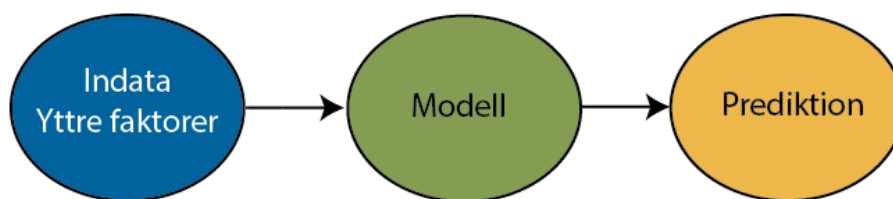
I ovannämnda SVC-projektet presenterades enkla islastmodeller som endast baseras på en parameter (istjocklek, temperatur etc.); dessa ger en stor spridningar i resultat. Någon jämförelse mellan befintliga teorier och uppmätta islaster genomfördes inte i föregående projekt. För att kunna validera mätningarna är det viktigt att jämföra mätresultatet med befintliga metoder för bedömning av islastens storlek och säsongsvariation. För att skapa statistiskt underlag som ska kunna användas för att uppdatera RIDAS riktlinjer angående islastens storlek i framtiden så krävs dock långa mätserier på flera dammar. För att kunna bestämma islasten med en noggrannhet om 25 kN/m krävs mellan 15- 40 mätsäsonger (Malm, o.a. 2017). Dessa mätningar ska representera samma statistiska urval och därmed genomföras vid dammar med likartade förutsättningar för islaster.

I tidigare projekt finns sammanställning av befintliga teorier kring islastens storlek (Johansson, Malm och Fransson 2014). Bland dessa finns ett antal modeller presenterade för att prediktera islastens storlek vid en damm. Dessutom finns ett antal semi-empiriska modeller som visar god överensstämmelse med de mätningar

de baserats på men som aldrig testats på oberoende mätningar och deras allmängiltighet är därför osäker.

1.1 MODELLTYPER

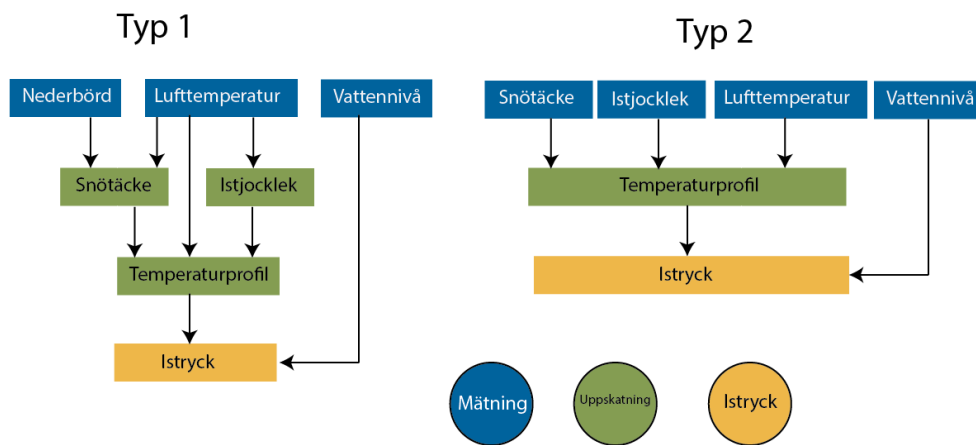
Inom detta projekt används termen "modell" för att beskriva ett verktyg som, utifrån given indata, ger en prognos av ett nuvarande eller framtida värde enligt principen i Figur 1-1. Det innebär att prognosmodellen i mitten kan vara mångfacetterad och bestå av en stor variation av verktyg, allt ifrån mänskliga experter till avancerade matematiska modeller. Gemensamt är att de utifrån indata i form av yttre faktorer som exempelvis utomhustemperatur, snömängd, istjocklek och vattennivå ska kunna förutsäga istrycket vid en damm. Dessa modeller varierar från att enbart estimerar det dimensionerande istrycket (d.v.s. det maximala istryck som uppstår under en förutbestämd återkomsttid) till modeller som detaljerat beskriver spänningsvariationen i isen på minutnivå.



Figur 1-1 Förenklad bild av en prediktionsmodell

Modeller som enbart förutsäger det dimensionerande istrycket är svåra att utvärdera då det kräver tillgång till det maximala mätvärdet under återkomsttiden. Det innebär att istrycket måste mätas under flera decennier innan en jämförelse av modellens prediktion och verkligheten kan göras.

Inom denna rapport har istället ett urval av modeller gjorts utifrån kriteriet att de bedömts som tillämpbara för en dammägare i Sverige och de ska gå att utvärdera mot de genomförda istrycksmätningarna. Detta innebär att modeller har valts med indata som en dammägare oftast har tillgänglig eller kan få fram relativt enkelt. Det innebär kortfattat att modellerna innehåller en eller två modelleringssteg beroende på tillgängligheten kring information om istjockleken vid dammen. Figur 1-2 visar två typer av sådana modeller utifrån den indelning som presenteras i Figur 1-1. Typ 1 modellerna förutsätter tillgång till information kring nederbörds mängd, lufttemperatur och vattennivå. Utifrån denna information beräknas sedan islasten i tre steg. Som första steg beräknas istjockleken och snötäcket, därefter beräknas en temperaturprofil genom isen och slutligen beräknas istrycket baserat på temperaturprofilen. I typ 2 modellerna finns information om istjocklek och snötäcke på isen tillgängliga, varvid temperaturprofilen i isen kan beräknas direkt.



Figur 1-2 Två typer av islastmodeller som utgår från typ av information som svenska dammägare har tillgängligt.

Utifrån dessa krav har två modeller av typ 1 studerats, en semi-empirisk modell och en fysikalisk modell. Semi-empiriska metoder bygger på en fysikalisk modell men använder resultat från mätningar eller experiment för att anpassa vissa eller alla parametrar. Den semi-empiriska modell som har använts i denna studie är utvecklad av Comfort, et al (2003) och är baserad på istrycksmätningar utförda vid nio Kanadensiska dammar under en nioårsperiod. Kanadensiska förhållanden avseende klimat liknar de svenska och det är därför av intresse att testa den föreslagna islastmodellen på svenska förhållanden. Genom att jämföra modellen med resultaten från mätningarna vid Rätan finns det en möjlighet att indirekt validera både den kanadensiska modellen och våra mätningar och därigenom bekräfta ovanstående hypotes. Om den kanadensiska modellen ger bra överensstämmelse med de svenska mätningarna utökas även de "tillgängliga mätningarna" avsevärt vilket innebär att ett betydligt färre nya mätningar krävs innan en eventuell uppdatering av RIDAS kan genomföras. God överensstämmelse ökar tillförlitligheten till att de kanadensiska mätningarna även är representativa för Sverige.

Utöver de empiriska modellerna finns även ett antal modeller för istryck som baseras på fysikaliska lagar. Det är genom en värmeflödesbetraktelse möjligt att förutsäga istillväxten och därmed variationen i istjocklek under en vinter. Utifrån den framräknade istjockleken går det sedan att approximera de termiska spänningarna i isen och därmed den resulterande kraften. Svårigheten med denna typ av modeller är att is är ett starkt krypande material och spänningarna i isen inte är linjärt beroende av temperaturförändringen, vilket försvårar modellerandet. Modeller som tar hänsyn till krypningen har visat god förmåga att förutsäga uppmätta termiska spänningarna i isen i en liten reservoar i Norge (Petrich, o.a. 2015). Den fysikaliska modellen av Petrich, et.al (2015) är den andra modell som använts i detta projekt.

Båda dessa modeller är utvecklade mot mätningar med Carter-paneler som är en annan mätmetod än den islastpanel som används i Sverige. En Carter-panel består

av tre oljefyllda flat-jacks som placeras i en sågad slits i istäcket eller på dammen. Ett antal potentiella problem har identifierats med dessa paneler och det är osäkert hur representativa de mätningarna är för islasten mot dammen (Johansson, Malm och Fransson 2014).

1.2 SYFTE OCH METODIK

Syftet med projektet är att utvärdera modeller för att förutsäga istryck och jämföra dessa mot de uppmätta istrycken vid Rätan.

Detta görs genom att testa två befintliga modeller, där utvärderingen består dels av att det uppmätta trycket jämförs mot befintliga modeller/teorier av istryckets variation och även att framtida istryck predikteras med samma modeller. De valda modellerna är

- Den halvempiriska modellen föreslagen av (Comfort, Gong, o.a., Static ice loads on dams 2003).
- En mekanisk modell där istillväxt och istryck modelleras utifrån värmeflöden i isen. Isen modelleras med Norton-krypning enligt (Petrich, o.a. 2015).

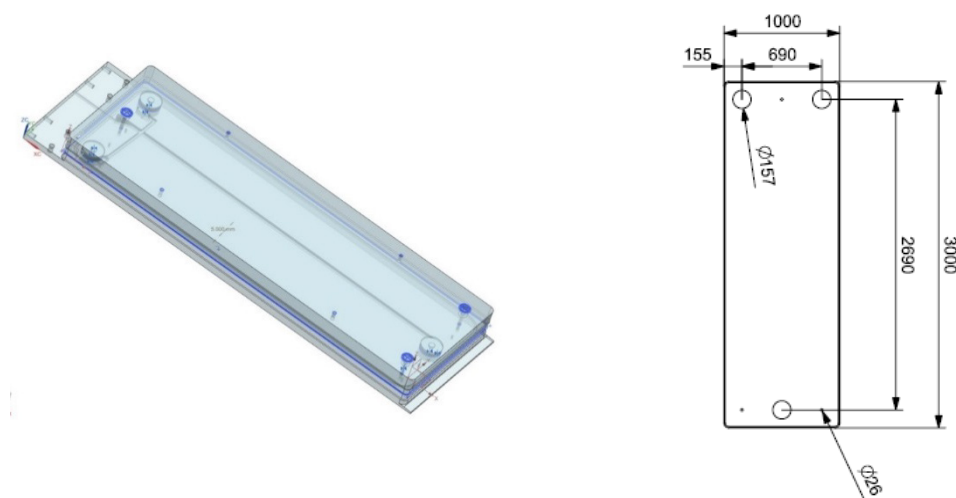
Utifrån de testade modellerna skapas en prediktion över hur istrycket förväntas variera under vintern 2018/2019. Efter vintern utvärderas sedan prediktionen mot utfallet från mätningarna och resultaten sammanfattas. För detta har en blind prediktion används där mätningarna från 2016-2018 använts för att kalibrera och träna modellerna. Därefter har en prediktion av vintern 2019 genomförts utifrån de yttre förhållandena vid dammen men innan resultaten från den vinterns mätning varit känt. På så sätt har modellernas förmåga att förutsäga framtida istryck eller istrycksmätningar utvärderats. Förhoppningen är att stärka tilltron till både mätningarna och modellernas riktighet genom att erhålla liknande resultat från de två metoderna.

2 Istrycksmätningar och relaterad data

I detta kapitel ges en kort beskrivning av lastpanelen för islastmätning. Dessutom presenteras mätdata från islastpanelen samt övrig data som är viktig för projektet, så som klimatdata uppmätta vid dammen och av SMHI. En utförligare presentation av mätutrustning och resultat finns presenterat i Energiforskrapporten *”Lastförutsättningar avseende istryck”* (Malm, o.a. 2017).

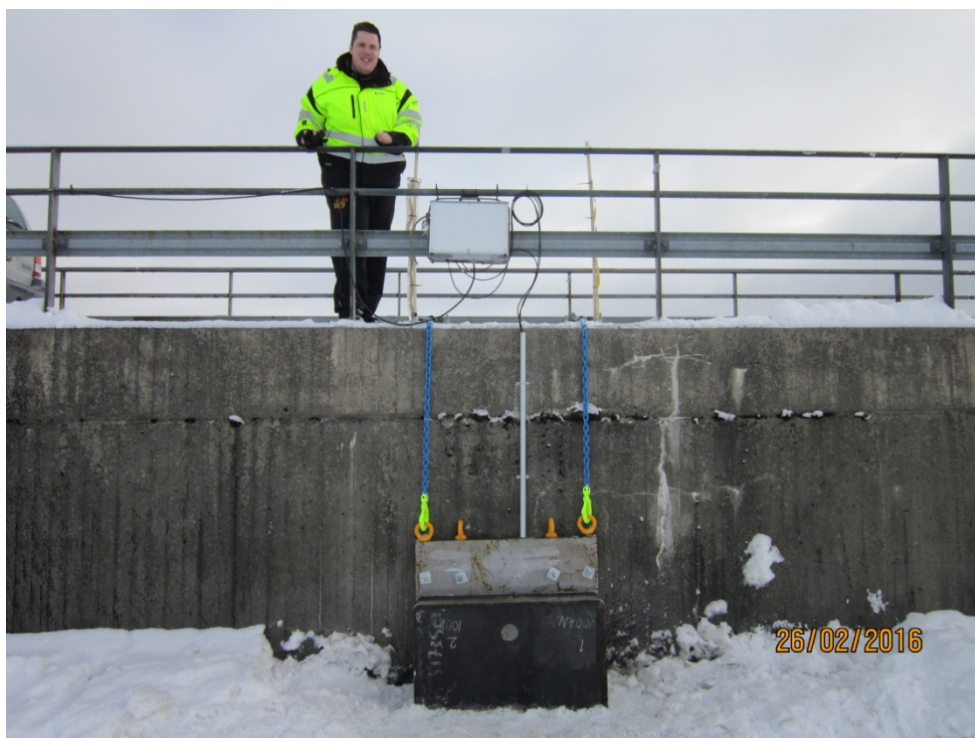
2.1 PANELEN

Lastpanelen som sitter installerad på betongdammen vid Rätan kan enklast beskrivas som en stor hängande våg. Den består av två stålplattor, ett lock och en bottenplatta. Locket som är i kontakt med isen utgör den effektiva arean, dess utformning framgår av Figur 2-1. Den består av 160 mm homogent stål och är upplagd på tre lastceller av typbeteckningen HBM (50t, C2) som mäter tryckkrafter. Vid lastcellerna är locket och bottenplattan fästa i varandra genom förspända skruvförband vilka har en sfärisk kontaktyta mot undersidan av det plana locket. På så sätt är locket att beakta som fritt upplagt på de tre lastcellerna. Vid ytterkanten av locket är en tätning fäst mellan lock och bottenplatta. Tätningen består av en o-ring i ett spår runt bottenplattan och ett vulkaniserat gummiskydd runt sidorna.



Figur 2-1. 3D och planskiss över lastpanelens lock med plats för de tre lastcellerna. Mått i mm.

Lastpanelen monterades vid Rätans damm den 25 februari 2016. Signalen från de tre lastcellerna är kopplades till en mätförstärkare (Spider8) och vidare till en Dell laptop. Mätprogrammet (Catman) användes för långtidsmätning med registrering av mätvärden var 5:e minut. Laptop och förstärkare placerades i en isolerad låda rakt ovanför lastpanelen. Figur 2-2 visar panelen dagen efter att den monterades. Den ljusare grå plåten är bottenplattan vilken är fäst i lamelldammens frontplatta med bultar. Den mörkare grå plåten är locket. Utöver infästningen i dammens frontplatta hänger även panelen i två kedjor med fästen uppe på brobanan.

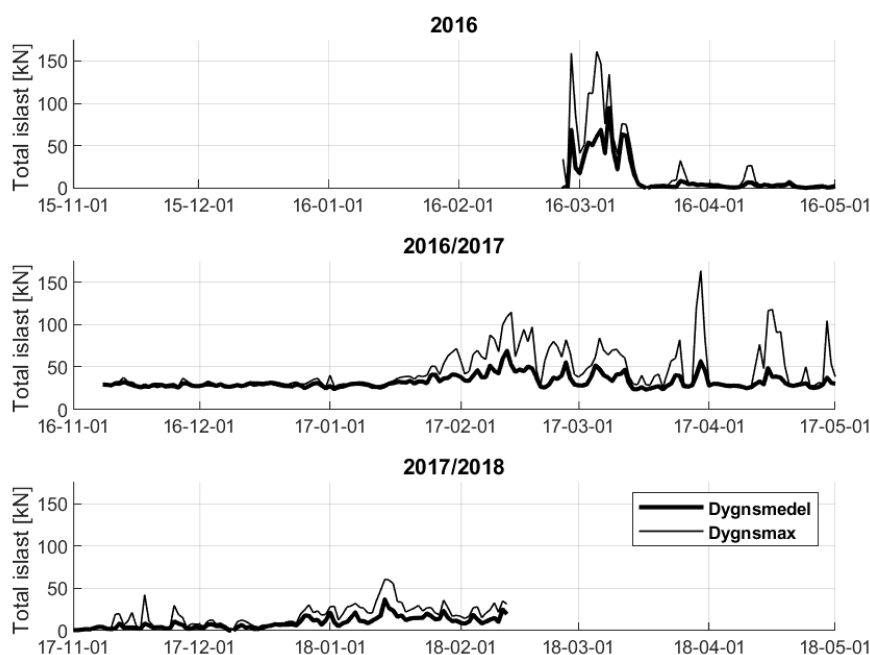


Figur 2-2. Lastpanelen och Rikard dagen efter installationen vid Rätans damm. Lastcell nr 1 (HBM_1) ses till höger och lastcell nr 2 (HBM_2) till vänster. Lastcell nr 3 (HBM_3) finns centralt ca 2,2 m under isytan.

Lastpanelen monterade med de övre lastcellerna ca 0,5 m över den dåvarande isytan på nivå +350,85 m. I samband med installationen återfylldes det hål som sågats ut med krossad is och snö. Återfrysning påbörjades på kvällen den 25:e februari och data från mätningar därifrån och framåt finns tillgängliga.

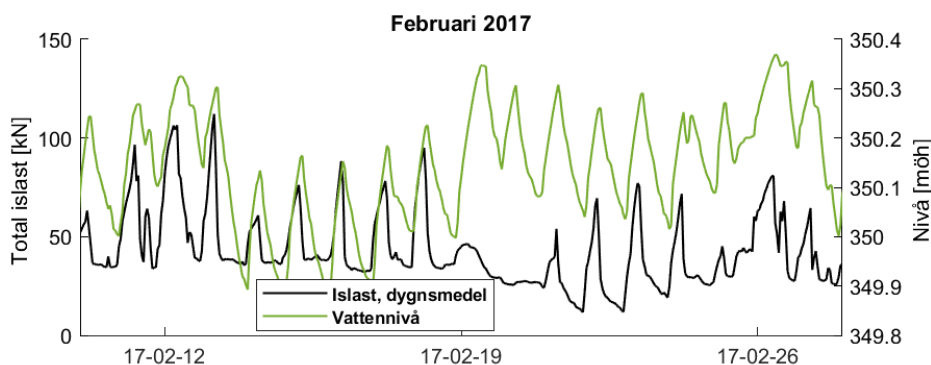
Den första vinterns mätningar avslutades under sommaren 2016 och mätningen pausades då. Den startades igen den 8 november och säsongen 2016/2017 pågick mätningar av islasten fram till den tredje maj. Den 26 oktober startades mätningarna för vintern 2017/2018, vattenytan i magasinet var då isfri. Den 12 februari 2018 kraschade mät datorn av okänd anledning. Då detta inte upptäcktes förrän i maj när den vinterns mätningar hämtades, innebär detta att mätvärden från vårvintern 2018 saknas. Det innebär att den enda kompletta mätsäsongen är vintern 16/17. En noggrann presentation av mätningarna finns i Energiforskrapporten "*Lastförutsättningar avseende istryck*" (Malm, o.a. 2017).

I Figur 2-3 presenteras dygnsmax och dygnsmedelvärde för de tre mätsäsongerna och i Figur 2-4 visas data från februari 2017.



Figur 2-3 Dygnsmedelvärde och dygnsmax från islastmätningar vid Rätans betongdamm för vintrarna 2016, 2016/2017 och 2017/2018.

Den viktigaste slutsatsen i det tidigare projektet är att islasten följer ett dagligt mönster relaterat till driften av aggregaten, och därigenom vattenstandsvariationen. Figur 2-4 visar islast och vattennivå under februari 2017. Den visar hur islasten växer till en daglig topp och sedan snabbt avtar. Denna topp är starkt korrelerad med vattennivån. När turbinen stängs av, börjar islasten öka och fortsätter medan tillrinning till magasinet sker. Maxlasten sker precis innan turbinen startas och vattennivån i magasinet börjar sjunka.

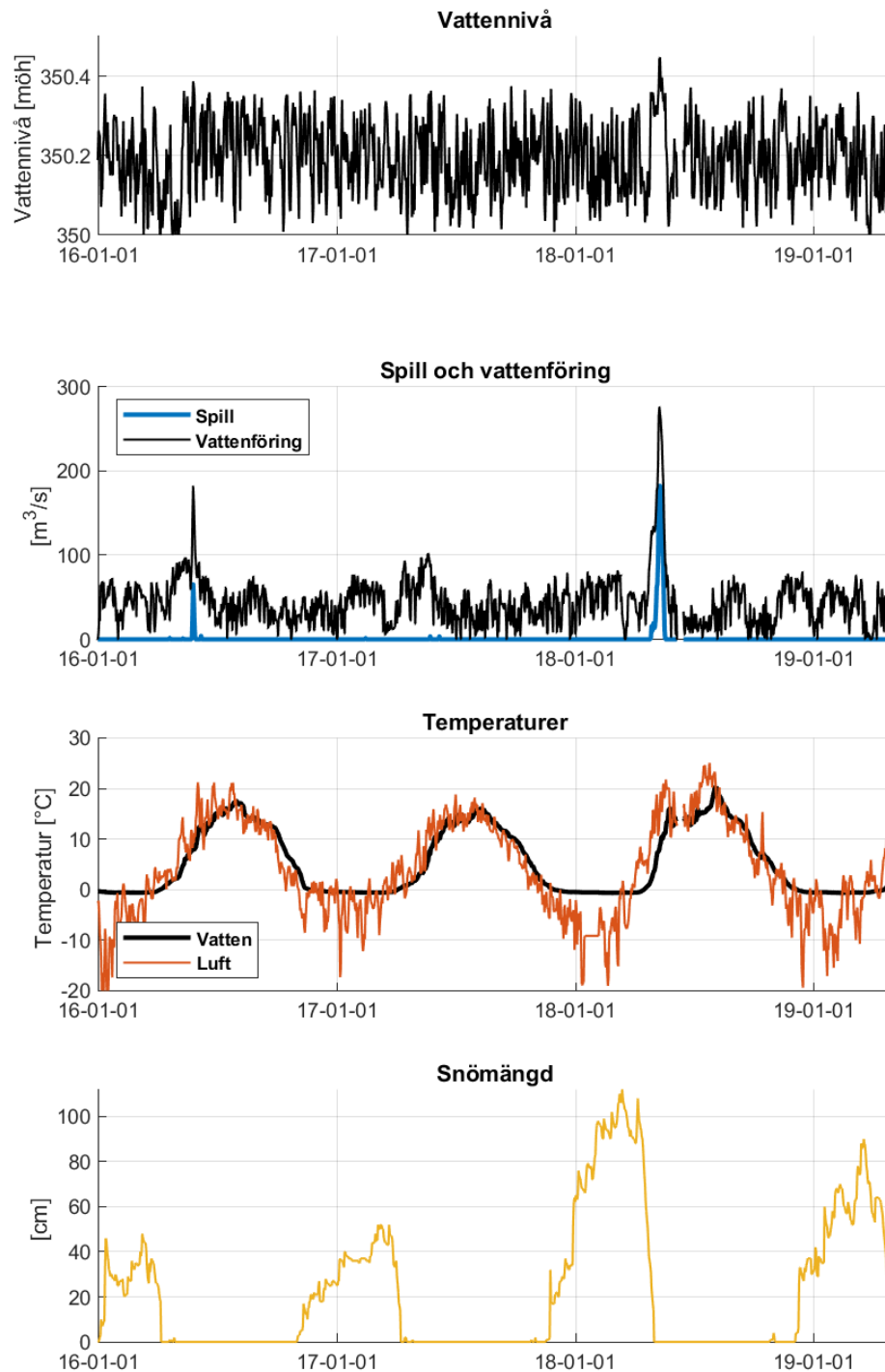


Figur 2-4 Islast och temperatur under våren 2017 samt vattennivå, lastresultant och islast från februari 2017.

En observation i Figur 2-4 är att islasten inte följer vattenståndsvariationen den 19/2 och 20/2. Det sammanfaller med att den största ökningen (ca + 0,3 m) av vattenyta. En liknande tendens kan ses vid den 13 februari, då den största avsänkning inom denna period sker (ca – 0,4 m). Direkt efter detta så är islasten lägre efterföljande dygn medan den successivt växer. Detta kan vara indikation på att vattenståndsvariationerna knäckt istäcket (skapat sprickor), och att när väl sprickorna fyllts på med ny is så uppstår högre islaster igen.

2.2 YTTRE FAKTORER

Utöver islastmätningar finns även tillgänglig mätdata för flera yttre faktorer. Dessa data kommer från mätningar vid dammen som är relaterade till dammsäkerhetsarbetet och vattendomar samt från SMHI (SMHI 2018). I Figur 2-5 presenteras dygnsmedelvärden för ett urval av mätdata. Rådata har olika samplingsfrekvens. Vattennivån som registreras med kvartsvis mätfrekvens, data på vattenföring genom aggregatet, spill i utskoven, vattentemperatur i magasinet som mäts på tre meters djup samt lufttemperaturen vid dammen sparas varje timme. Dagliga värden för snömängd från SMHI finns tillgänglig från väderstationen Rätan-Handsjön som ligger ca 7 km öst om dammen (i nedströmsriktningen).



Figur 2-5 Klimat och hydrologisk data för Rätans damm.

3 Modellering av istjocklek på sjöar

En viktig parameter för att bestämma istrycket är isens tjocklek. Istjockleken kan mätas direkt vid dammen genom borrhål eller som ett alternativ, beräknas med hjälp av modeller för istillväxt. I detta kapitel presenteras några olika metoder för ismodellering. I detta kapitel beskrivs metoder för att beräkna tillväxten av statisk is, vilket är isbildning i stillastående vatten. Statisk isbildning styrs av värmeflödet och sker genom en istillväxt som sker i tjockleksriktningen för isen. Dynamisk istillväxt uppstår vid vatten i rörelse och sker genom att vattnet transporterar mindre isbitar som sedan fryser ihop till en massa. Den dynamiska istillväxten sker i uppströmsriktningen genom en kombination av fenomen. Vattenhastigheten 0,3 m/s är ett rekommenderat gränsvärde för när isbildningen kan behandlas som statisk och därmed för metoderna i detta kapitel (USACE 2002).

3.1 STEFANS EKVATION

En enkel modell för att uppskatta istjockleken är att använda Stefans ekvation (USACE 2002). Enligt Stefan ekvation kan istjockleken uppskattas utifrån ackumulerade frysgraddagar (AFDD) enligt:

$$h = \alpha \sqrt{\text{AFDD}} \quad (3.1)$$

Där h är istjockleken och α är en koefficient som bestäms beroende på lokala förhållanden. Rekommendationer för olika värden på koefficienten finns presenterade i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Rekommendationer för olika värden på koefficienten α , från USACE (2002).

	α
Sjö utan snö, utsatt för blåst	2,7
Sjö med snö	1,7-2,4
Vattendrag med snö	1,4-1,7
Mindre vattendrag i skyddad terräng	0,7-1,4

3.2 ISTJOCKLEK ENLIGT COMFORT ET.AL (2003)

Comfort et.al (2003) föreslår att istjockleken kan uppskattas från metrologiska data av lufttemperatertur och snömängd genom en värmeflödesbetraktelse. Allmänt är värmeflödet i en godtycklig punkt i isen på avståndet y under isytan

$$q(y) = k_i \frac{dT(y)}{dy} \quad (3.2)$$

där k_i är värmeledningsförmåga hos is (2,24 W/m·°K), $T(y)$ är temperaturen vid punkten y och $q(y)$ är värmeflödet. Vidare gäller att:

$$\frac{dq(y)}{dy} = \frac{\rho_i C_p dT(y)}{dt} \quad (3.3)$$

där ρ_i är isens densitet och C_p specifik värmekapacitet.

Mängden is som bildas vid isbotten på djupet h_i kan beräknas utifrån en jämvikt mellan värmeflödet från isbotten genom isen och den energi som krävs för att omvandla nollgradigt vatten till is:

$$-q(h_i) = \rho_i \lambda \frac{dh_i}{dt} \quad (3.4)$$

där $\frac{dh_i}{dt}$ är isbildningen och λ är smältentalpin för is.

Comfort et.al (2003) presenterar en modell där istjockleken modelleras enligt ovan med en värmeflödesanalys. I modellen beaktas två typer av istillväxt beroende om infrysningen sker vid isbotten eller från vatten ovanpå isen. Så länge det finns vatten eller slask ovanpå istäcket fryser detta innan istillväxten fortsätter på undersidan av isen.

Modellen betraktar snön och isen som varsin cell, där istillväxten från vatten på isen beräknas enligt följande

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{\rho_i \lambda} \frac{-T_a}{\frac{h_s}{k_s} + \frac{1}{H_a}} \quad (3.5)$$

där k_s är värmeledningsförmåga hos snö, h_s är snötjockleken på isen, T_a är lufttemperaturen och H_a är det yttre värmeövergångsmotståndet mellan snö och luft. När allt vatten ovanpå isen frusit sker istillväxten istället från botten av isen. Då måste även värmeflödet genom isen beaktas.

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{\rho_i \lambda} \frac{T_m - T_a}{\frac{h_s}{k_s} + \frac{h_i}{k_i} + \frac{1}{H_a}} \quad (3.6)$$

Här är k_i , värmeledningsförmåga hos is, h_i är istjockleken och T_m är temperaturen vid botten av isen (0 °C).

För att beräkna om istillväxten sker vid ytan eller botten av isen görs en kontroll om tyngden från snön fått isen att sjunka och därmed översvämma isen. Detta görs genom att beräkna erforderligt snödjup för att sänka isen h_s' enligt ekvation (3.7) och detta jämförs det med aktuellt snödjup.

$$h_s' = \frac{\rho_w}{\rho_s} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) h_i \quad (3.7)$$

I modellen används tidssteget ett dygn med medelvärden för temperaturen. Snödjupet bestäms genom att mäta det direkt på isen eller från en närliggande

snömättningsstation. Används data från snömätning på land är två saker som kommer avvika för snödjupet på isen jämfört det på land. Dels kan snö försvinna då isytan trycks ner under vattenytan enligt ovan, för detta ska en minskning av snödjupet med 5 cm ska göras enligt (Comfort, Gong, et al., Static ice loads on dams 2003). Dessutom kan snödjupet öka först efter att isen frusit. När inte data för snömängd mätt på isen finns, kan SMHI:s närmaste snömättningsstation användas och därefter korrigeras enligt ovan.

3.3 FINITA DIFFERENS METODEN

Som alternativ till det tillvägagångssätt som beskrivs av Comfort et al där isen endast modelleras som en cell har Fredriksson och Persson (2005) använt en uppdelning i flera celler. Varje cell har getts en fast storlek (i deras fall 0.1 m) och sen har antalet celler utökats då isen "fyllt" en cell. Värmeflödesekvationerna för respektive cell har lösts med finita differensmetoden. För en cell n i mitten av isen gäller att värmeflödet in respektive ut ur cellen vid tiden t är.

$$q_n^{in} = -k_i \frac{T_n^{t+1} - T_{n-1}^{t+1}}{d} \quad (3.8)$$

$$q_n^{ut} = -k_i \frac{T_{n+1}^{t+1} - T_n^{t+1}}{d}$$

Vidare beror skillnaden mellan ingående och utgående värme flöde på temperaturförändringen i cellen under ett tidssteg.

$$q_n^{in} - q_n^{ut} = \rho_i C_p (T_n^{t+1} - T_n^t) \quad (3.9)$$

Delas istjockleken upp i $N-1$ celler med tjockleken d och sista cellen har tjocklek d_N kan det linjära ekvationssystemet för värme flödet organiseras i ett ekvationssystem enligt:

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y} \quad (3.10)$$

Där $\mathbf{T}$ är de temperaturer som ska beräknas för tidssteg $t+1$, och $\mathbf{Y}$ är en vektor innehållande kända parametrar för tidssteg i

$$\mathbf{Y}_1 = -\frac{k_i T_0 dt}{\frac{d}{2}} - C_{p,i} \rho_i d T_i^k \quad (3.11a)$$

$$\mathbf{Y}_n = -C_{p,i} \rho_i d T_i^k \quad (3.11b)$$

$$\mathbf{Y}_N = -C_{p,i} \rho_i d_N T_i^k \quad (3.11c)$$

och $\mathbf{A}$ är en styvhetsmatris enligt följande

$$A_{1,1} = -\frac{h_i k_i dt}{h_s d} - C_{p,i} \rho_i d \quad (3.12a)$$

$$A_{1,2} = \frac{k_i dt}{d} \quad (3.12b)$$

$$A_{n,n-1} = A_{n,n} = A_{n,n+1} = \frac{k_i dt}{d} \quad (3.12c)$$

$$A_{N,N-1} = \frac{k_i dt}{\frac{d}{2} + \frac{d_N}{2}} \quad (3.12d)$$

$$A_{N,N} = \frac{k_i dt}{\frac{d}{2} + \frac{d_N}{2}} + \frac{k_i dt}{\frac{d_N}{2}} - C_{p,i} \rho_i d \quad (3.12e)$$

När temperaturen genom isen är beräknad kan istillväxten från botten beräknas som

$$dh_i = -\frac{1}{\rho_i \lambda} \frac{T_n}{\frac{d_N}{2}} dt \quad (3.13)$$

där T_n är temperaturen i den sista cellen och d_N är tjockleken på den sista cellen.

4 Modellering av istryck

I detta kapitel beskrivs två modeller för att beräkna istrycket mot en damm. De valda modellerna är enligt tidigare:

- Den semi-empiriska modellen föreslagen av (Comfort, Gong, o.a., Static ice loads on dams 2003).
- En mekanisk modell där istillväxt och istryck modelleras utifrån värmeflöden i isen. Isen modelleras med Norton-krypning enligt (Petrich, o.a. 2015).

4.1 COMFORT ET AL (2003)

En semi-empirisk modell som utvecklats av Comfort et.al (2003) baseras på istrycksmätningar vid nio Kanadensiska dammar under en nioårsperiod. I modellen består den totala islasten, LL_{Total} , av fyra delar.

$$LL_{Total} = \Delta LL_T + LL_{WL} + LL_R + LL_C \quad (4.1)$$

Där ΔLL_T är termisk islast, LL_{WL} islast från vattenståndsförändringar, LL_R är residualislasten vilken är den islast som finns innan ett termiskt event påbörjas. LL_C är en extra säkerhetsparameter för att den predikterade islasten inte ska understiga den verkliga islasten, och är därför snarare en designparameter.

Värdet på LL_C sattes till 25 kN/m då det värdet innebar att modellen alltid gav högre prediktion än mätningarna, när kravet sänktes till att 90 % av de predikterade lasterna var högre än mätningarna kunde LL_C sänkas till 13 kN/m (Comfort et al. 2003).

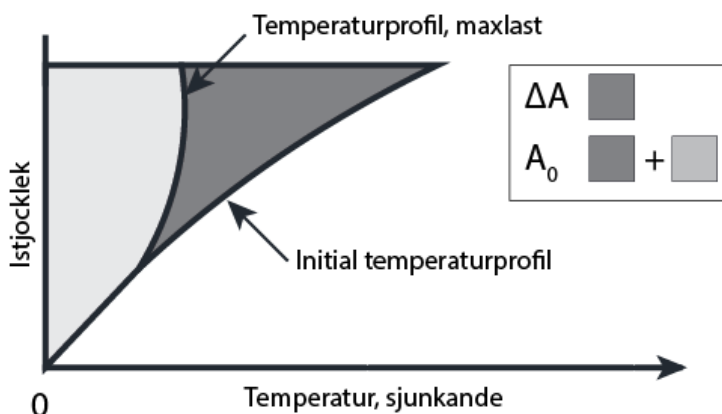
De fyra delarna beräknas genom att utifrån metrologisk data beräkna följande

1. Istjocklek
2. Snötäcke
3. Förekomsten av "slask"
4. Istemperaturprofil
5. Islast

En genomgång av metoder för beräkningssteg 1-4 finns i Kapitel 3. Utifrån dessa steg går ett antal parametrar att bestämma.

4.1.1 Definitioner

Beräkning av islast baseras till stor del på en storhet som kallas temperaturprofilarea (Comfort, Gong, et al., Static ice loads on dams 2003). Den definieras som den integrerade temperaturen över hela isens tjocklek och har enheten °C·cm, där en illustration av temperaturprofilarean visas i Figur 4-1.

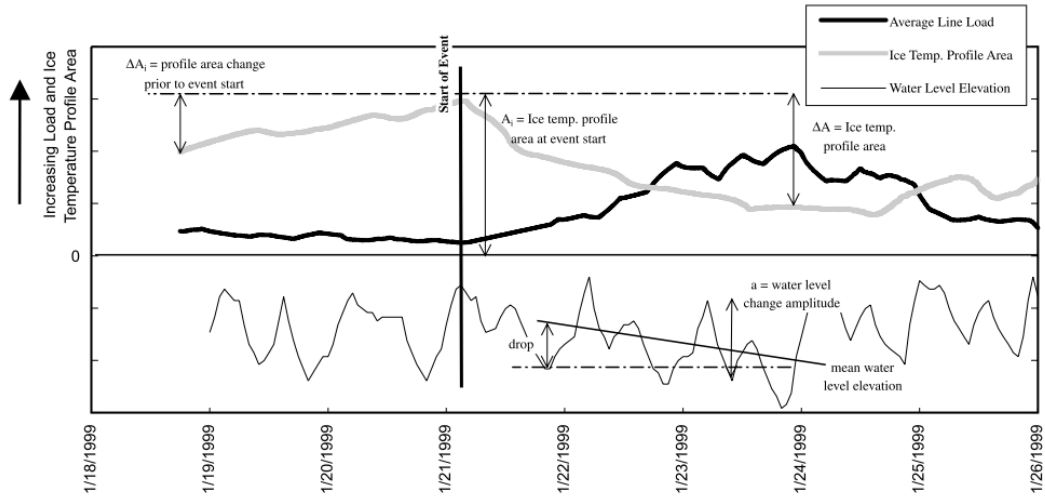


Figur 4-1 Temperaturprofilarea där A_0 är temperaturprofilarean vid början av ett islastevent och ΔA är den förändring som sker från början av eventet tills maxlasten uppstår, återskapad baserad på. Temperaturprofilarea sjunker när temperaturen stiger (Comfort, Gong, et al., Static ice loads on dams 2003).

I modellen används ett antal parametrar som presenteras i Tabell 4-1 och illustreras i Figur 4-2. I tabellen presenteras även max- och minvärden för de olika variablerna för att modellen ska vara giltig.

Tabell 4-1 Modellparametrar och dess max och min värden för modell presenterad av Comfort et al (2000).

Namn	Betäckning	Enhet	Max	Min
h	Istjocklek	cm	90	25
A	Temperaturprofilarea	°C·cm		
ΔA	Förändring i temperaturprofilarea	°C·cm	448	0
ΔA_i	Förändring i temperaturprofilarea innan början av ett islast-event	°C·cm	530	0
A_m	Maximal temperaturprofilarea, $20 \times h$	cm	-	-
A_0	Temperaturprofilarea vid början av ett islast-event	°C·cm	608	608
Dur	Event-tid	Days	14,2	7
$drop_{index}$	Förändring i medelvattenyta	Cm	50	-50
a	Vattennivåförändring	cm	51	7



Figur 4-2 Definition av ingående modellparametrar i modellen, från Comfort et al (2003).

4.1.2 Termisk islast

Den termiska islasten beräknas som:

$$\Delta LL_T = 0.064 \Delta A^{0.6} h^{0.88} \text{Dur}^{f(\Delta A)} \quad (4.2)$$

där

$$f(\Delta A) = \min \left[\log \frac{160}{\Delta A}; 0 \right] \quad (4.3)$$

4.1.3 Islast från vattennivåförändring

Vattennivåförändringens bidrag till islasten beräknas som:

$$LL_{WL} = F_1 \left[5 + 7.5 \times 10^{-8} \Delta A^2 \frac{A_1^{1,2}}{\text{Dur}^{0,4}} \right] \quad (4.4)$$

Där F_1 tar hänsyn till storleken på nivåförändringen i relation till istjockleken samt över hur lång tid förändringen sker. Dessa beräknas som en produkt enligt:

$$F_1 = f(\Delta A_1) f(drop) f\left(\frac{a}{h}\right) \quad (4.5)$$

Drop-indexet är förhållande mellan den absoluta vattennivåförändringen och istjockleken enligt:

$$drop_{index} = \frac{|drop \text{ or rise}|}{2h} \quad (4.6)$$

Utifrån detta beräknas sedan

$$f(drop) = \max \left[0; 1 - 20 \left(\frac{drop}{2h} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

Funktionen $f(\Delta A_1)$ beskriver interaktionen mellan termiska islaster och islaster från vattenståndsvibrationer.

$$f(\Delta A_1) = \max \left[0; 1 - 4 \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^{1,4} \right] \quad (4.8)$$

Termen a/h beskriver förhållandet mellan medelamplituden för vattenståndsvibrationer och istjockleken.

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = \frac{1}{\max \left[0,22; \left(\frac{a}{h} \right) \right]} \quad (4.9)$$

4.1.4 Residuallast

Residuallasten beskriver det grundtryck som byggs upp i isen över vintern.

$$LL_R = 0,37(h - 25) + \frac{1,47}{a/h} \quad (4.10)$$

4.2 PETRICH ET AL, 2015

Utöver de empiriska modellerna finns även ett antal modeller för istryck som baseras helt på fysikaliska lagar. I den enklaste formen beror de termiska spänningarna i isen endast av de töjningar som uppstår när isen förhindras från att expandera vid uppvärmning:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} = E\alpha \frac{dT}{dt} \quad (4.11)$$

där σ är den lokala spänningen (Pa), t är tiden (s), E är isens elasticitetsmodul (Pa), α är isens utvidgningskoefficient (K^{-1}) och T är isens temperatur ($^{\circ}C$). Utifrån de temperaturberäkningar som beskrevs i Kapitel 3 är det möjligt att beräkna de spänningar som uppstår i isen på grund av temperaturförändringar, genom att integrera spänningarna över istjockleken och på så sätt beräkna hur islasten varierar med tiden.

Denna modell är dock grovt förenklad och tar varken hänsyn till spricktillväxt i isen eller att is är ett starkt krypande material och spänningarna i isen inte är linjärt beroende av temperaturförändringen. Bergdahl (1978) föreslog att isens termiska

spänningar beskrivs genom en elastisk-viskös modell. Detta åstadkoms genom att addera en dämpande faktor till Ekvation 4.11 enligt:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \left[\alpha \frac{dT}{dt} - KD \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \right] \quad (4.12)$$

Här är D isens temperaturberoende viskösa krypning (m^2/s), K (m^{-2}) och n är koefficienter för viskös deformation och σ_0 är en godtycklig referensspänning för att åstadkomma dimensionsriktighet.

Isens elasticitetmodul varierar med temperaturen, där reducerad temperatur resulterar i ökad styvhet hos isen. Detta kan beskrivas enligt:

$$E = E_0(1 - CT) \quad (4.13)$$

Där C beskriver relationen mellan isens temperatur och dess elasticitetsmodul. E_0 är ett referensvärde. Även krypningshastigheten varierar med isens temperatur, Cox (1984) föreslog därför att därför att termen KD bör ersättas med ett temperaturberoende förhållande.

$$KD = \beta \left(\frac{T_1}{T} \right)^m \quad (4.14)$$

Där $T_1 = -1$ °C är en konstant för åstadkomma dimensionsriktighet, $\beta = 2.46 \times 10^{-29} s^{-1}$ och $m = 1.92$ är konstanter anpassade från laboratorieexperiment. Sammanfattat kan de termiska spänningarna i isen beskrivas med:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E_0(1 - CT) \left[\alpha \frac{dT}{dt} - \beta \left(\frac{T_1}{T} \right)^m \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \right] \quad (4.15)$$

Petrish et al. (2015) utvecklade modellen enligt ovan för att även kunna hantera dragspänningar genom att inkludera en funktion som tar hänsyn till spänningarnas tecken. De bortsåg även från variationen i elasticitetmodul och för att slippa i förväg bestämma isens materialparametrar infördes anpassningskoefficienterna A och B

$$\frac{d\sigma}{dt} = A \frac{dT}{dt} - \text{sign}(\sigma) B \left(\frac{T_1}{T} \right)^m \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^n \quad (4.16)$$

där $\text{sign}(\sigma)$ är en funktion som får värdet +1 om $\sigma > 0$; -1 om $\sigma < 0$; och 0 om $\sigma = 0$. På så sätt kommer den dämpande delen alltid att minska spänningarna.

Petrich et al (2015) anpassade faktorerna A , B , och n mot mätningar av isspänningar i ett magasin vid en damm i Norge. Bäst anpassning gav $A = 200$ kPa/°C och $n = 3,7$. Värdet på B varierade mellan 2×10^2 och 2×10^4 (kPa/dygn) beroende på avståndet från mätpunkten och dammen. De större värdena gällde nära dammen medan isens krypning var långsammare längre ut i magasinet.

5 Tillämpning av modeller

I detta kapitel beskrivs tillämpningen av de modeller som beskrivits i Kapitel 3 och 4. Först beräknas istjockleken på Klövsjön för perioden 2001-2013 med de tre modellerna för istjocklek (Stefans ekvation, metoden enligt Comfort et al samt finita differensmetoden). Anledningen till detta är att SMHI har data på istjocklek för Klövsjön fram till vinter 2012/2013 och det gör det möjligt att jämföra istjockleks modellerna med mätningar. Då Klövsjön ligger endast tre mil från Rätan är de yttre förhållandena likvärdiga. Därefter beräknas istjocklek och islast vid Rätan för 2015-2019, de vintrar som islastmätningen pågått.

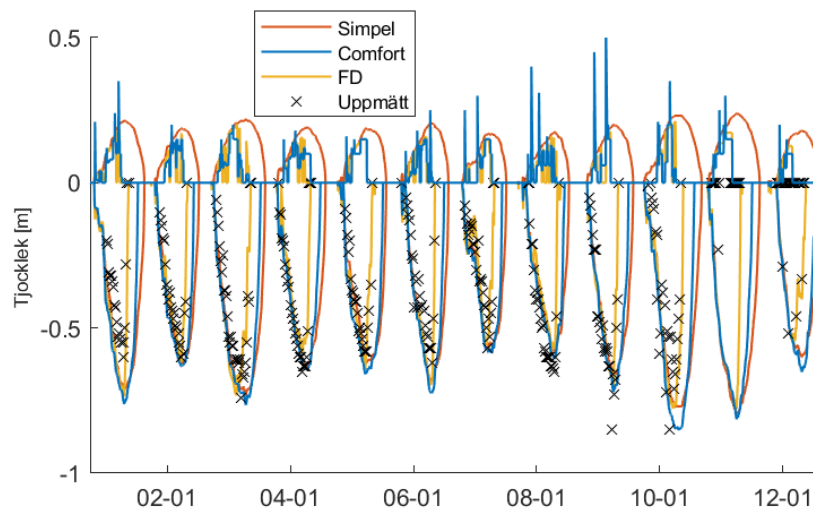
5.1 KLÖVSJÖN

SMHI genomförde fram till 2012 kontinuerliga istjockleksmätningar på svenska insjöar. Den mätstation som placerad närmast Rätans är vid sjön Klövsjön, ca tre mil från Rätan. Sjön har en area på 1,0 kvadratkilometer och ligger 437 meter över havet jämfört med Rätanmagasinet som har en area på 8,0 kvadratkilometer med dämningssgränsen +350,44 meter över havet. Den del av Rätansjön där dammen är belägen ligger i en avskärmad kanalformad del av Rätansjön. Det innebär att isbildningsförloppet på Klövsjön bedöms vara relativt lik det som sker vid dammen trots att isbildningen sker långsammare för större sjöar. Därför har mätningarna från Klövsjön används för att testa de tre istjockleksmätningarna presenterade i kapitel 3. För att modellera istjockleken har SMHI:s data för temperaturer från Klövsjön och snömängder från Rätansjön använts (SMHI 2018). För Stefans ekvation har koefficienten α satts till 2,4 vilket motsvarar en normal sjö med snötäcke. För de övriga modellerna har materialparameterar enligt Tabell 5-1 använts.

Tabell 5-1 Materialegenskaper i temperaturberäkningar, värden är tagna från Comfort, et al. (2003).

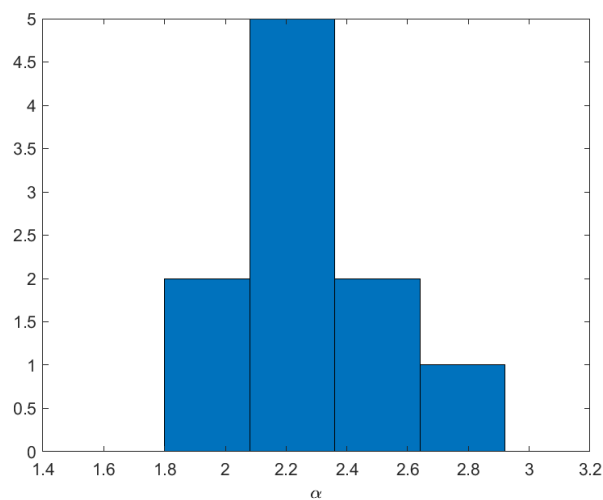
Egenskap	Enhet	Värde
Densitet, vatten	kg/m ³	1000
Densitet, is	kg/m ³	917
Densitet, snö	kg/m ³	300
Värmeledningsförmåga, vatten	W/(m ² ·K)	0,58
Värmeledningsförmåga, is	W/(m ² ·K)	2,24
Värmeledningsförmåga, snö	W/(m ² ·K)	0,29
Övergångstal, snö-luft	W/(m ² ·K)	25
Smältentalpi, is	kJ/kg	334

Figur 5-1 visar den modellerade istjockleken från de tre modellerna tillsammans med mätningarna. Resultaten från de tre modellerna ger likvärdiga resultat. Den enkla modellen baserad på frysgraddagar och Comforts modell ger bra överensstämmelse för istillväxten, men är sämre på att förutsäga issmältningen och när sjön blir isfri. Den mest avancerade modellen ger bra överensstämmelse både vid istillväxt och issmältning.



Figur 5-1 Modellerad och uppmätt istjocklek på Klövsjön, positiva värden visar snötjocklek och negativa värden visar istjocklek.

För att studera spridningen i den enkla modellen har en anpassning gjorts så att för varje vinter har det α -värde som ger bäst överensstämmelse med mätningen avseende maximal istjocklek valts. Figur 5-2 visar spridningen i koefficienter från de tolv vintrarna. Fem av tolv år hamnar koefficienten i intervallet 2,1 till 2,3, vilket motsvarar en snötäckt sjö enligt Tabell 3-1.

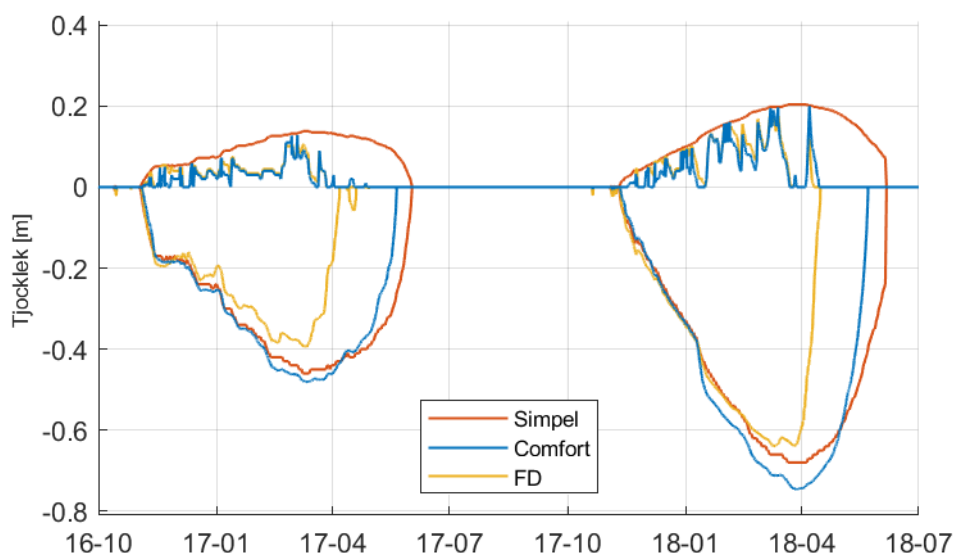


Figur 5-2 Fördelning av koefficienten alfa.

5.2 RÄTAN

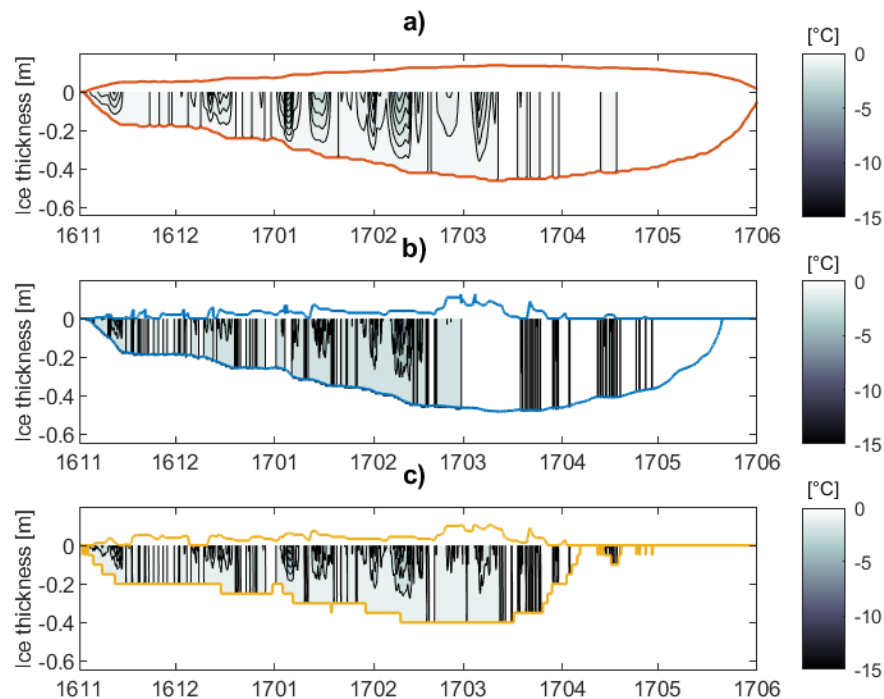
5.2.1 Istjocklek

Istjockleken vid Rätan har beräknats för säsongerna 2016/2017 och 2017/2018. För beräkningen av istjockleken med den förenklade metoden, Stefans ekvation, har $\alpha=2,3$ använts, dessutom har snömängden på isen antagits vara 30 % av istjockleken. Beräkningarna ger liknande resultat som för Klövsjön där istillväxten sker väldigt likartat för de tre modellerna. Maximal istjocklek uppstår i slutet på mars för både 2017 och 2018. Enligt den mer avancerade metoden sker sedan issmältningen snabbt och magasinet beräknas vara isfritt redan i mitten av april.



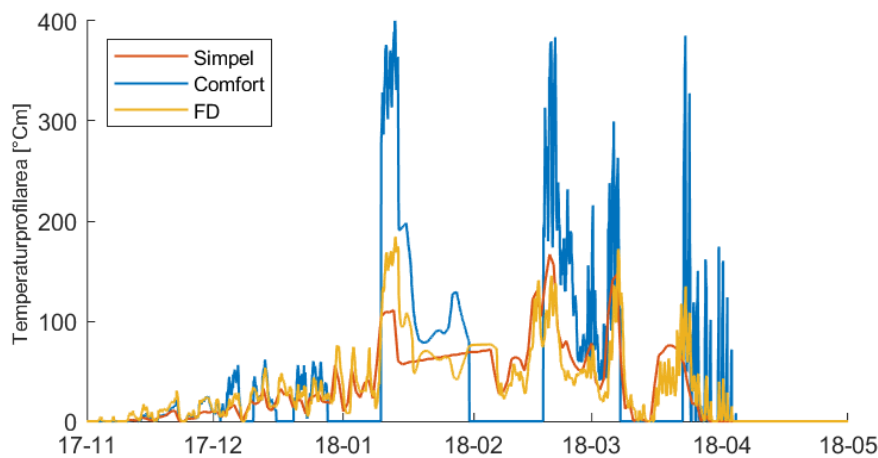
Figur 5-3 Beräknad istjocklek vid Rätans damm för säsongen 2017/2018, positiva värden visar snötjocklek och negativa värden visar istjocklek.

Beräknad temperaturfördelning i isen visas i Figur 5-4. Här går det att se en tydlig skillnad i hur temperaturen i isen varierar. Det är endast i FD som temperaturen i istäckets tjockleksriktning beräknas medan de andra metoderna uppskattar temperaturen genom ett antagande om linjär temperaturgradient. För den enkla modellen får antagandet om snömängden på isen en betydande inverkan på temperaturen i isen. Snötäcket verkar som ett isolerande lager och innebär att förändringar i omgivningstemperatur inte propagerar särskilt djupt ner i isen. I både FD och den enkla modellen så minskar istjockleken snabbt efter att snön har smält bort medan vid Comforts modell så finns det en signifikant fördröjning mellan att snötäcket är noll och att isen smält bort (ca 1,5 månad).



Figur 5-4 Beräknad temperaturfördelning i isen från november 2016 till juni 2017. a) simpel modell, b) Comfort et al. (2003), c) Finita differens.

Modellen enligt Comfort och den mer avancerade modellen skiljer sig något åt för temperaturberäkningen. I Comforts modell behandlas isen som en cell och temperaturfördelningen genom den antas vara linjär. Denna metod tar inte hänsyn till den tröghet som sker i temperaturförändringen och att det är en fördröjning innan en temperaturförändring i luften når isen. Det gör att temperaturen ändras snabbare i isen och att den även blir kallare. Detta kan även ses i Figur 5-5 där temperaturprofilarean för vintern visas för de tre beräkningsmetoderna. De tre kurvorna följer varandra men förändringen har olika storlek.



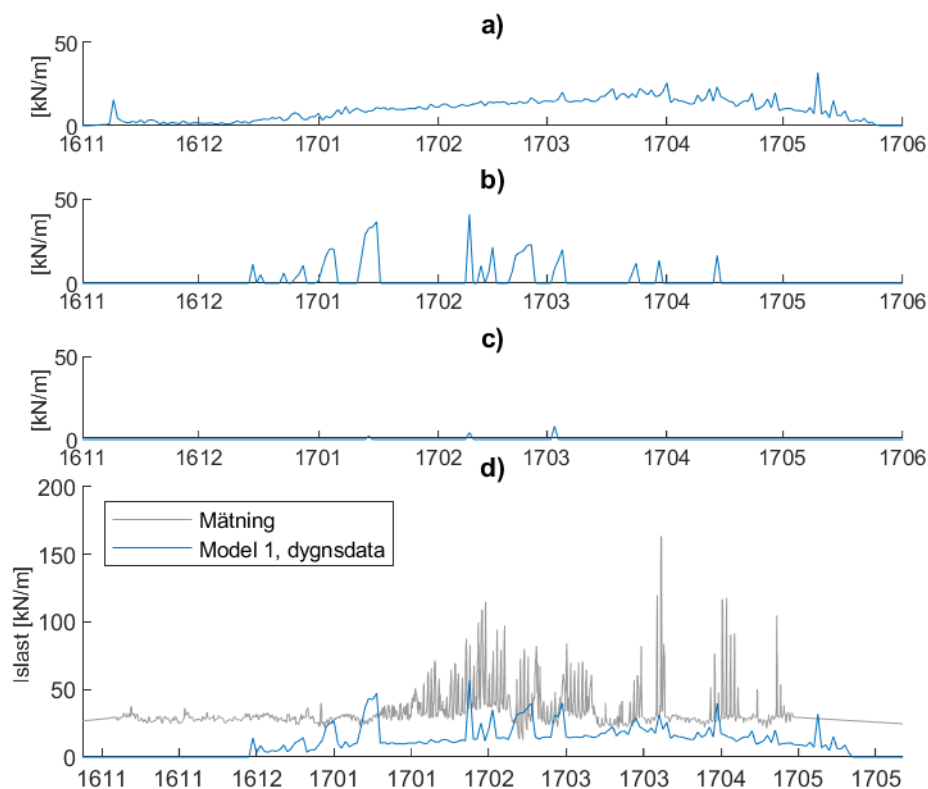
Figur 5-5 Temperaturprofilarea i isen enligt de tre metoderna.

5.2.2 Islast enligt Comfort

Utifrån de beräknade istjocklekarna och tillhörande temperaturer har Comforts modell för islast applicerats på fyra sätt, nedan kallade modell 1 - 4. I de första två modellerna används Comforts istjockleksmodell. Där testas skillnaden på att använda tidssteget ett dygn (Modell 1) respektive en timme (Modell 2). I Modell 3 används en regressionsanalys för att justera koefficienterna i modellen för att studera om bättre överensstämmelse kan uppnås jämfört med mätningarna med små justeringar av modellen. Därefter används temperatur och istjockleksdata från de andra två metoderna, FD och simpel, i Modell 4a och Modell 4b.

Modell 1: Dygnsdata

Figur 5-6 visar jämförelse mellan den förutspådda och uppmätta islasten. Beräkningarna visar viss förmåga att förutse när (i tid) topparna i islast förkommer, men ger en dålig överensstämmelse med islastens storlek jämfört med mätningarna. Sammantaget är den beräknade islasten mycket mindre än den uppmätta islasten och den maximala islasten under säsongen underskattas med faktorn 2,9 (56,9 kN/m jämfört med 163,7 kN / m) och tiden för de två toppar skiljer sig (9 februari och 30 mars). Figur 5-6 visar även de tre delarna av islastmodellen; residualislasten (LL_R), den termiska islasten (LL_T) samt islasten från vattenståndsvariationer (LL_{WL}).



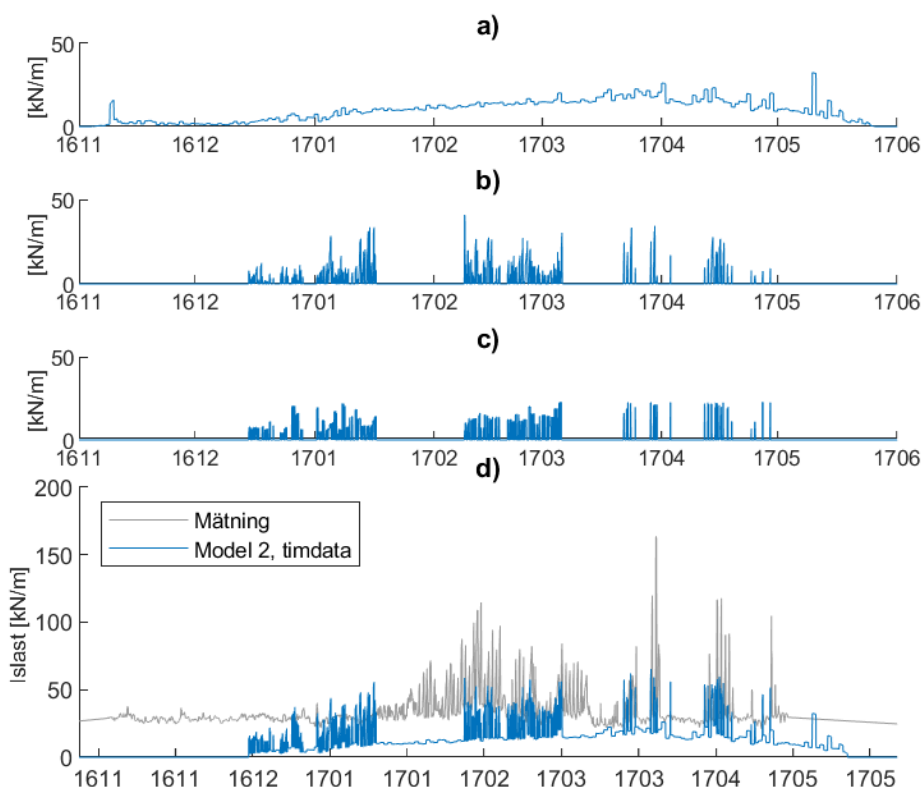
Figur 5-6 Den uppmätta och predikterade totala islasten från Modell 1 med tidssteget ett dygn, samt de tre beräknade delarna av islasten, a) residualislasten, b) termiska islast och c) islasten orsakad av variation i vattennivån, d) total islast enligt mätningar och modell 1.

Residualislasten är relaterad till istjockleken och visar snarlika mönster, med värden på cirka 20 kN/m i mitten av mars. Residuallasten får ett oväntat toppvärde i början av maj som beror på en singularitet i modellen när vattenytans dygnsvariation är nära noll. Den termiska islasten består av enstaka toppar, så kallade termiska händelser med en varaktighet av en till tre dagar och med ett maximalt värde kring 40 kN/m. De termiska islasthändelserna inträffar under de perioder då istemperaturen varierar som mest.

Den del av modellen som förutspår istryck orsakat från variationer i vattennivån förutspår endast att istryck pga. vattennivåvariation uppstår vid tre tillfällen under vintern. Storleken på dessa islaster är små jämfört med de andra delarna. Vattennivåvariationen har därför en försumbar inverkan på det förutspådda istrycket i denna modell.

Modell 2: Timdata

Figur 5-7 visar islasten beräknad med användning av temperaturdata på timbasis. Användandet av tidssteget på en timme resulterar i en ökning av antalet islasthändelser. Detta gäller både för termiska islaster och de som orsakas av variation i vattennivån. Den mest signifikanta skillnaden mellan Modell 1 och Modell 2 är den belastning som orsakas av variation i vattennivån. Detta resultat är väntat då de vattennivåvariationen som sker på dygnsbasis så små medan signifikanta förändringar sker under dygnet. Skillnader mellan analyserna för dygnsmedel respektive timvärden visar inverkan från hastiga dygnsvariationer



Figur 5-7 Den uppmätta och predikterade totala islasten från Modell 2 med tidssteget en timme, samt de tre beräknade delarna av islasten a) residualislasten, b) termiska islast och c) islasten orsakad av variation i vattennivån, d) den totala islasten.

(både vattennivå och temperatur) på islasten. När ett tidssteg på en timme används, bidrar vattenståndsvariationen till en betydande del av den totala förutspådda kraften. Även islast från temperaturvariationer ökar och det mindre tidssteget resulterar också i ökade storlek på islasttopparna. Resultaten indikerar att långsammare temperaturförändringar verkar ha en liten inverkan på islastens förändringar och att de höga islasterna har en kort varaktighet. De predikterade islasterna med timdata motsvarar bättre det uppmätta beteendet. Bortsett från en period i december uppstår toppar som beräknats med modellen under samma period som mätningen. Modellen som använder data på timbasis ger dock relativt låg överensstämmelse avseende topparnas storlek, både i verklig storlek och i förhållande till varandra.

Modell: 3

Linjär regression utfördes för att studera om en liten justering av modellen kan ge en bättre förutsägelse av den uppmätta islasten. Utifrån dagliga maxvärden av de tre delarna av linjelasten beräknad från Modell 2 ändrades ekvation 6 till:

$$LL_{Total.Adj} = \beta_1 \Delta LL_T + \beta_2 LL_{WL} + \beta_3 LL_R \quad (5-1)$$

där β_1 - β_3 är koefficienter som beräknas genom en regressionsanalys, anpassningen av koefficienterna är baserade på dygnsmax. Tabell 5-2 visar uppskattade koefficienten och p-värdet för varje modelldel. p-värdet beskriver något förenklat hur sannolikt det är att det inte finns ett samband mellan respektive del i modellen och den uppmätta islasten. Residual- och termiska islaster är båda signifikanta variabler i modellen medan lasten från vattennivåförändringen inte är det. Det höga p-värdet visar att den del av modell 2 som beräknar islast från variation i vattennivå är den del som minst överensstämmer med mätningarna.

Tabell 5-2 Regressionskoefficienter och p-värde för Modell 3.

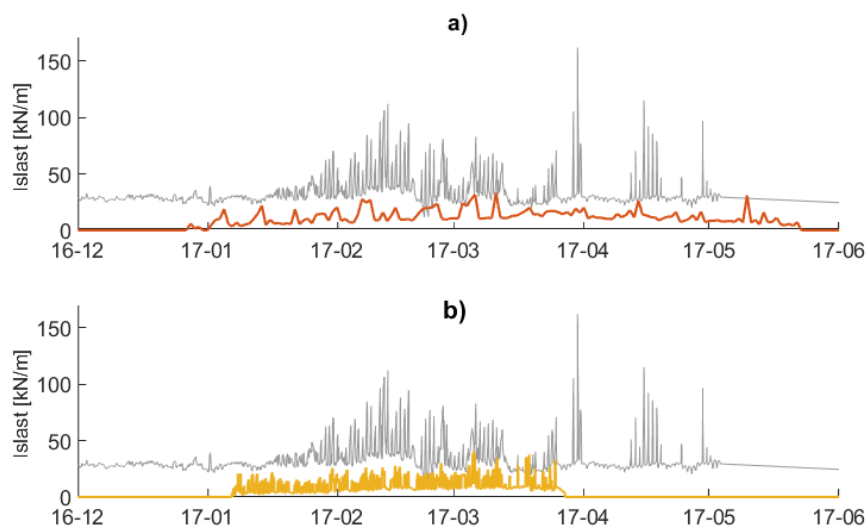
	Uppskattning	p-värde
β_1	1,02	$<10^{-6}$
β_2	0,39	0,34
β_3	2,92	$<10^{-6}$

Modell: 4

I den fjärde modellen används de andra två metoderna, Stefans ekvation respektive FD, för att beräkna istjocklek. Detta för att studera hur osäkerheter i beräkningen av istjocklek och istemperatur påverkar prediktionen av islastens storlek. Comforts modeller för istjocklek och islast är teoretiskt frikopplade från varandra, så att beräkningarna ska kunna genomföras oberoende av varandra. Modellen för islast bygger dock på empiriska koefficienter, vilka anpassats till istjocklek och temperaturer beräknade med Comforts istjockleksmodell. Koefficienterna har därför anpassats till eventuella fel i istjockleksmodellen och det är därför inte nödvändigtvis så att en eventuellt bättre modell kommer ge bättre prediktion av islasten.

I Figur 5-8 visas den beräknade islasten med de två andra metoderna. För den enkla modellen som bygger på frysdagar användes tidssteget ett dygn medan för finita differens metoden användes tidssteget en timme. Jämfört med de islaster som beräknas genom att använda Comforts modell för istjocklek (se Figur 5-4), ger dessa två metoder lägre islast och sämre överensstämmelse med mätningarna. Islasten förekommer även under andra perioder och detta visar att modellen är känslig för valet av indata. Trots att istjockleken är relativt snarlik i de olika metoderna (med undantag för smältningen under våren) så är det stora skillnader i islaster. Detta beror främst på hur temperaturen i isen beräknas och hur beräknat

snötäcke använts. Det är främst temperaturen som är den stora orsaken till avvikelser, snarare än skillnader i istjocklek.

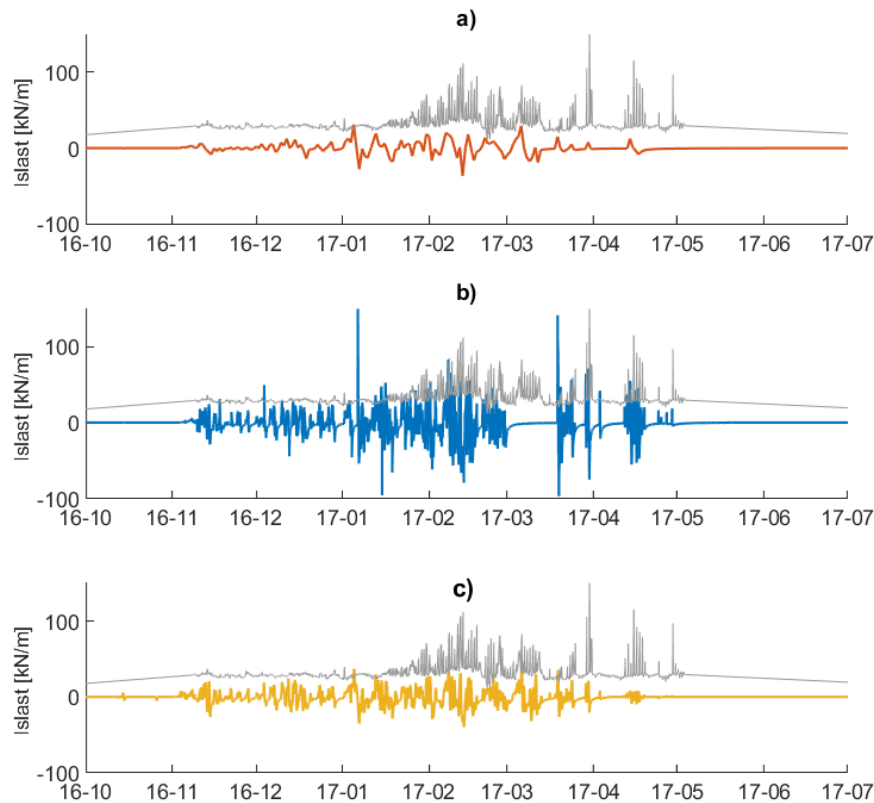


Figur 5-8 Beräknat och uppmätt istryck med Comforts islastmodell med istjocklek beräknad med a) Stefans ekvation, b) Finit differens

5.2.3 Islast enligt Petrich et al

Beräkningar av islast med den teoretiska modellen enligt Petrich et al (2015) har även genomförts för samtliga istjockleksmodeller. Modellparameterar enligt Petrish et,al (2018) har använts, vilket innebär $m=1.92$ and $n=3.7$, $T_0 = -1\text{ °C}$ och $\sigma_0=100\text{ kPa}$. $B=342\text{ kPa/dygn}$.

Resultaten för de tre islastberäkningarna visas i Figur 5-9. En avvikelse jämfört med både mätningar och Comforts modell är att modellen från Petrisch m.fl. (2018) förutspår att dragkrafter uppstår och att dessa kan vara i samma storleksordning som tryckkrafterna. Anledningen till detta är antagandet i Ekvation 4-16 om att isen är förhindrad både från att krympa och expandera. Det innebär att när isen kyls uppstår dragkrafter och först när isen varit kall under en period har dessa dragkrafter reducerats på grund av isens krypning. Det är i detta tillstånd, med en kall och spänningslös is, följt av en uppvärmning som tryckkrafter uppstår.



Figur 5-9 Beräknad islast med modell enligt ekvation (4-16) som baseras på tre olika fall med istjocklek beräknad med a) Comfort, b) Stefans ekvation, och c) FD. Positiva krafter är krafter som trycker på dammen.

Även här ger de tre modellerna generellt en låg överensstämmelse med mätningarna och resultaten skiljer sig mellan de tre olika istjockleksmodellerna.

5.2.4 Sammanställning

En sammanställning av mätresultat, modeller och jämförelsen mellan dessa presenteras i Tabell 5-3. Determinationskoefficienten (R^2) anger hur stor del av variationerna i islasten som förklaras av respektive modell, den har ett värde mellan 0 och 1 där ett högre värde motsvarar bättre överensstämmelse. Root mean square error (RMSE) är ett mått på spridningen av felen mellan modell och mätning. Sammantaget så ger samtliga modeller låg överensstämmelse med mätningarna, både avseende maxresultat och variation under säsongen. Samtliga beräkningar ger lägre maxvärden än de som uppmätts. Trots att beräkningarna av istjocklek med de tre metoderna ger likvärdiga istjocklekar så skiljer sig den beräknade islasten med samma modell avsevärt beroende på vilken modell som använts för istemperaturberäkning. Detta visar att modellerna är känsliga för eventuella felaktigheter i uppskattningen av istjockleken.

Tabell 5-3 Samanställning av uppmätt och beräknad maximala islast under vintern 2016/2017

	Istjocklek	Islastmodell	Max [kN/m]	R ²	Root mean square error [kN/m]
Mätning			164		-
Model 1, dygnsdata	C	C	57	0,10	23
Model 2, timdata	C	C	60	0,34	19
Model 3a	S	C	33	0,11	23
Model 3b	FD	C	41	0,05	23
Model 4, justerad	C	C	52	0,35	19
Model 5	C	P	97	0,07	23
Model 6	S	P	37	-	30
Model 7	FD	P	40	-	24

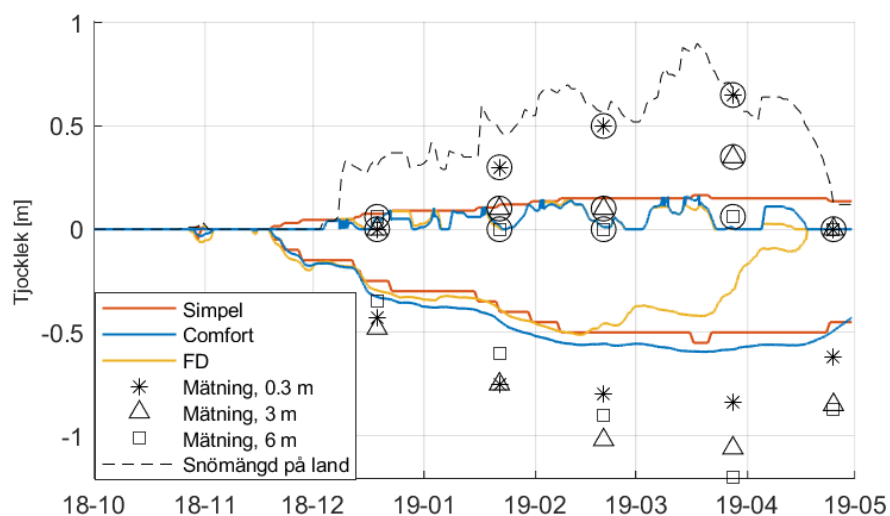
6 Prediktion av vinter 18/19.

Huvudsyftet med denna rapport var att testa befintliga modeller på mätsäsongen 2016/2017, för att utifrån den välja en modell och testa den på säsongen 2018/2019. Detta val har genomförts utifrån resultaten från säsongerna 2015/2016 och 2017/2018 utan att ta hänsyn till mätningarna från den säsongen 2018/2019. Då samtliga modeller ger en låg överensstämmelse med mätningarna är därför förhoppningen låg för att någon modell ska kunna ge en god prediktion av islasten under vintern 2018/2019. Utifrån resultaten som presenteras i Kapitel 5 är det Modell 2 (Comforts modell med tidssteget en timme) som valts då det är denna modell ger bäst överensstämmelse gällande prediktion av islastens storlek.

6.1 ISTJOCKLEK

Under vintern 2018/2019 genomfördes is- och snötjockleksmätningar i magasinet vid Rätan vid fem tillfällen. Vid varje tillfälle mättes istjocklek och snödjup på tre avstånd från dammen ut mot magasinet; direkt vid frontplattan (0 m), tre meter ut i magasinet (3 m) och sex meter ut i magasinet (6 m). I samband med mätningarna inspekterades isen visuellt och det gjordes en bedömning av andelen stöpis och kärnis. Figur 6-1 visar uppmätta tjocklekar tillsammans med de beräknade.

Isen är tunnast närmast dammen för att sedan bli tjockare längre ut i magasinet. Den motsatta relationen gäller för snön, där snön verkar samlats närmast dammen. Detta beror främst på att snö plogats ner från farbanan men kan även vara en effekt av snödrift från vind. En stor andel av isen är rapporterad som stöpis. Medelandelen för de tre mätpunkterna, från första till sista mättillfället är 74, 66; 45 samt 90 %. Den stora andelen stöpis är en möjlig förklaring till varför samtliga modeller underskattar istjockleken. Stöpis består av snö som sänkts i vattnet och där istillväxten sker från ovansidan av isen. Modellerna bygger huvudsakligen på istillväxt från botten av isen och baseras på en betraktelse av värmeflödet genom isen, även om Comforts modell inkluderar möjligheten för istillväxt från ytan.

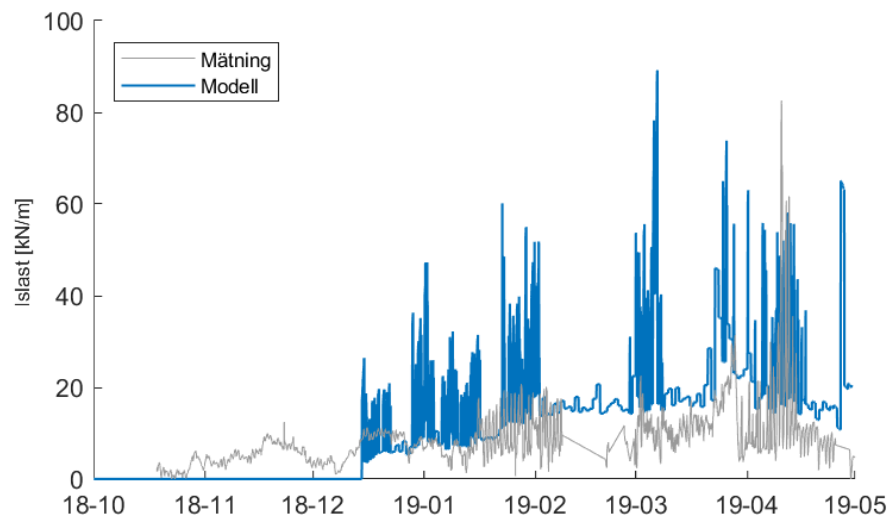


Figur 6-1 Beräknad och uppmätt istjocklek och snö mängd, de inringade symbolerna visar uppmätt snötjocklek.

Den uppskattade snötjockleken ger en bra skattning av sjötjockleken vid 3 och 6 m avstånd från dammen, men betydligt sämre utmed dammen. Snömängden nära dammen är nära den som uppmätts på land vid närliggande mätstation och det är troligt att snö samlas mot dammen.

6.2 ISLAST

Islasten för säsongen 2018/2019 beräknades utifrån den beräknade istjockleken. Jämfört med tidigare vintrar mättes lägre islaster under säsongen 2018/2019. Maxvärden om 80 kN/m uppmättes i mitten av april. Innan dess var islasterna låga med värden under 40 kN/m. Den beräknade och uppmätta islasten visas i Figur 6-2. Beräkningar och mätningar visar samma låga överensstämmelse som från tidigare vintrar. En skillnad mot tidigare år är att beräkningarna påvisar avsevärt högre islast denna vinter än de tidigare, till skillnad från mätningarna som visar det motsatta.



Figur 6-2 Beräknad och uppmätt islast för vintern 2018/2019.

7 Diskussion och slutsatser

I denna rapport har olika modeller för prediktion av istjocklek och resulterande islaster på betongdammar analyserats och jämförts mot pågående mätningar vid Rätans betonglamelldamm. När det gäller prediktion av istjocklek så gav samtliga modeller relativt samstämmiga resultat och god överensstämmelse mot mätningarna vid den närbelägna Klövsjön. Den största skillnaden mellan modellerna var prediktionen av temperaturgradienten igenom istäcket. Detta påverkade även hur lång tid det tog för avsmältningen av istäcket under sensvåren. Vid jämförelse mellan dessa prediktionsmodeller för istjockleken och de kontinuerliga mätningarna som sker vid Rätan så framgick att det var en relativt stor skillnad i tjocklek. Mätningarna vid Rätan visade även att en signifikant del av istäcket klassades som stöpis. Detta behöver utredas ytterligare, då det är möjligt att de regelbundna vattenståndsvariationer som sker vid en vattenkrafts-anläggning av denna typ påverkar istillväxten. Stöpis förväntas också ha lägre styvhet än kärnis, vilket kan ha en stor inverkan på resulterande islast. I fortsatt forskning bör det utredas dels om detta är vanligt förekommande även vid andra dygnsreglerade magasin, men även om huruvida dessa prediktionsmodeller kan behöva anpassas för att beakta detta.

Beräkningarna visar att de modeller som används i denna rapport ger låg överensstämmelse med de islastmätningar som genomförts i Sverige. Detta gäller både den maximala islasten och den relativa storleken på topparna under säsongen. Det är utifrån dagens kunskapsläge inte möjligt att avgöra vad som skiljer resultaten från mätningar i Sverige och den Kanadensiska eller Norska modellen. Potentiella felkällor är,

- Skillnader i lokala förhållanden
- Fel i de svenska mätningarna/mätmetodiken
- Fel i andra mätningar/mätmetodiker (som använts för att ta fram/kalibrera tidigare modeller)
- Fel i modellerna,
- Feltolkning eller inkorrekt applicering av modellerna.

Resultaten visade även en relativt liten skillnad i predikterad istjocklek kunde ha en stor inverkan på resulterande islast, främst på grund av skillnader i temperaturgradienter genom istäcket.

Från resultatet framgår även att modellerna främst visar en brist i att beskriva de islaster som uppkommer i mätningarna till följd av vattenståndsvariationer. Islasten från vattenståndsvariationer är den mekanism som ger det största bidraget till lasten mot dammen (Comfort, Gong, o.a., Static ice loads on dams 2003). Trots detta så är den effekten exkluderad i majoriteten av alla modeller för islaster. Det finns således ett tydligt gap mellan den mekanism som observerats i mätningar och de befintliga prediktionsmodellerna. Den modell som presenterats av Comfort och använts i denna rapport inkluderar vattenståndsvariationer, dock är det denna del av modellen som ger lägst överensstämmelse med mätningarna.

En möjlig förklaring till att detta gap uppkommit kan vara en så kallad "streetlight effect-bias". Den relativt enkla mekanismen kring termiska islaster har gjort att utvecklandet av modeller och teorier har fokuserat på detta samtidigt som islaster från vattenståndsvariationer är komplicerade att analysera. Islasten och vattennivån följer ett dagligt mönster relaterat till hur och när aggregaten i kraftstationen körs. Detta förhållande är emellertid inte absolut och är därför svårt att behandla ur ett analytiskt perspektiv. Vattennivån varierar varje dag, medan islasttoppar endast uppstår under cirka 40 dagar om året. Under dessa dagar är ökningen av islast korrelerad med den stigande vattennivån, den har dock endast en påverkan när ett antal andra kriterier är uppfyllda.

Varför islaststoppar förekommer under en dag men inte en annan, när dagarna är likvärdiga sett till yttre förhållanden, är svårare att förklara. Det finns ett antal bakomliggande faktorer som påverkar islasten från vattenståndsvariationer och för att förstå denna mekanisk måste dessa identifieras. Från tidigare observationer under mätningar har olika förklaringar föreslagits. Dessa är ofta av en mer kvalitativ art, så som att en spricka vattenfylldes och därefter frusit. En sådan mekanism är i princip omöjlig att implementera i den typen av kvantitativa prediktionsmodell som använts i denna rapport.

En förhoppning inför detta projekt var att tidigare mätningar med konventionella givare ute i reservoaren skulle kunna nyttjas för att ta fram rekommendationerna angående islastens storlek. Dessa mätningar motsvarar inte den faktiska islast som verkar på dammen, utan representerar istället ett istryck ute i reservoaren. Förhoppningen var att via mindre justeringar (t.ex. genom att skala om inverkan från olika parametrar, som i Modell 3) av befintliga modeller kunna översätta denna islast till den last som verkar direkt mot dammen. Om detta lyckas skulle det innebära stora framsteg och att det kommande arbetet med uppdatering av Svenska rekommendationer angående islastens storlek skulle kunna fortskrida mycket snabbare, eftersom detta skulle innebära att färre mätningar behöver genomföras. Tyvärr är överensstämmelsen mellan mätningar och modeller låg och denna förhoppning har inom detta projekt inte uppfyllts. Det är dock för tidigt att helt avfärda de mätningar som skett ute i reservoaren.

Resultaten i denna rapport understryker vikten av fortsatta och även utökade mätningar av islasten. För en framtida uppdatering av riktlinjerna för islast är det dock svårt att få till tillräckligt med mätningar för att skapa statistiska fördelningar på islasten. Förutom fortsatta mätningar av islasten är det därför viktigt att fortsätta utveckla modeller. Det finns ett stort behov av att undersöka hur olika parametrar påverkar storleken på islasten. Detta kan studeras genom en kombination av en systematisk litteraturoversikt med fokus på hur tidigare uppmätta islaster korrelerar mot skillnader i yttre förhållanden så som magasininform, dammhöjd och istjocklek, och numeriska beräkningar med finita elementmetoden. Syftet med dessa analyser är att kvantifiera den relativa effekten från olika parametrar på islasten och att bedöma hur trycket varierar längs dammlinjen. Dessa analyser kan förhoppningsvis utgöra basen för ett utkast till nya riktlinjer för islaster, som kvantifierar enskilda parametrar.

Det är troligt att islasten varierar längs med dammlinjen vid samma tidpunkt. Denna variation sker över korta avstånd och gör det svårt att modellera mätresultaten från enskilda sensorer med en modell som tar hänsyn till yttre faktorer. Det är därför viktigt i framtiden att fokusera på den rumsliga variationen i istryck över en hel damm och försöka fastställa hur och om det genomsnittliga trycket minskar över en hel damm-monolit jämfört med de mer lokala spänningar som mäts. Det troligen bästa sättet för detta är att använda numeriska beräkningar som också tar hänsyn till tredimensionella effekter. Eftersom is är ett olinjärt material beträffande krypning och sprickbildning, och båda dessa effekter har en viktig inverkan på istrycket, är det viktigt att sådana effekter ingår i en modell. Den teoretiska modell från Petrich (2015) som använts i denna rapport bygger på att isen kan beaktas endimensionellt och att dess totala töjningar är noll. Det är alltså möjligt att materialmodellen beskriver isens mekaniska egenskaper korrekt, men att antagandet om att den är förhindrad i både kontraktion och expansion är fel. Om materialmodellen istället används i en beräkning där isens deformationer bestäms av ett samspel mellan is och damm, där dessutom isen tillåts släppa från dammen, är det möjligt att modellen ger bättre överensstämmelse med mätningarna.

Sammanfattningsvis är våra rekommendationer att fortsätta, och om möjligt utöka, de pågående islastmätningarna i Sverige och att genom litteraturstudie och modellering koppla skillnader i yttre faktorer till skillnader i islasten. Fokus inom framtida forskning bör främst ligga på islast orsakad av vattenståndsvariationer.

8 Litteraturförteckning

- Azarnejad, A, och T M Hrudey. "A numerical study of thermal ice loads on structures." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25(3) 1998: 557-568.
- Bergdahl, L. *Thermal Ice Pressure in Lake Ice Covers*. Department of Hydraulics, Göteborg, Sweden.: Chalmers University of Technology,, 1978.
- Carter, D, D Sodhi, E Stander, O Caron, och T. Quach. "Ice thrust in reservoirs." *Journal of Cold Regions Engineering*, den 4 12 1998: 169-183.
- Comfort, G, Y Gong, S Singh, and R Abdelnour. "Static ice loads on dams." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003: 42-68.
- Fransson, Lennart. *Thermal ice pressure on structures in ice covers. Doctoral thesis 88:67D*. Luleå: Luleå University of Technology, 1988.
- Fredriksson, M, och J Persson. *Modellering av extrema istryck - studie av Pajala och Frösön*. Master Thesis, Lund: Avd för Konstruktionsteknik och Teknisk Vattenresurslära. Lunds Tekniska Högskola, 2005.
- Gebre, S, K Alfredsen, L Lia, M Sticker, och E Tesaker. "Review of ice effects on hydropower systems." *J. Cold Reg. Eng.* 27 (4), 2013: 196-222.
- Johansson, Fredrik, Richard Malm, och Lennart Fransson. *Islaster mot dammkonstruktioner-fördjupad förstudie*. Stockholm: Elforsk, 2014.
- Malm, Richard, Lennart Fransson, Eri Nordström, Marie Westberg Wilde, Fredrik Johansson, och Rikard Hellgren. *Lastförutsättningar avseende istryck*. Stockholm: Energiforsk, 2017.
- Petrich, C, I Sæther, L Fransson, B Sand, och B Arntsen. "Time-dependent spatial distribution of thermal stresses in the ice cover of a small reservoir." *Cold Regions Science and Technology*, 120 2015: 35-44.
- RIDAS TV 7.3. *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet Avsnitt 7.3 Betongdammar Tillämpningsvägledning*. Stockholm: Energiföretagen Sverige, 2017.
- SMHI. *Swedish Meteorological and Hydrological Institute Open data*. 2018. opendata-download.smhi.se (använd den 15 06 2018).
- Stander, E. "Ice Stresses in Reservoirs: Effect of Water Level Fluctuations." *Journal of Cold Regions Engineering*, den 2 20 2006: 52-67.
- Taras, André, Alain Côté, Georges Comfort, Laurent Thériault, och Brian Morse. "Measurements of Ice Thrust at Arnprior and Barrett Chute Dams." *16th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. Winnipeg, 2011. 317-328.
- USACE. *Ice engineering - Engineer Manual, EM 1110-2-1612*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 2002.

UTVÄRDERING AV MODELLER FÖR PREDIKTION AV ISLAST MOT DAMMAR

Här presenteras en utvärdering av olika modeller för att förutsäga istryck mot betongdammar. De här prediktionerna har jämförts med uppmätta istryck vid Rätans betongdamm. Beräkningarna visar att modellerna ger signifikanta avvikelser jämfört med islastmätningarna. Det gäller både den maximala islasten och den relativa skillnaden mellan dagliga islasttoppar under säsongen.

Det går inte att avgöra om orsaken till avvikelsen mellan modeller och mätningar beror på felaktigheter i modellerna, fel på mätningarna eller om det är en kombination av båda. Utvärderingen visar att avvikelsen främst beror på den del av islasten som uppkommer av variationer i vattenståndet.

Tidigare studier visar att variationer i vattennivån är den mekanism som resulterar i de största islasterna mot dammar. Trots det är denna effekt exkluderad i majoriteten av alla modeller för islaster. Det är alltså ett tydligt glapp mellan de mekanismer som observerats i mätningar och de befintliga prediktionsmodellerna.

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



Energiforsk