

ISLAST MOT DAMMER MED VARIERENDE VANNSTAND

Aslak Bøhle Foss

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Leif Lia, IBM

Medveileder: Bård Artnsen, NORUT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: *ASLAK BØHLE FOSS*

Tittel: **ISLAST MOT DAMMAR MED VARIERANDE VASSTAND**

1 BAKGRUNN

Isdekke som legg seg på eit magasin eller vatn vil etablere ein krystallinsk struktur som tilsvarar oppbygginga av eit metall. Is vil på den måten oppføre seg som eit krystallinsk materiale med t.d. termisk ekspansjon, plastisk deformasjon, oppsprekking m.m. Isdekke på magasin vil derfor kunne påføre vassdragsanlegga store laster enten pga termisk utviding eller vasstandsvariasjonar. Istrykk og islastar har i lang tid vore forsøkt estimert med både

- Fysisk/matematiske modellar
- Empiriske modellar basert på kuldemengde/istrykkelse
- Reint statistiske metodar
- Grenseverdiar

Sidan ingen av modellane enno har blitt akseptert som allmenngyldig prognosemodell, drivast det framleis forskning på islast mot dammar. Dei fleste modeller er utvikla for statisk islast, medan modellar for dynamisk islast eller islast frå vasstandsvariasjon er sjeldne. Islast er avgjerande for stabilitet og statikk på låge betongdammar og på øvre 7 – 8 m av betongdammar. I mange tilfelle er islast dimensjonerande og får direkte innverknad på pålagte fornyingar av dammar. Det er derfor viktig at islast er rett prognosert både i forma av maksimal last og oppførsel.

Nytt måleutstyr og nye målemetodar har gjort det både enklare og gjennomføre målingar og gjort resultatane meir sikre. NORUT i Narvik har vore leiande i Norden på dette og har for tida pågåande måleprogram mot dammar. Målingane utførast på vassforsyningsmagasinet i Taraldsvika rett oppstraums Narvik by, og måleutstyr er installert for vinteren 2016/2017. Magasinet i Taraldsvika er lite og kan derfor regulerast for å skape vasstandsvariasjonar som vil gje spesielt spennande måleverdiar.

2 HOVUDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet vil innehalde følgjande hovudpunkt:

1. Litteraturstudie på islast mot dammar, med spesielt fokus på islast frå vasstandsvariasjonar.
2. Gjennomgang og vurdering av måleutstyr for istrykk-/islast-målingar.
3. Planlegging av test med variasjon i vassnivå i Taraldsvika.
4. Gjennomføring av ismåling planlagt i punkt 3.
5. Vurdering av resultat, samanlikning med tidlegare kjente målingar og forslag til justering/utvikling av metodar.
6. Rapportering

Innhaldet i prosjektet vil bli nærmare avgjort av rettleiar i samråd med samarbeidspartnerar som vil bli knytt til prosjektet.

Modellberekningar

Det kan vere nødvendig å nytte tilgjenge modellar for berekninga av islast, men dette er ikkje sett som forutsetningar for arbeidet. Det vil sjølvstakt vere å gjere berekningar på tidlegare kjente modellar med t.d. Matlab, Excel el.l.

3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Hovudrettleiar vil vere Professor Leif Lia. Medrettleiar vert Forskingsleiar Bård Arntsen i NORUT. Andre kontaktpersonar vil vere andre tilsette i NORUT, medarbeidarar i NVE og rådgivande ingeniørfirma og til slutt vitenskapleg til tilsett på NTNU og Sintef. Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidarar i nemnte organisasjonar vert tilrådd og bidrag som går inn i oppgåva skal alltid refererast til på rett vis.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osb. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn den leveringsfristen som kjem fram i DAIM (20 veker + offentlege fridagar vårsemesteret).

Trondheim, 16. januar 2017

Leif Lia
Professor

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2017 som den avsluttende delen av mastergraden min i Bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-naturvitenskaplige Universitet (NTNU).

Oppgaven er skrevet ved Institutt for vann- og miljøteknikk med fordypning innen vassdragsteknikk.

I min tid som student har jeg fått stor interesse for damkonstruksjoner og stabilitetsberegninger. Helt fra grunnkurset i vannkraft – og vassdragsteknikk har jeg fått interesse rundt lastbidraget fra is, og jeg hadde et ønske om å danne et større kompetansegrunnlag for dette fenomenet. Jeg er veldig takknemlig for at NTNU og Norut Narvik gjorde det mulig å skrive min masteroppgave på dette temaet.

Først og fremst vil jeg rette en stor takk til mine to veiledere Bård Arntsen i Norut Narvik og Leif Lia ved NTNU. Bård ga meg en varm og god velkomst i Narvik, og har vært til stor hjelp og motivasjon gjennom hele prosessen. Han har satt meg i kontakt med flere av bidragsyterne til denne oppgaven via Norut Narvik. Leif har hatt gode innspill under oppgaveskrivingen, og jeg vil spesielt takke for mange gode faglige diskusjoner. Gjennom sitt store engasjement og sin kompetanse som faglærer og foreleser i vannkraft – og vassdragsteknikk har han vært en stor bidragsyter til at jeg i dag har så stor interesse for fagfeltet.

Jeg vil også takke Christian Petrich ved Norut Narvik som bidro med å øke min forståelse for de fysiske og mekaniske egenskapene til isen. Takk til Tore Pettersen ved Norut Narvik for god hjelp til å gjennomføre måleprogrammet, og til Bjørnar Sand ved Norut Narvik for gode bidrag med interessant litteratur og diskusjoner rundt beregningsmodellen. I tillegg vil jeg også takke Arild Clausen ved NTNU for bidrag med med interessant litteratur og med beregningsmodellen.

Til slutt vil jeg gjerne takke folket på verkstedloftet, og spesielt de på kontor 240 for godt samhold og hyggelige stunder. En spesiell takk til Astrid Vagnildhaug for støtte og motivasjonen under hele oppgaveskrivingen.



Aslak Bøhle Foss

Trondheim, Juni 2017

SAMMENDRAG

I dag blir mange gravitasjonsdammer av mur og betong rehabilitert fordi de ikke lenger er beregnet som stabile. Lave dammer av denne damtypen vil være spesielt utsatt for islast, da lasten vil skape et stort moment ved damfoten. Siden mur- og betongdammer er den mest utbredte damtypen i Norge, vil slike rehabiliteringer bli en stor samfunnskostnad for landet. Det er derfor viktig å få en god forståelse av lastens størrelse og oppførsel.

I denne oppgaven er det gjennomført verdens første måleprogram for islast på en damkonstruksjon med kontrollert regulering av vannivå. Måleprogrammet ble gjennomført på dam Taraldsvikfossen i Narvik vinteren 2016/2017. Det ble utført tre ulike forsøk med henholdsvis 0.06, 0.22 og 0.35 m vannstandsvariasjon.

Ved forsøket med lavest variasjon i vannivå ble det vurdert sannsynlig at islasten ble redusert på grunn av vannstandsvariasjonen. Forsøket som hadde størst vannstandsvariasjon ga også størst islast. Den maksimale islasten ble målt til 85 kN/m, noe som er lavere enn anbefalt verdi fra dagens regelverk. Den opptredende lasten var et resultat av lastbidrag fra vannstandsvariasjon, termisk ekspansjon og fra frysing av sprekkene som forekom under nedtappingen.

Det er blitt utført en vurdering av tidligere anbefalte beregningsmodeller. Modellene som ble vurdert var: utvidelse i et elastisk materiale, Røyen (1922), Bergdahl (1978), Fransson (1988) og Comfort (2003). Da modellene enten ga for urealistisk verdi eller ikke var godt nok egnet, ble det konkludert med at ingen av de vurderte modellene kan bli anbefalt for stabilitetsberegninger.

Oppgaven foreslår en analytisk beregningsmodell for å forklare isdekkets oppførsel og opptredende laster. Modellen er godt egnet for å se på potensiale til lastestørrelsen til de ulike lastbidragene. For nøyaktig beregninger av opptredende istrykk er modellen ikke anbefalt, da det er en konservativ løsning og vil gi urealistiske høye verdier .

Det ble konkludert med at størrelsen på sprekker, antall sprekker og % frysing av sprekker i et isdekke hadde stor påvirkning på opptredende islast ved vannstandvariasjon. De nevnte parameterne hadde, sammen med vannstandsvariasjon, istykkelse og temperaturendring størst påvirkning på både lastens maksimal verdi og isdekkets oppførsel.

Ved en samlet vurdering av alle komponentene presentert i oppgaven ble det konkludert med at dagens kunnskap om islast ikke er tilstrekkelig. Da is er et veldig komplisert materiale å beregne, er det nødvendig å utføre større og flere måleprogrammer på feltet i framtiden. Det ble også konkludert med at dagens regelverk både er utdatert og at datagrunnlaget regelverket er basert er for lite omfattende.

ABSTRACT

Today, many gravity dams of masonry and concrete are rehabilitated because they are no longer calculated as stable. Dams of this type of dam, with low height, will be particularly exposed to ice loads, as the load will generate a big moment at the dam foot. Since masonry and concrete dams are the most common dam type in Norway, such rehabilitation will be a big social cost for the country. It is therefore important to obtain a good understanding of the load's size and behavior.

In this thesis, the world's first measurement program for ice load on a dam with controlled water level regulation has been carried out. The measurement program was conducted at dam Taraldsvikfossen in Narvik in the winter 2016/2017. Three different experiments were performed with 0.06, 0.22 and 0.35 m water level variations, respectively.

In the case of the lowest variation in water level, it was considered likely that the ice load was reduced due to the water level variation. The experiment with the greatest water level variations also gave the greatest load. The maximum ice load was measured at 85 kN /m, which is lower than the recommended value from the current regulations. The resulting load was a result of load contribution from water level variation, thermal expansion and freezing of the cracks that occurred during the fluctuation.

An assessment of previously recommended calculation models has been performed. The models that were considered were: extension in an elastic material, Røyen (1922), Bergdahl (1978), Fransson (1988) and Comfort (2003). As the models either gave unrealistic value or not well suited, it was concluded that none of the evaluated models could be recommended for stability calculations.

The thesis proposes an analytical calculation model to explain the ice sheet's behavior and behavioral loads. For accurate calculations of occurring ice pressure, the model is not recommended, as it is a conservative solution and will give unrealistic high values.

It was concluded that the size of cracks, the number of cracks and the % freezing of cracks in an ice cover had a major impact on the ice load with impact from water level variation. The mentioned parameters, together with water level variation, ice thickness and temperature change, had the greatest impact on both the maximum value of the load and the ice sheet behavior.

In an overall assessment of all the components presented in the thesis, it was concluded that today's knowledge of ice loads is insufficient. Since it is a very complicated material to calculate, it is necessary to carry out more measurement programs in the field in the future. It was also concluded that the current regulations are both outdated and based on a insufficient measurement program.

INNHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	I
SAMMENDRAG	III
ABSTRACT	V
1 INNLEDNING.....	1
1.1 GENERELT OM DAMMER.....	2
1.2 DAMSTABILITET	3
1.3 DAM TARALDSVIKFOSSEN	6
2 ISENS EGENSKAPER	9
2.1 GENERELT OM IS	9
2.2 ISDANNELSE	10
2.3 ISENS FYSISKE EGENSKAPER.....	13
2.4 ISENS MEKANISKE EGENSKAPER	17
2.5 SPREKKDANNELSE	20
3 ISTRYKK MOT KONSTRUKSJONER	23
3.1 ISTRYKKELSE	24
3.2 ISTRYKK VED TERMISK UTVIDELSE	26
3.3 ISTRYKK VED VANNSTANDSVARIASJON.....	29
4 DAGENS REGELVERK OG ANBEFALINGER	33
4.1 NORSK REGELVERK	33
4.2 INTERNASJONALT REGELVERK.....	36
5 TIDLIGERE BEREGNINGSMETODER.....	39
5.1 TERMISK ISLAST	39
5.2 ISLAST VED VANNSTANDSVARIASJON.....	46
5.3 ANDRE ANBEFALTE MAKSIMALVERDIER	49

6	BEREGNING AV ISTRYKK	51
6.1	LASTBIDRAG FRA VANNSTANDSVARIASJON	52
6.2	LASTBIDRAG FRA TEMPERATURENDRING.....	53
6.3	LASTBIDRAG FRA GJENFRYSING AV SPREKKER	54
6.4	LASTMODELL.....	57
7	MÅLEPROGRAM	59
7.1	MOTIVASJON	59
7.2	MÅLESTED	59
7.3	METODIKK	60
7.4	TIDSPERIODE.....	65
7.5	ISFORHOLD	65
8	RESULTAT	67
8.1	TEMPERATUR	67
8.2	SPREKKMØNSTER	69
8.3	VERTIKAL POSISJONSENDRING AV ISDEKKET	71
8.4	MÅLERESULTAT ISTRYKK	73
8.5	SAMMENLIKNING AV MÅLT OG BEREGNET ISLAST	79
9	KONKLUSJON.....	87
	REFERANSER	89
	VEDLEGG	93
	VEDLEGG A: BEREGNINGSMODELLER	93
	VEDLEGG B: TEMPERATURPROFIL.....	103
	VEDLEGG C: LASTFORLØP	109

FIGURLISTE

Figur 1.1 Oversikt over antall betong- og murdammer i Norge, fordelt på bruddkonsekvensklasse (Energi Norge, 2016)

Figur 1.2 Illustrasjon av hendelsesforløpene til en ustabil dam.

Figur 1.3 Illustrasjon på opptredende krefter/laster på en gravitasjonsdam.

Figur 1.4 Panoramabilde av dam Taraldsvikfossen

Figur 1.5 Bilde av dam Taraldsvikfossen, og tilhørende magasin. (Norut, NVE Atlas)

Figur 2.1 Vertikalt snitt av tetraeder i et isgitter. C-aksen er retningen vinkelrett på basalplanet. Store sirkler er oksygenatomer, og små sirkler hydrogenbindinger (Bergdahl, 1977)

Figur 2.2 Vertikalt tverrsnitt av en typisk oppbygging av is i et isdekke (Eranti og Lee, 1986).

Figur 2.3 Vertikalsnitt av et isdekke før (a) og etter (b) vannet har blitt presset opp på isen (Bergdahl 1977)

Figur 2.4 Densitet til is med et temperaturspenn fra -30°C til 0°C . Temperatur, $^{\circ}\text{C}$, på x-aksen og densitet, kg/m^3 , på y-aksen (Ashton, 1986)

Figur 2.5 Termisk konduktivitet for is som en funksjon av temperatur, densitet og endelig smeltepunkt (Ashton, 1986).

Figur 2.6 Karakteristiske krepstadiet for konstant belastet is (Danielsen, 1990)

Figur 3.1 Tøying og sprekke dannelse av et flyttende isdekke som resultat fra endring i temperatur (Bergdahl, 1978)

Figur 3.2 Ekspansjon av et isdekke på en innsjø (Bergdahl, 1978)

Figur 3.3 Oversikt over antall termiske lasttilfeller i løpet et år for magasiner i Norge (Norut).

Figur 3.4 Illustrasjon av isdekkets mekanismer når det er utsatt for en vanstandsvariasjon.

Figur 3.5 Illustrasjon av et isdekke som blir utsatt for en vannstandsvariasjon. Figuren illustrerer hendelsesforløpet til en volumutvidelse av vannfylte sprekker.

Figur 5.1 Ikke-lineær reologimodell brukt av Bergdahl (Bergdahl 1978).

Figur 6.1 Bjelke fast innspent i begge endene, med jevnt fordelt last over hele lengden (Hetényi, 1971)

Figur 6.2 Fritt opplagt bjelke utsatt for en uniform temperaturøkning (Usmani m. fl., 2001)

Figur 6.3 Bjelke, uten mulighet for horisontal forflytting, utsatt for en uniform temperaturøkning (Usmani m. fl., 2001)

Figur 6.4 Bjelke med en utbøying grunnet fast innspenning og lengdeutvidelse

Figur 6.5 Typiske sprekkprofiler for et isdekke. x representerer avstanden fra isblokken til senter sprekk

Figur 7.1 Oversiktsbilde over installert trykcelle, A, termometer og ventilhus (NVE Atlas).

Figur 7.2 Utforming av den installerte trykcellen A.

Figur 7.3 Oversiktsbilde over åpningsmekanismen og plassering av stengeventilene

Figur 8.1 Utviklingen av sprekkmønsteret etter en vannstandsvariasjon. Utformingen til sprekkene er representert med en blå linje. Plasseringen av trykcelle A er representert med symbolet A.

Figur 8.2 Eksempler på sprekker dannet under forsøk 3.

Figur 8.3 Isdekkets posisjonsendring under forsøk 3. Dammens framside er ved $L=0$ m, og lengden øker vinkelrett på dammen, der $L=30$ m er ved enden av magasinet. Første målepunkt er rett ved trykcelle A. De tre representerte grafene viser hvordan isdekket

Figur 8.4 Lastforløpet til Forsøk 1. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannnivå (cm) på y-aksene

Figur 8.5 Lastforløpet til Forsøk 2. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannivå (cm) på y-aksene

Figur 8.6 Lastforløpet til Forsøk 3. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannivå (cm) på y-aksene

TABELLISTE

Tabell 1.1 Oversikt over opptredende krefter/laster på en gravitasjonsdam

Tabell 1.2 Oversikt over aktuelle parametere for dam Taraldsvikfossen

Tabell 2.1 Klassifisering av istyper

Tabell 2.2 Densitet for snø og snøis

Tabell 2.3 Termisk konduktivitet for snø, snøis og stålis (Bergdahl, 1978)

Tabell 7.1 Oversikt over vannstandsvariasjonen og varigheten til feltforsøkene

Tabell 7.2 Målinger av istykkelse, snødybde og fribord før vannstandsvariasjon

Tabell 8.1 Luft - og istemperaturer under reguleringen av magasinet

Tabell 8.2 Sammenlikning mellom anbefalte (NVE) og målte verdier

Tabell 8.3 Sammenlikning av beregnet og anbefalet verdier for islast

Tabell 8.4 Oversikt over verdiene til de ulike lastbidragene

Tabell 8.5 Sammenlikning mellom målt og beregnet istrykk ut fra beregningsmodell

1 INNLEDNING

Is som legger seg på et magasin eller innsjø vil etablere en krystallinsk struktur som tilsvarer oppbyggingen til et metall. Et isdekket vil kunne påføre damkonstruksjoner store laster enten ved termisk utvidelse eller vannstandsvariasjoner.

Det har blitt utført mange forsøk på å etablere beregningsmodeller tidligere, men da ingen av modellene har blitt allmenngyldig godkjent er det fortsatt aktuelt å forske på islast mot dammer. De aller fleste modellene har blitt utviklet for statisk islast, mens modeller for dynamisk islast og islast fra vannstandsvariasjoner er veldig sjeldne.

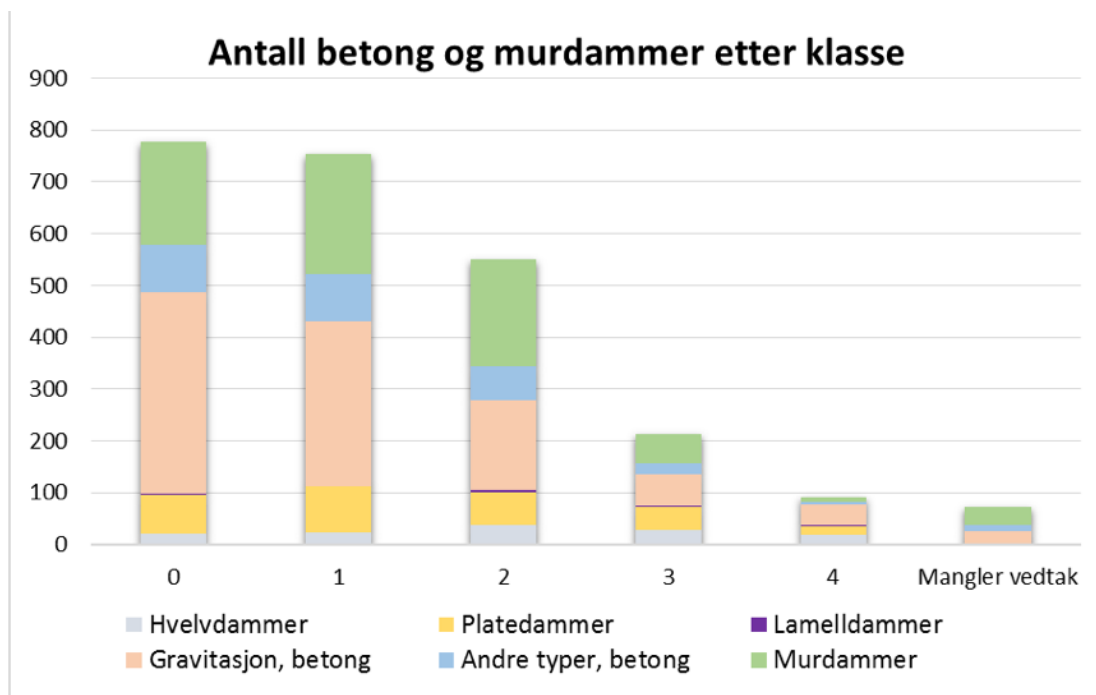
Ved stabilitetsberegninger vil islast ha stor påvirkning. Den vil ha spesielt stor påvirkning på lave betong- og murdammer. I mange tilfeller er islast en dimensjonerende last, og vil få en direkte påvirkning på rehabilitering av dammer. Det er derfor viktig å forutse riktig maksimal last og oppførsel.

Nytt måleutstyr og nye målemetoder har gjort målinger av islast både enklere og mer nøyaktig enn tidligere. Norut Narvik har vært ledende i Norden på dette og har for tiden et pågående måleprogram ved dam Taraldsvikfossen i Narvik. Magasinet i Taraldsvikfossen er lite og kan lett reguleres for å fremprovosere vannstandsvariasjoner som vil gi spesielt interessante måleverdier.

1.1 Generelt om dammer

En damkonstruksjon kan defineres som et vassdragsanlegg som demmer opp vann i en innsjø eller elv. Dammens hovedfunksjon er å lagre vann i et magasin. Prinsipielt kan man dele alle damkonstruksjoner inn i fire hovedtyper; betong -, mur-, tre- og fyllingsdammer. De fire hovedtypene deles så inn i flere delgrupper. Valg av damtype baserer seg på forholdene på damstedet, når dammen ble bygget, magasin størrelse og på datidens myndighetskrav. Dammer som får problemer med islast er ofte av typen mur og betong, grunnet deres geometriske utforming og egenskaper.

Dam Taraldsvikfossen er en typisk gravitasjonsdam av betong, som er den vanligste damtypen i Norge. Det finnes totalt 1007 dammer av denne typen i Norge i dag. Fordelingen av mur- og betongdammer i Norge er presentert i figur 1.1 (Energi Norge, 2016).



Figur 1.1 Oversikt over antall betong- og murdammer i Norge, fordelt på bruddkonsekvensklasse (Energi Norge, 2016)

Gravitasjonsdammer er solide betongkonstruksjoner som oppnår stabilitet mot påkjente laster ved sin geometriske form, sin egen masse og betongstyrke. Generelt er de konstruert med en rett horisontal akse, men de kan ha vinkler eller kurver som akkompagnerer spesifikke landskap. En dam må bli utformet og prosjektert slik at den vil være stabil mot ytre påkjenninger og laster. Stabilitetsberegningene er nødvendig for å kontrollere at konstruksjonen har tilstrekkelig sikkerhet og ikke går til brudd.

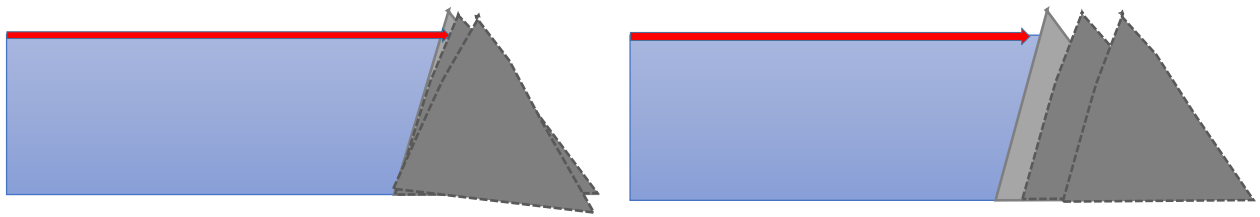
I tillegg til å dele dammer inn i grupper basert på utforming og funksjonalitet, deles de også inn etter bruddkonsekvensklasse. Alle dammer i Norge blir plassert i ulike konsekvensklasser basert på skadeomfanget hvis dammen går til brudd. Det vil også være ulike sikkerhetskrav knyttet til de ulike klassene.

1.2 Damstabilitet

For at en damkonstruksjon skal betegnes som stabil må den bli prosjektert med en tilstrekkelig høy sikkerhetsfaktor slik at konstruksjonen motstår de opptredende lastene. Det er vanlig å gjennomføre en stabilitetsanalyse og påfølgende beregning av opptredende krefter både ved basen til dammen og ved utvalgte snitt inne i konstruksjonen.

For at en gravitasjonsdam skal være beregningsmessig stabil må følgende kriterier være oppfylt:

- Ha tilstrekkelig sikkerhet mot velting ved alle horisontale plan i konstruksjonen, ved basen eller ved et plan under basen. Hendelsesforløpet til velting er illustrert i figur 1.2a.
- Ha tilstrekkelig sikkerhet mot glidning ved alle horisontale plan i konstruksjonen eller tilnærmet horisontale plan i konstruksjonen ved basen eller ved fundamentet. Hendelsesforløpet til glidning er illustrert i figur 1.2b.
- Tillatte spenningsverdier i betong- eller fundamentmateriale skal ikke overskrides.

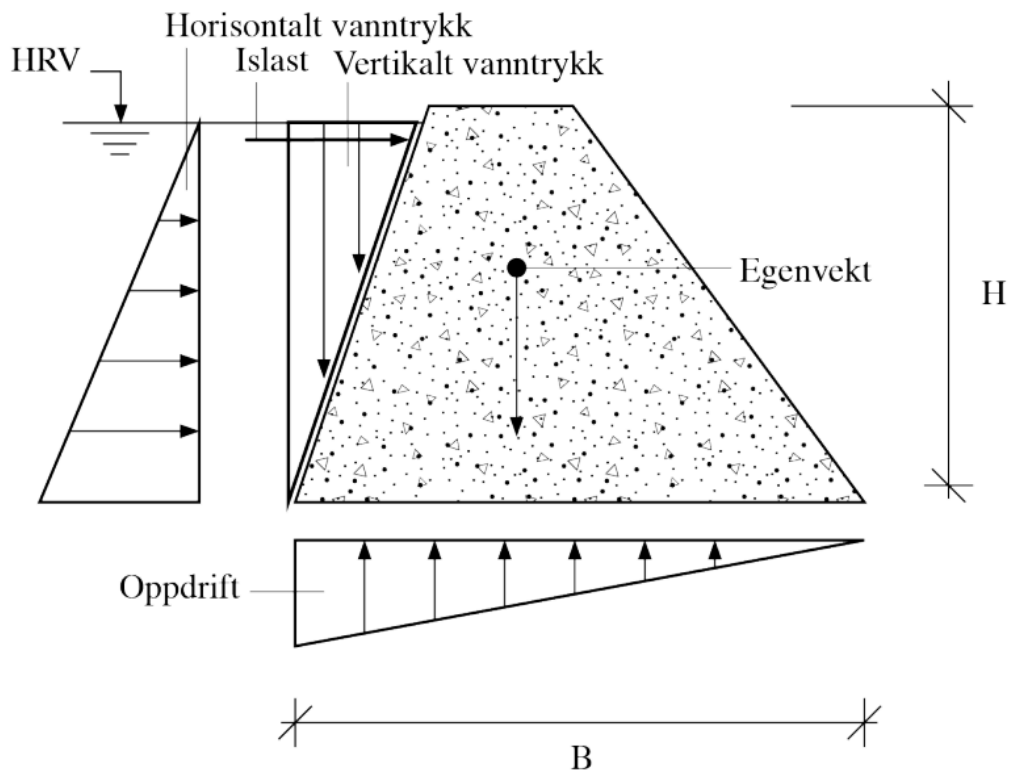


(a) Hendelsesforløpet til velting

(b) Hendelsesforløpet til gliding.

Figur 1.2 Illustrasjon av hendelsesforløpene til en ustabil dam.

Figur 1.3 illustrerer de vanligste statiske kreftene i en stabilitetsanalyse. Det er hovedsakelig to lasttyper som virker på en gravitasjonsdam: stabiliserende laster (dammens egenvekt og vertikalt vanntrykk) og laster som bidrar til ustabilitet (horisontalt vanntrykk, poretrykk og istrykk). Lastene er nærmere beskrevet i tabell 1.1. En kombinasjon av lastene kan virke på dammen, men det er sjeldent alle lastene virker samtidig. Derfor bør prosjektering av dammen være basert på den mest ugunstige kombinasjonen av de sannsynlige lastene.



Figur 1.3 Illustrasjon på opptredende krefter/laster på en gravitasjonsdam.

Tabell 1.1 Oversikt over opptredende krefter/laster på en gravitasjonsdam

Dammens egenvekt	G	Dammens egenvekt er den viktigste stabiliserende lasten på dammen. Lasten virker nedover mot tyngdepunktet til dammen. Egenvekten av konstruksjonen inkluderer all betongen, armering og alt av installasjoner på dammen.
Vertikalt vanntrykk	V_v	Vekten av vann som ligger over en skrånende flate til dammen vil virke som en stabiliserende belastning.
Horisontalt vanntrykk	V_H	Hele vannvolumet i magasinet oppstrøm for dammen vil presse mot dammen, og skape et horisontalt vanntrykk. Vanntrykket vil øke med dybden i magasinet.
Poretrykk	O	Vann som siger gjennom porene til materialet til dammen eller fundamentet, forårsaker et trykk under dammen. Dette trykket vil presse opp dammen, og reduserer damstabiliteten.
Istrykk	P_{is}	Istrykk kan skape et veldig stort trykk som virker høyt oppe på dammen. Angrepspunktet til istrykket gjør at det kan skape et stort veltemoment. NVE beskriver dette trykket som en termisk ekspansjon. (NVE, 2003)

1.3 Dam Taraldsvikfossen

Målinger av istrykk, med kontrollert regulering av vannivå, ble gjennomført vinteren 2016/2017 på dam Taraldsvikfossen. Dammen vil bli brukt som illustrasjon på beregninger av maksimalt istrykk. Beregningene vil senere bli brukt til sammenlikning av målte resultater.

Dam Taraldsvikfossen er en gravitasjonsdam i betong som ligger i Narvik kommune i Nordland (68.4405° N, 17.471° E). Dammen er eid, vedlikeholdt og drevet av Narvik Vann AS, som igjen er eid av Narvik kommune. Det tilhørende vannmagasinet fungerer som en drikkevannskilde for Narvik by, men er i dag ikke i bruk og fungerer som en reserveløsning. Det er derfor godt egnet for det aktuelle måleprogrammet.



Figur 1.4 Panoramabilde av dam Taraldsvikfossen



Figur 1.5 Bilde av dam Taraldsvikfossen, og tilhørende magasin. (Norut, NVE Atlas)

Magasinet får hovedsakelig tilsiget fra en bekk som renner inn øst for dammen, men en liten bekk sørøst i magasinet gir også litt tilsig. Dette tilsiget fører til at vannivået holder seg stabilt på nivå med flomløpet. Det normale vannivået ligger primært rundt 0,5 m under toppen av dammen. På vinteren fryser både bekkene og terskelen på flomløpet. Dette fører til at vannstrømmen både inn og ut av magasinet reduseres betraktelig.

Tabell 1.2 Oversikt over aktuelle parametere for dam Taraldsvikfossen

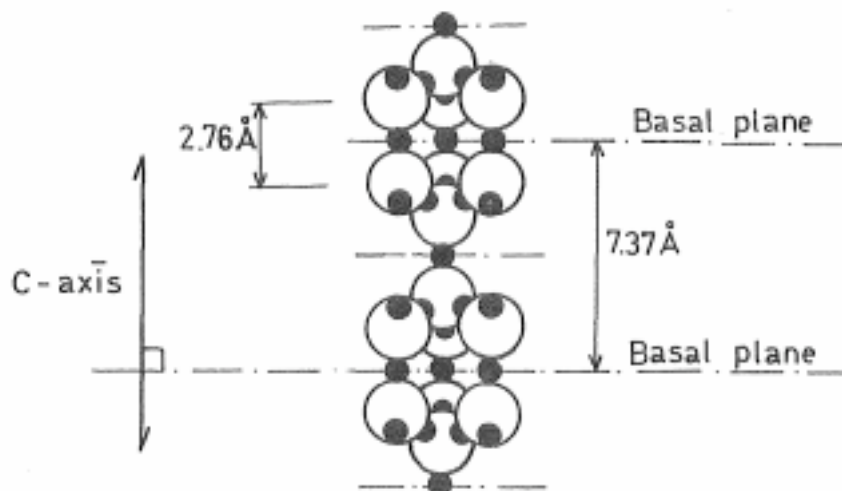
Damhøyde	6 m
Damtype	Gravitasjonsdam i betong
Eier	Narvik kommune
Tappekapasitet, Q	0,15 m ³ /s
Tilsig	Vår : 0,5 m ³ /s (Kan øke til 1,5 m ³ /s i korte perioder) Vinter: 0,005 m ³ /s
HRV	6 m
Overflateareal	1000 m ²
Magasinlengde	32 m
Høyde over havet	212 m.o.h
Frostmengde, F ₁₀₀	25 000 h°C
Midlere temperatur	3,5 °C

2 ISENS EGENSKAPER

2.1 Generelt om is

Vann er et av de mest komplekse materialene på jordens overflate. Selv om materialet har en enkel kjemisk formel har det blitt bevist at det har en unormal oppførsel i mange tilfeller. Det har for eksempel en ekstremt høy spesifikk varmekapasitet og latent fusjonsvarme, unormal høy permittivitet og densiteten øker ved temperatur mellom 0 og 4°C (Bergdahl, 1977). Den kjemiske formelen for vann er vanligvis skrevet H_2O , selv om vann vanligvis vises som molekylgrupper og kan bli bedre beskrevet som $(H_2O)_n$ (Ashton, 1986). Molekylene til naturlig dannet is er, i motsetning til vann, utformet som et vanlig romgitter.

Is er et krystallinsk materiale, og iskrystallene har en heksagonal struktur (figur 2.1). Aksen parallell med krystallene benevnes som basalplanet, og krystallens C-akse er vinkelrett på basalplanet (Bergdahl, 1977).

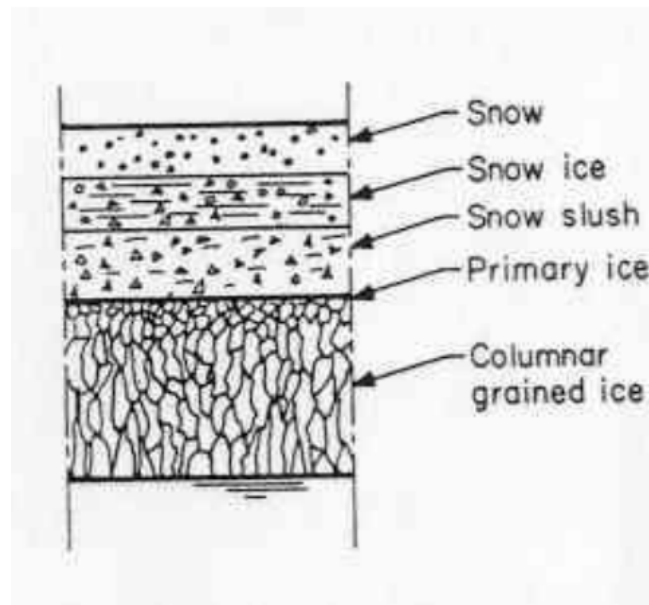


Figur 2.1 Vertikalt snitt av tetraeder i et isgitter. C-aksen er retningen vinkelrett på basalplanet. Store sirkler er oksygenatomer, og små sirkler hydrogenbindinger (Bergdahl, 1977)

Is er i moderne ingeniørlitteratur definert som en fast form av vann. Is er definert som et hardt og tett materiale, og kan for eksempel være is på vannoverflaten til en innsjø. Ofte er is klassifisert etter måten den oppstår. Klar is er for eksempel formet fra smeltet vann. Den klare isen kan deretter klassifiseres etter formen på krystallene og orientering av krystalaksene. Snøis er formet fra en blanding av snø og vann (Michel og Ramseier, 1971). I denne oppgaven vil all is være beskrevet som ferskvannsis. Egenskapene til is av denne typen blir bestemt ut ifra hvordan den blir dannet. De ulike typene is er beskrevet i tabell 2.1.

2.2 Isdannelse

Når en innsjø kjøles ned på høsten, kjøles vannet i overflaten. Dette vannet vil bli tyngre og synker derfor dypere samtidig som vann strømmer opp (Bergdahl, 1977). Når vannet i hele innsjøen har en temperatur på 4°C , temperaturen der ferskvann har lavest densitet, begynner vannet i overflaten å kyles ned ytterligere til det når frysepunktet (figur 2.2). Ved stillestående vann kan det tynne overflatelaget nå frysepunktet, mens resten av vannvolumet fortsatt har en temperatur lik 4°C . Når vannet i dette sjiktet når frysepunktet begynner det å dannes is (Ashton, 1986).

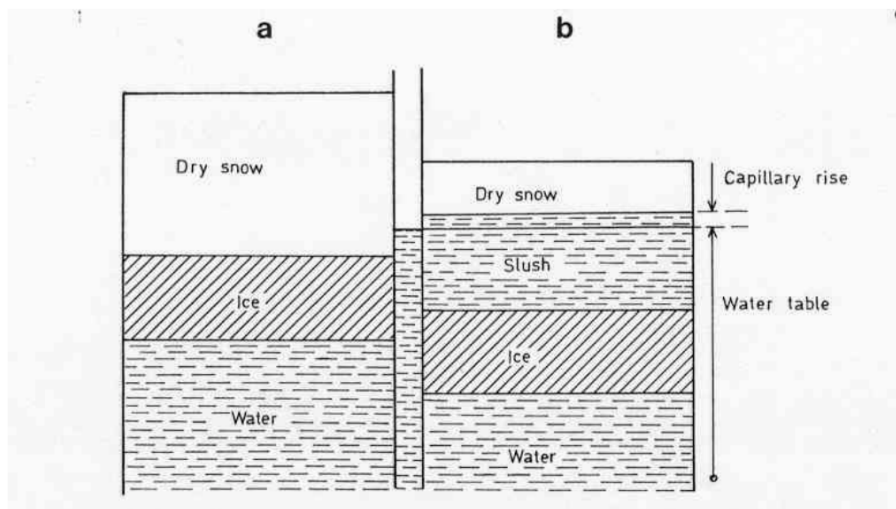


Figur 2.2 Vertikalt tverrsnitt av en typisk oppbygging av is i et isdekke (Eranti og Lee,

Isbindingene begynner ofte i det nevnte overflatelaget under kalde netter og starter med en isbinding fra små iskrystaller fra luften som kondenserer på vannoverflaten. Den første isen på stille vann har platelignende krystaller. Krystallene vokser til et nettverk av dendritter som til slutt forener seg til en kontinuerlig issjikt. Tilveksten av is fortsetter når temperaturen i luften nærmer seg temperaturen i vannoverflaten, og er tilstrekkelig lav slik at varme kan strømme opp gjennom den kommende isen og ut til luften (Ashton, 1986).

Tilveksten av is kan inndeles i tre ulike lag: Primær-is, sekundær-is og overliggende is. Primær-is er den isen som først blir en enhetlig struktur. Den primære isen vokser horisontalt i det underkjølte laget og er noen få tidels millimeter tykt. Sekundær-is vokser parallelt i varme-fluksens retning, noe som i de fleste tilfeller er vinkelrett på primær-isen. Strukturen i sekundær-isen er annerledes enn primær-isen, og vil danne en søyle-lignende form (Bergdahl, 1977, Ashton, 1986).

Når solen varmer opp isen på våren absorberes mesteparten av energien i krystall-grensene. Dette fører til at isen starter å smelte. Kort tid før isen går opp, har is-dekket blitt nedbrutt til tettpakkede løse stearinlys-lignende krystaller. Retningen av krystallene (c-aksen) i søyle-is er viktig å vite da de reologiske egenskapene av is er forskjellige i c-aksen og i basalplanet.



Figur 2.3 Vertikalsnitt av et isdekke før (a) og etter (b) vannet har blitt presset opp på isen (Bergdahl 1977)

Klar is dannes det ofte av snø, vann og snøis som har mindre hardhet enn den overnevnte isen. Issørpe som havner under isen og fryser er også sekundæris (figur 2.3). Ovenliggende is dannes alltid ovenpå primærisen og dannes på grunn av oversvømming av isen. En slik oversvømming kan dannes ved at isdekket blir presset ned, slik at vann strømmer opp gjennom hull og sprekker, gjennom regn eller gjennom snøsmelting. Snøen som legger seg oppe på isen suger vannet hvis overflaten oversvømmes av vann. Snøen kan så fryses, og danne såkalt snøis. Snøis har meget lav densitet (Bergdahl, 1977).

Is deles vanligvis i klassifiseringsklassene P1, P2, P3 og P4, samt S1 og S2. De ulike klassifiseringsklassene er presentert i tabell 1. I et isdekke vil istypen variere i hele dekket, grunnet ulik snøsamling. I oppgaven vil isdekket bli satt som snøfritt i beregningene.

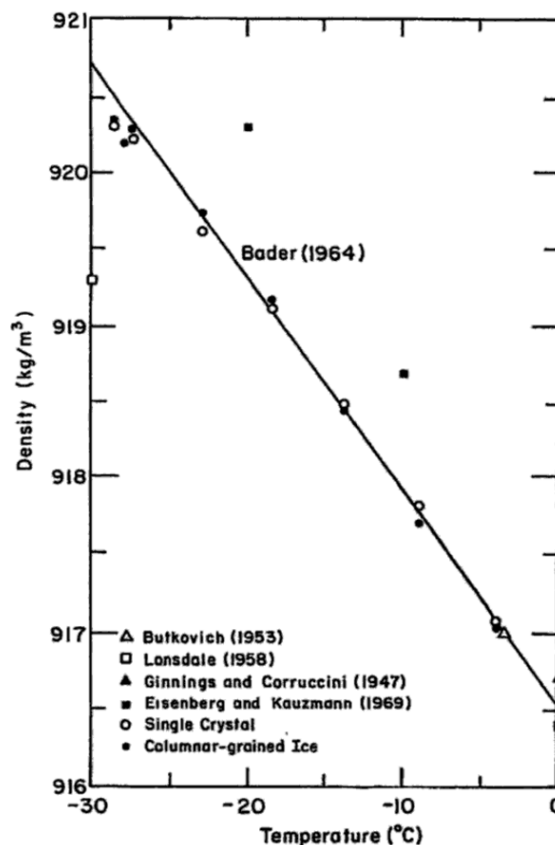
Tabell 2.1 Klassifisering av istyper

Istype	Betegnelse	Beskrivelse
Primæris	P1	Rolig vannoverflate, liten temperaturgradient
	P2	Rolig vannoverflate, stor temperaturgradient
	P3	Omrørt vannoverflate, isdannelse av sarris
	P4	Isdannelse fra snø
Sekundæris	S1	Stålis, vertikal c-akse orientering
	S2	Stålis, horisontal c-akse orientering
	S3	Stålis, innrettet horisontal c-akse orientering
	S4	Størknet sarrsørpe
	S5	Drenert størknet sarrsørpe
Overflateis	T1	Snøis
	T2	Størknet snøis
	T3	Lagdelt is
	R	Opphopping av forskjellige typer istyper.

2.3 Isens fysiske egenskaper

2.3.1 Densitet

Densiteten, ρ , til is har blitt studert i mange år, og av flere forskere. I 1986 utga Ashton (1986) en oversikt over studiene. Oversikten er presentert i figur 2.4, og presenterer resultater fra fire forskjellige publikasjoner.



Figur 2.4 Densitet til is med et temperaturspenn fra -30°C til 0°C. Temperatur, °C, på x-aksen og densitet, kg/m³, på y-aksen (Ashton, 1986)

Densiteten til is er avhengig av temperatur, og som figur 2 viser øker densiteten til is tilnærmet lineært ved minkende temperaturer. For beregning av densitet viser (Ashton, 1986) til (Michel og Ramseier, 1971) og deres beregningsmodell for densitet som funksjon av temperatur:

$$\rho = 916,6 + 0,137 * |\theta| \text{ for } -30^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 0^{\circ}\text{C} \quad (2.1)$$

der: θ = gjennomsnittstemperatur i isen [°C]

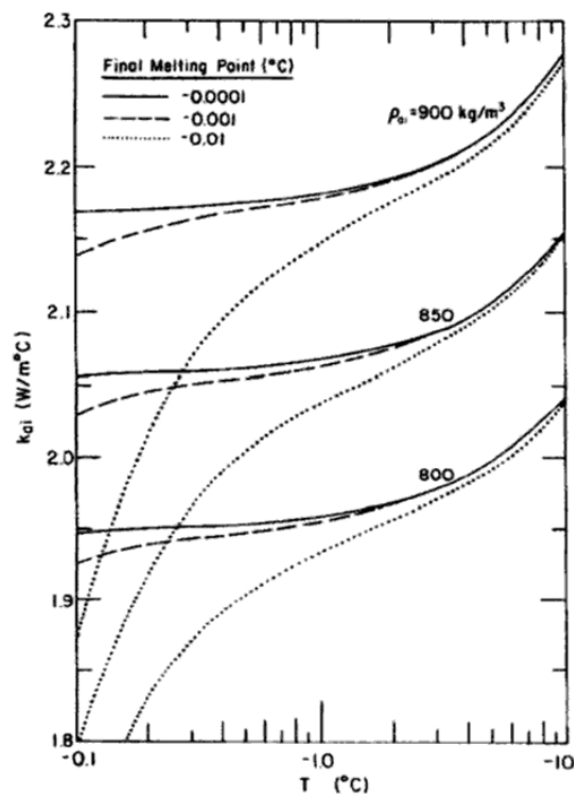
Ved beregninger i oppgaven vil det bli brukt følgende verdier for densiteten for snø og snøis:

Tabell 2.2 Densitet for snø og snøis

$\rho_{\text{snø}}$	250 kg/m ³ , midlere verdi for satt snø
$\rho_{\text{snøis}}$	890 kg/m ³

2.3.2 Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet, λ , er et begrep som omfatter et materiales evne til å lede varme. Den termiske konduktiviteten for is er temperaturavhengig, og vil minke ved økende temperatur (figur 2.5). Is som er naturlig dannet vil alltid inneholde naturlig forurensning. Dette fører til at deler av isen vil ha smeltetemperatur lavere enn 0°C. Komponenter i isen som har ulik termisk konduktivitet fra is, som for eksempel luftbobler, vil ha en direkte påvirkning på isens totale termiske konduktivitet. Det kan derfor være komplisert å bestemme den nøyaktige termiske konduktiviteten til naturlig dannet is (Ashton, 1986).



Figur 2.5 Termisk konduktivitet for is som en funksjon av temperatur, densitet og endelig smeltepunkt (Ashton, 1986).

Jakob og Erk (1928) utførte målinger på termiske konduktivitet for is. Målingene ble basisen for beregningsformelen som i dag brukes for å bestemme den termiske konduktivitet til is (Jakob og Erk, 1928). Formelen ble utformet av Dorsey (1940), og gjelder for all type is:

$$\lambda_{is} = 2,21 - 0,011 * \theta \text{ for } -40^{\circ}\text{C} \leq \theta < 0^{\circ} \quad (2.2)$$

der: θ = temperatur i isen [$^{\circ}\text{C}$]

For is med temperatur lik 0°C gjelder følgende verdier:

Tabell 2.3 Termisk konduktivitet for snø, snøis og stålis (Bergdahl, 1978)

Snø	λ_s	0,3 W/m $^{\circ}\text{C}$
Snøis	λ_{si}	2,14 W/m $^{\circ}\text{C}$
Stålis	λ_{ci}	2,24 W/m $^{\circ}\text{C}$

Schwerdtfeger (1963) presenterte beregningsformelen som i dag blir brukt for den termiske konduktiviteten til is med luftbobler. Formelen er basert på arbeid fra Maxwell (1891):

$$\lambda_{bi} = \frac{(2\lambda_{is} + \lambda_l) * \rho_{is} - (\lambda_{is} - \lambda_l) * (\rho_{is} - \rho_{bi})}{(2\lambda_{is} + \lambda_l) * \rho_{is} + (\lambda_{is} - \lambda_l) * (\rho_{is} - \rho_{bi})} * \lambda_{is} \quad (2.3)$$

der: λ_{is} = termisk konduktivitet for is uten forurensning [W/m $^{\circ}\text{C}$]

λ_l = termisk konduktivitet for luft [W/m $^{\circ}\text{C}$]

ρ_{is} = densitet for is uten forurensning [kg/m 3]

ρ_{bi} = densitet for is med luftbobler [kg/m 3]

For å bruke formelen må verdien for densiteten for is med luftbobler, ρ_{bi} , bestemmes verdien kan bestemmes ved laboratorie- og feltforsøk, men da det knyttes stor usikkerhet rundt formelen vil det ikke bli gjennomført beregninger av termisk konduktivitet med formel 2.3, hvis ikke noe annet er presisert (Maxwell, 1891, Schwerdtfeger, 1963).

2.3.3 Spesifikk varmekapasitet

Spesifikk varmekapasitet er definert som mengden termisk energi som kreves for å øke temperaturen til et material med 1°C. For beregning av spesifikk varmekapasitet til is, er Dickinson og Osborne (1915) sin beregningsmodell betraktet som den mest omfattende og korrekte. Modellen baserer seg på omfattende laboratorieundersøkelser (Dickinson og Osborne, 1915). Beregningsmodellen blir summert i en semi-empirisk formel:

$$c_{is} = 2,144 + 0,007789 * \theta - 333,4 * \frac{\theta_f}{\theta} \text{ for } -40^{\circ}\text{C} \leq \theta < 0^{\circ}\text{C} \quad (2.3)$$

der: θ = temperatur i is [$^{\circ}\text{C}$]
 θ_f = frysetemperatur til is [$^{\circ}\text{C}$]

2.3.4 Termisk diffusivitet

Termisk diffusivitet, k , er et mål for forplantningshastigheten av temperatur i et materiale. Den termiske diffusiviteten til is er avhengig av densiteten, den termiske konduktiviteten og den spesifikke varmekapasiteten. (Ashton, 1986)

Isens termiske diffusiviteten beregnes:

$$k = \frac{\lambda}{c_p * \rho} \quad (2.4)$$

der: λ = termisk konduktivitet [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
 ρ = densitet [kg/m^3]
 c_p = spesifikk varmekapasitet [$\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$]

2.4 Isens mekaniske egenskaper

2.4.1 Stivhet

Sammenhengen mellom krefter og deformasjoner til et materiale blir beskrevet som stivhetsegenskapene til et materiale. Stivhetsegenskapene varierer ved ulike istyper, og ved ulike lastsituasjoner. For et elastisk legeme har de deformerende kreftene motkrefter i form av elastiske krefter inne i legemet. Elastiske krefter per flateenhet kalles spenninger.

For beregning av stivhetsegenskapene til et rent elastisk materiale blir elastisitetsmodul, E-modul, brukt. E – modulen er et mål på et materiales motstandsevne mot elastisk deformasjon. Materiales stivhet øker med økende e-modul. Elastisitetsmodulen er temperaturavhengig, og beskriver forholdet mellom fasthet og forlengelse til et materiale:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

der: σ = Aksiell spenning [kPa]
 ε = Aksiell deformasjon

For de aktuelle tilfellene i oppgaven vil E-modulen til is variere minimalt. Verdien på E-modulen blir derfor satt lik en midlere verdi basert på målinger fra Sinha (1989). Verdien på E– modul vil i oppgaven settes til 9,5 GPa (Sinha, 1989).

For å bestemme stivhetsegenskapene til et materiale, må også kontraksjonsegenskapene bestemmes. Kontraksjon er sammentrekningsevnen til et materiale som oppstår grunnet en forandring, for eksempel ved en temperaturforandring. Verdien for tverrkontraksjon, ν , settes lik 0,345 (Sinha, 1989).

Følgende formel brukes for beregning av kontraksjonsmodulen til et materiale:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.6)$$

der: E = E-modul [MPa]
 ν = tverrkontraksjon (= 0,345)

For å bestemme materiales evne til å motstå vinkeldeformasjon blir skjærmodul, G , brukt. Skjærspenninger oppstår ved tverrbelastning når de ytre kreftene som holder hverandre i likevekt er parallellforskyvet i forhold til hverandre. Skjærmodulen blir beregnet med følgende formel:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.7)$$

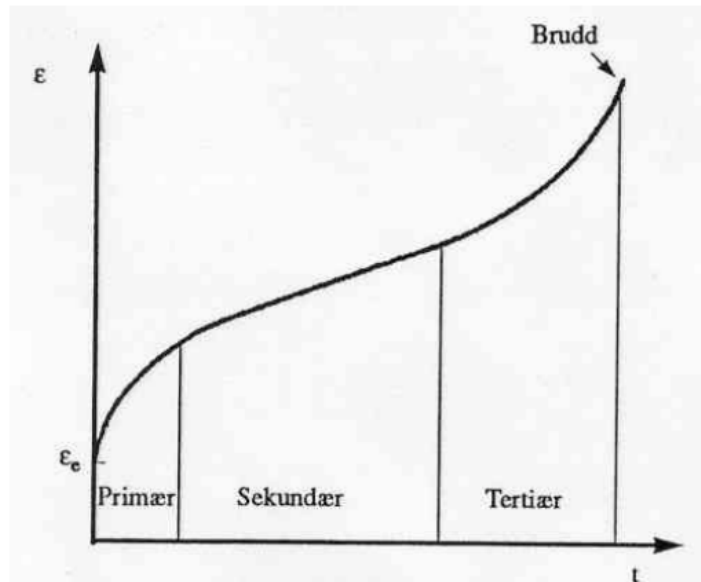
der: E = E-modul [MPa]
 ν = tverrkontraksjon (= 0,345)

2.4.2 Deformasjon

Ved belastning av is vil det opptå elastiske deformasjoner som raskt vil gå over i krypdeformasjoner og vil med tiden bli den totalitære dominerende deformasjonstypen (Danielsen, 1990). Kryp oppstår ved alle lastnivåer og om lasten får virke tilstrekkelige lenge vil isen gå i stykker. Ved lave lastverdier vil det bli et "seigt" brudd, og ved høye lastverdier vil det bli et "sprøtt" brudd (Ekström, 2002).

Deformasjonene vil, foruten om tid, påvirkes av ulike faktorer som type is, krystallstruktur og temperatur (Löfquist, 1987). Da temperaturen i et isdekke ofte vil være rundt smeltepunktet for is, vil krypdeformasjoner vil dominere i et isdekke framfor elastiske deformasjoner (Ashton, 1986).

Generelt kan man dele krypdeformasjoner inn i tre stadier, primær-, sekundær – og tertiærstadiet (figur 2.6). Primærstadiet har avtagende kryphastighet, sekundærstadiet har konstant kryphastighet og tertiærstadiet har akselererende kryphastighet. Etter tertiærstadiet går isen til brudd (Ekström, 2002).



Figur 2.6 Karakteristiske kryptadier for konstant belastet is (Danielsen, 1990)

For å forklare isens oppførsel under belastning er det nødvendig å studere de mikroskopiske deformasjonsprinsippene. Ved belastning vil iskrystallene oppføre seg elastisk, og ved belastning over kort tid vil deformasjonene avta fullstendig. Is vil gå inn i primærstadiet ved belastning over lengre tid. Her oppstår det glidninger mellom korn grensene, som følge av skjærspenninger. Deformasjoner i dette stadiet er avhengig av kornstørrelsen og blir definert som en forsinket elastisk tøyning, noe som tilsier at den er reversibel (Ekström, 2002, Danielsen, 1990).

Videre deformasjoner oppstår ved en indre omstrukturering av isen, og fører til at isen går inn i sekundærstadiet. I dette stadiet vil isen deformere seg permanent og avtar ikke ved avlastning. Videre deformasjoner utover dette fører til tertiærkryp. I tertiærstadiet vil det oppstå glidninger som oppstår konsentrert i knutepunkter i krystallgitteret. Det fører til spenningskonsentrasjoner som gjør at isen sprekker opp i knutepunktene. Ved en slik sprekke dannelse omfordelles spenningene i isen. (Ekström, 2002, Danielsen, 1990).

2.5 Sprekkdannelse

I litteratur om isens reologi beskrives sprekker som termiske sprekker (Ashton, 1986, Metge, 1976). Sprekker kan ha stor påvirkning på det totale istrykket. Den vanligste antagelsen i de fleste metoder er at all spenning blir frigjort når det dannes sprekker. Hvis alle sprekkene blir vannfylte og fryses igjen, vil isen ekspandere.

Sprekker oppstår der store variasjoner i temperatur og store vannstandsvariasjoner påvirker isdekke. Sprekkdannelsen er avhengig av tykkelsen på isdekke, om isen er snødekket og meteorologiske forhold. Et veldig tynt isdekke har en temperatur nært 0°C. Når isdekke vokser i tykkelse så synker temperaturen på toppen av dekket på grunn av lav lufttemperatur. Det øverste sjiktet i isdekket vil trekke seg sammen, men da temperaturens laveste grense er 0°C skaper denne sammentrekningen spenning, kryp og sprekker i øverste lag. Isdekket vokser vanligvis sakte. Utenom de første centimeterne av vekst, vil isen ha tid til å krype uten sprekkdannelse (Metge, 1976). Sprekker i is kategoriseres ut ifra størrelsen og om de er vannfylte eller ikke.

Tørre sprekker er den mest vanlige sprekkformen. De dannes når isdekket blir utsatt for kalde temperaturer, og temperaturen i toppen av dekket kjøles ned samtidig som temperaturen i bunnen forblir 0°C. Isdekke blir konkavformet helt til momentet, grunnet fastholding i rendene, fører til sprekkdannelse (Metge, 1976). Denne prosessen fortsetter helt til isdekket klarer å ta opp kurvaturen. I et kaldt isdekke vil alltid slike sprekker oppstå, og vil ta opp store deler av den termiske bevegelsen som fører til en betydelig reduisering i det potensielle istrykket (Bergdahl, 1978).

Smale og våte sprekker er sprekker som er smale nok til å fryse raskt som vil føre til en volumutvidelse av isdekke. Sprekktypen dannes når tørre sprekkene i et isdekke separeres, og vann siger opp gjennom sprekkene. Vannet vil stige til omtrentlig 90 % av isens tykkelse avhengig av nedbøyningen til dekket (Metge, 1976).

Den siste kategorien av sprekker blir beskrevet som brede sprekker. Kontraksjon i et isdekke vil hovedsakelig føre til dannelse en eller to sprekker. Brede sprekker vil kunne nå 200 mm brede, og blir ofte dannet grunnet strekkrefter i dekke. Sprekkene vil kunne ta opp et stort volum med vann, og vil bruke lang tid på å fryse (Metge, 1976, Petrich m. fl., 2007).

Vannfylte brede sprekker vil ikke kunne klare å fryse i løpet av en natt med kalde temperaturer, men det vil dannes et tynt vertikalt lag av is langs sprekken. Et slikt vertikalt lag blir kalt en isbro (Metge, 1976). Hvis temperaturer stiger dagen etter vil isen komprimeres og denne isbroen vil kollapse. Hvis det er stabilt kalde temperaturer over flere uker vil brede sprekker fryses til den grad av styrke slik at det vil klare å ta opp en termisk ekspansjon.

3 ISTRYKK MOT KONSTRUKSJONER

Istrykk kan produsere en betydelig last mot flaten til en dam ved steder der vintertemperaturene er så lave at relativt tykke isdekker blir dannet. Det er i dag mange veiledere som er tilgjengelige for beregning av istrykket. I følge veilederne virker istrykket rett under eller på magasinets vannivå.

Det skilles mellom istrykk, σ , og islast, P_{is} , når opptredende spenninger og krefter på konstruksjoner beskrives. Istrykket er forholdet mellom islast og arealet på virkeområdet, og beskriver spenningene som oppstår i isdekket. Istrykk blir målt i pascal (Pa). Islast beskriver kraften som virker horisontalt på konstruksjonen, og måles i kN/m. Islast på konstruksjoner blir beregnet som isens enaksiale trykkfasthet multiplisert med kontaktflatens areal. For stabilitetsanalyse og tilhørende beregninger for dammer blir islast brukt, og den blir betegnet som en linjelast.

I denne rapporten blir det fokusert på statisk istrykk mot dammer som hovedsakelig forekommer fra to fysiske fenomener:

- Termisk utvidelse og kontraksjon av isen
- Vannstandsvariasjoner i et magasin

I dag er det ikke kjent nøyaktig hvor mye trykk som utøves fra et isdekket på en konstruksjon. Som nevnt i kapittel 2.4 så kan teoretisk islast kunne nå $P_{is} = 1500$ kN/m dersom det kun tas hensyn til isens trykkstyrke. En islast med så stor verdi ville ført til omfattende skade på mange damkonstruksjoner. Da det ikke er blitt observert tilfeller som tilsier at islasten er så høy, vil islasten sannsynligvis aldri nå den teoretiske verdien.

Når en interaksjon mellom et isdekke og en konstruksjon forekommer, begrenses islasten av størrelsen til iskraftens størrelse eller av den kraft som fører til at isen bryter sammen (Elforsk, 2013). Der islasten blir begrenset av de mekaniske egenskapene til isen blir bruddmekanismen knusing lagt til grunn for beregningene (Bergdahl, 1978). For termiske laster blir størrelsen på lasten begrenset til temperaturvariasjonene i isen. For laster som virker grunnet vannstandsvariasjon vil størrelsen på lasten være begrenset til tykkelsen av isdekke og størrelsen på vannstandsvariasjonen.

3.1 Istykkelse

I oppgaven vil analytiske beregninger avgrensnes til snøfrie og rissfrie isdekker, men det er nødvendig å ta med komponentene i de teoretiske beregningene for å kunne sammenligne beregningene med den målte islasten.

Isdekkets tykkelse kan ha en stor påvirkning på størrelsen på lasten, og er en viktig parameter i de aller fleste beregningsmetodene som finnes i dag. Det er derfor veldig viktig å definere isdekkets tykkelse grundig for å kunne forutse og beregne istrykk og islast.

For beregning av istykkelse formel 3.1 foreslår (Ashton, 1986). Formelen er utledet fra energibalanselikningen for grenseovergangen mellom luft og is:

$$h = 3,5 * 10^{-2} * S^{\frac{1}{2}} * \alpha \quad (3.1)$$

der: S = kuldegrader [d °C]
 α = korreksjonsfaktor, $0 < \alpha < 1$

S beregnes ved:

$$S = \sum (T_m - T_a) * t \quad (3.2)$$

der: T_m = temperatur ved grenseflaten mellom is og luft [°C]
 T_a = lufttemperatur [°C]
 t = tid [h]

Formelen neglisjerer både varmeoverføringen mellom vann og is og oppvarming fra solstråler. Formelen er kun gyldige for snødekkede isdekker. Snø har både ulik termisk konduktivitet og tyngdetetthet enn is, og vil ha en isoleringsevne på isen. Et snødekke vil også beskytte isen noe for ytre påkjenninger (Ashton, 1986).

For å beregne tykkelsen på et snødekket isdekke studeres variasjonen av tykkelsen, h , som en funksjon av endringen av temperaturen etter at dekket har blitt dekket av snø (Ashton, 1986).

Den endelig tykkelsen finnes ved å utføre skrittvis integrasjon av følgende formel:

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{\rho_{is} * L} * \frac{T_m - T_a}{\frac{h_i}{k_i} + \frac{h_s}{k_s} + \frac{1}{H_a}} \quad (3.3)$$

- der:
- T_m = temperatur ved grenseflaten mellom is og luft [$^{\circ}\text{C}$]
 - T_a = lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 - ρ_{is} = densiteten til is [kg/m^3]
 - L = isens latente fusjonsvarme [J]
 - h_i = istykkelse [m]
 - k_i = isens termiske konduktivitet [$\text{W}/^{\circ}\text{C} * \text{m}$]
 - h_s = snøtykkelse [m]
 - k_s = snøens termiske konduktivitet [$\text{W}/^{\circ}\text{C} * \text{m}$]
 - H_a = varmeoverføringskoeffisient for øverste isjiktet mot luft

I annen litteratur blir det diskutert om den virkelige istykkelsen er noe mindre enn beregnet i formel 3.3. Et av argumentene er at formelen ikke tar hensyn til effekten av oppvarming fra solstråler (Michel, 1978). Det blir også bemerket at formelen kun er egnet for is med et tynt snølag. I realiteten vil et snølag kunne få en tykkelse som fører til at egenvekten vil være større enn oppdriftskraften. Dette fører til at isen blir presset nedover, og vannet vil presses opp (Michel, 1978). Dette vannet vil, som forklart i kapittel 2.2, legge seg mellom isen og snøen og danne snøis.

Formel 3.4 er en enkel overslagsformel utarbeidet for å gi et anslag på hvor tykt snølaget må være for at dette fenomenet oppstår (Michel, 1978):

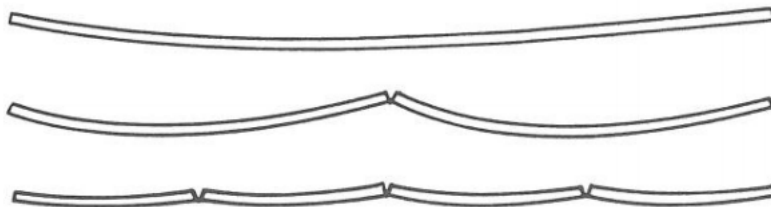
$$h_s = \frac{\rho_s - \rho_i}{\rho_s} * h_i \quad (3.4)$$

- der:
- h_s = snøtykkelse [m]
 - ρ_s = densiteten til snø [kg/m^3]
 - ρ_i = densiteten til is [kg/m^3]
 - h_i = istykkelse [m]

3.2 Istrykk ved termisk utvidelse

Termisk islast oppstår som følge av en utvidelse forårsaket av en temperaturstigning i isen. Isen ekspanderer ved økende temperaturer, og krymper ved lave temperaturer. Det som skiller is fra andre materieller er at is også ekspanderer når den endrer fase fra et fluid til et fast stoff (Michel og Ramseier, 1971, Sanderson, 1988). Egenskaper som dette, sammen med krypegenskapene, forklarer kreftene og spenningene som oppstår når isen blir utsatt for temperaturendringer (Sanderson, 1988).

Isen flyter på en horisontal vannoverflate, så den frie tøyingen av isdekket er begrenset, som fører til at det skapes et bøyemoment i isdekket. Spenningene blir for det meste frigjort ved sprekkdannelse (figur 3.1). Hvis temperaturendringene skjer veldig sakte vil isen kunne deformeres viskøst, uten at sprekker dannes (Bergdahl, 1978).



Figur 3.1 Tøying og sprekkdannelse av et flyttende isdekke som resultat fra endring i temperatur (Bergdahl, 1978)

Hvis isdekket blir oppvarmet på grunn av høyere temperaturer eller av at vann legger seg oppe på isen vil det øverste sjiktet igjen ekspandere (figur 3.2). Trykk vil oppstå i isen og kan føre til en forskyvning på konstruksjonen (Bergdahl, 1978).



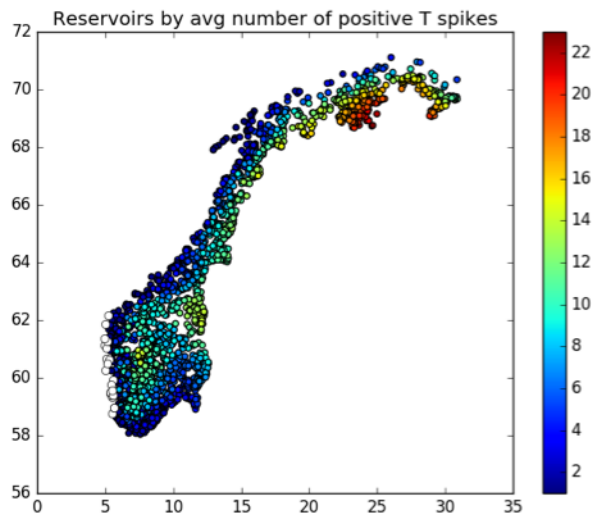
Figur 3.2 Ekspansjon av et isdekke på en innsjø (Bergdahl, 1978)

Termisk islast vurderes å bli størst ved isdekker med tykkelse $h = 0.3 - 0.5$ m (Ashton, 1986). Isens varmeisolerende egenskaper vil redusere oppbyggingen av store istrykk ved større istykkelser. Ved tynne isdekker vil angrepsflaten være liten og islasten blir begrenset. Sprekkene i isen vil ha stor påvirkning på størrelsesordenen til islasten. Sprekker i et isdekke vil primært være tørre eller våte. De tørre sprekkene vil kunne ta opp deformasjonen som følge av termisk utvidelse i isen, og reduserer trykkoppbyggingen. Et isdekket med våte sprekker vil ikke kunne ta opp en lignende deformasjon (Fransson, 1988).

Et isdekke vil ha deformasjonssoner, og vil også ha deformasjonssoner langs randen av dekket (Ashton, 1986). Deformasjonssonene vil kunne ta opp deformasjoner, og vil kunne hindre oppbygging av istrykk. Et fast innspent isdekke vil derfor ha et vesentlig høyere potensiale for oppbygging av istrykk, enn et mindre innspent dekke.

Størrelsen på en islast på en konstruksjon er, i tillegg til isens mekaniske og fysiske egenskaper, avhengig av egenskapene til konstruksjonen. Egenskaper som geometri og stivhet vil ha stor påvirkning på konstruksjonens motstandsevne. I tidligere litteratur har det kommet fram at størrelsen på konstruksjonen har en avgjørende betydning for opptredende påkjenninger fra isen. I hovedsak er dette på grunn av at utbredelsen av deformasjonssonene i isen er større ved stort areal (Fransson, 1988).

Et lasttilfelle vil oppstå i et isdekke ved at den gjennomsnittlige lufttemperaturen, T , er lavere enn -2°C og øker med mer enn 5°C over to døgn. Individuelle lasttilfeller skilles ved et temperaturfall på 5°C over ett eller to døgn (Petrich m. fl., 2015). En typisk dam i Norge vil ha 6-8 slike lasttilfeller i løpet av et år, men dette vil variere avhengig av geografiske og meteorologiske forhold (figur 3.3).



Figur 3.3 Oversikt over antall termiske lasttilfeller i løpet et år for magasiner i Norge (Norut).

Kort oppsummert påvirker følgende faktorer termisk islast:

- Størrelsen og raten av temperaturendring
- Varmeoverførsel fra toppen i isdekket og inne i isdekket
- Restriksjoner i forhold til ekspansjon langs rendene
- Krypegenskaper til isdekket
- Tørre, våte og brede sprekker i isdekket
- Tykkelsen på isdekket og snødekket
- Isens mekaniske egenskaper

3.3 Istrykk ved vannstandsvariasjon

I tillegg til termiske islaster, viser nylig forskning at variasjon i vannstands nivå også påvirker islasten signifikant (Comfort m. fl., 1998, Comfort m. fl., 2003, Stander, 2006, Blazevic, 2011, Taras m. fl., 2011). Det har tradisjonelt vært antatt at islast grunnet en vannstandsvariasjon i et magasin, kun vil skape en vertikal lastkomponent på konstruksjoner, og lasten har blitt beregnet separat fra termisk islast. I moderne tid har det blitt påvist at den også påvirker den horisontale lasten, og vil kunne både redusere og øke islasten. (Comfort m. fl., 2003).

Isprosessene for et isdekk i et magasin som blir utsatt for en vannstandsvariasjon vil være mye mer kompleks enn prosessene rundt temperaturvariasjon (Morse og Richard, 2009). Dette kommer av at isdekket vil få større fysisk og mekanisk påkjenning fra ytre omgivelser (Comfort m. fl., 2003).

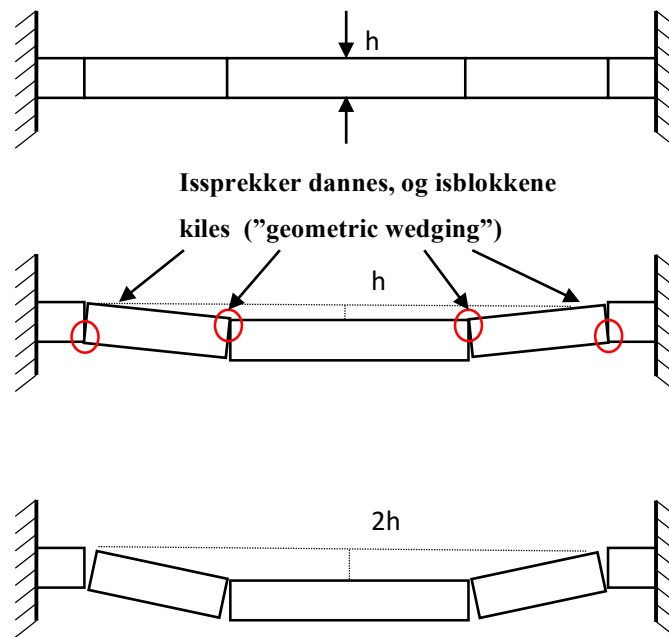
Et stort måleprogram ble gjennomført i Canada fra 1991 – 2000 (Comfort m. fl., 2003).

Motivasjonen med måleprogrammet var å måle lastene fra isdekker på åtte forskjellige dammer i Manitoba, Ontario, Quebec og Labrador. Her skulle det måles islast på dammer og på luker. Det ble også utviklet beregningsmodeller for å forutse og beregne islast.

Måleprogrammet indentifiserte viktigheten av vannstandsvariasjon for islast på en dam. Når isdekket ble utsatt for en betydelig vannstandsvariasjon ble islasten funnet til å være større og mer variabel enn lastene som kun kommer fra termisk ekspansjon. Istrykkelsen for de målte tilfellene var mellom 0,3 – 0,7 meter (Comfort m. fl., 2003).

Maksimalverdiene for de målte linjelastene, som resultat fra termisk ekspansjon og med neglisjerbar vannstandsvariasjon, varierte fra 61 – 85 kN/m, med en gjennomsnittsverdi på 70 kN/m (Comfort m. fl., 2003). Maksimalverdiene av linjelastene med både bidrag fra termisk ekspansjon og betydelig vannstandsvariasjon varierte fra 52 – 374 kN/m, med en gjennomsnittsverdi på 186 kN/m (Comfort m. fl., 2003).

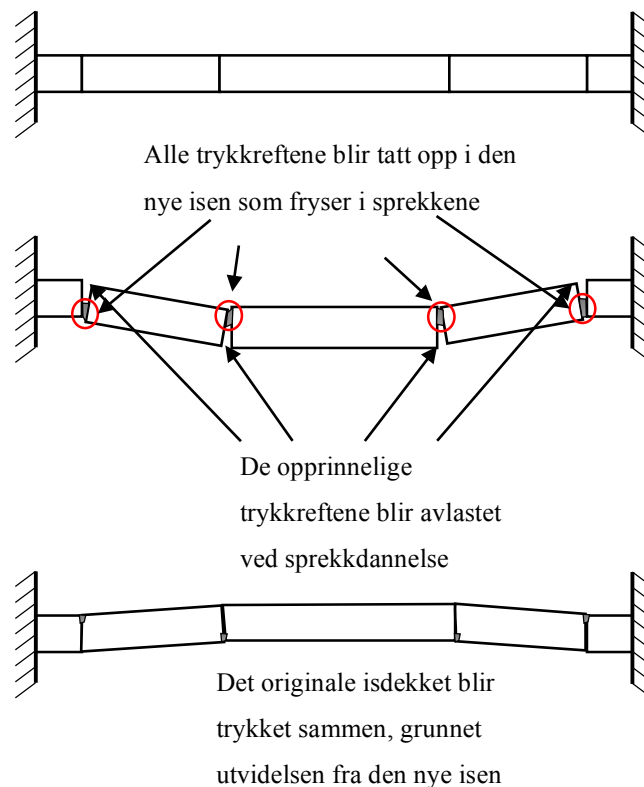
Laster som dannes på grunn av vannstandsvariasjon blir dannet hovedsakelig av to fysiske fenomener. (1) lasten fra selve vannstandsvariasjonen, altså lasten som blir produsert kun fra en variasjon av vannivå (figur 3.4); (2) volumutvidelse av isdekket grunnet tilfrysing av våte sprekker som oppstår under en vannstandsvariasjon (figur 3.5).



Figur 3.4 Illustrasjon av isdekkets mekanismer når det er utsatt for en vannstandsvariasjon.

Et isdekke vil typisk oppføre seg sånn som i figur 5.4 ved en vannstandsvariasjon. Isblokken nær dammen blir tvunget til å rotere for å ta opp den vertikale forskyvningen. Den vertikale forskyvningen fører til at det oppstår sprekker i isdekket som fører til at det dannes isblokker som gnisser mot hverandre. Dette skaper en kileeffekt¹ som fører til en økt last på dammen (Comfort m. fl., 2003).

¹ I litteratur skrevet på engelsk blir denne effekten kalt "geometric wedging".



Figur 3.5 Illustrasjon av et isdekke som blir utsatt for en vannstandsvariasjon. Figuren illustrerer hendelsesforløpet til en volumutvidelse av vannfylte sprekker.

Hvis vannstandsvariasjonen er av så stor størrelse at isdekkets nedbøyning fører til at sprekkene blir vannfylt vil et annet lasttilfelle oppstå (figur 3.5). Hvis de vannfylte sprekkene blir utsatt for kalde temperaturer vil de kunne fryse som fører til en volumutvidelse av isdekke. Smale sprekker vil kunne fryses raskere enn brede sprekker, mens brede sprekker vil ha en større volumutvidelse(Comfort m. fl., 2003). En slik volumutvidelse vil normalt oppstå etter at vannstanden har gått opp til normalt nivå.

Comfort m.fl. (2001) og Comfort m.fl. (2003) identifiserer at en slik volumutvidelse vil føre til en økt islast, og at den vil være forventet å opptre når vannivået går opp til normalt nivå. I beregningsmodellen presentert i samme rapport er derimot dette lastbidraget ikke beskrevet. Bidraget er derimot benyttet for beskrive å lastforløpet. Det er i dag ingen beregningsmodeller som beskriver et lastbidrag fra en volumutvidelse av et isdekke.

Kort oppsummert påvirker følgende faktorer islast grunnet vannstandsvariasjon:

- Størrelsen og raten av vannstandsvariasjonen
- Sprekkemønster, før og etter vannstandsvariasjon
- Restriksjoner i forhold til ekspansjon langs rendene
- Krypegenskaper til isdekket
- Tørre, våte og brede sprekker i isdekket
- Temperaturvariasjon i isdekket og i luften
- Tykkelsen på isdekket og snødekket
- Isens mekaniske egenskaper

4 DAGENS REGELVERK OG ANBEFALINGER

4.1 Norsk regelverk

Da vannressursloven ble gjort gjeldende i 2001, ble det utgitt et sett med nye forskrifter. NVE bestemte at det var nødvendig å revidere damforskriften fra 1981. Gjennom ”Prosjekt damsikkerhet” og ”Internkontrollprosjektet”, som var et samarbeid mellom NVE, rådgivere og dameiere, ble det utformet en ny forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg (sikkerhetsforskriften) og tilhørende retningslinjer. I 2010 ble forskriften om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) gjeldene. Forskriften erstattet tidligere versjoner av reguleringene, samt noen spesifikke bestemmelser fra andre veiledere. Alle veiledere blir i dag revidert fortløpende slik at alle til slutt refererer til forskriften fra 2010 (NVE, 2003).

I dagens regelverk blir islast definert som en miljølast. En miljølast er en last forårsaket av klimatiske, mikroklimatiske og topografiske påvirkninger (Damsikkerhetsloven)

Karakteristiske verdier for miljølaster bestemmes normalt ut fra krav til sannsynlighet for overskridelse basert på statistiske data. For miljølaster hvor tilstrekkelig statistisk datagrunnlag ikke foreligger, skal forventede maksimalverdier anvendes, fastsatt etter faglig vurdering av forholdene på stedet.

I Retningslinjer for laster og dimensjonering til §§ 4-1 og 4-2 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg blir islast beskrevet slik: ”Laster mot konstruksjonen som følge av termisk utvidelse av is. Vannstandsvariasjoner og is i bevegelse kan også gi vertikale og/eller dynamiske påkjenninger. Frysing av vann i lukkede systemer kan også gi opphav til store tilleggslaster.”(NVE, 2003).

Dammer skal i dag dimensjoneres for istrykk. Lovverket definerer istrykk primært som en termisk last. Det vil si det statiske trykket som isen utøver på grunn av utvidelse når lufttemperaturen øker. I tillegg til den termiske lasten, skal det også vurderes hvorvidt tilleggskrefter oppstår. Tilleggskreftene kan forårsakes av hyppige vannstandsvariasjoner, spenningsomlagring, samt dynamiske påkjenninger fra is i bevegelse. Hvis det blir vurdert at kreftene har påvirkning på konstruksjonen skal de også tas med i betraktning ved dimensjonering.

Ved beregning av istrykket skal det forutsettes at trykket virker som en linjelast som har angrepspunkt 0.25 m under høyeste regulerte vannstand. I dagens regelverk er definisjonen at islasten følger konstruksjonen som en gravitasjonslast. Normalverdi for islast skal forutsettes å ligge mellom 100 kN/m og 150 kN/m. Kravene gjelder i hele Norge.

Verdien på islasten blir fastsatt etter vurdering av:

- Isdekkets innspenningsforhold
- Vannstandsvariasjoner
- Frostmengde på stedet
- Spesielle geografiske og klimatiske betingelser
- Driftserfaringer (eks opptredende vannstander ved islagt magasin, observerte istrykkelser o.l.)
- Konstruksjonens egenskaper
- Bruddkonsekvenser

Ifølge NVE(2003) skal islasten for dammer i laveste bruddkonsekvensklasse settes til 100 kN/m. Ved spesielle tilfeller kan det aksepteres lavere verdier, hvis det foregår en begrunnelse for den valgte verdien. Til eksempel kan islasten bli satt til lavere enn 100 kN/m ved dammer og luker med varmekabler eller bobleanlegg, hvor sikkerheten ivaretas gjennom instrumentering og jevnlig overvåking.

For tilfeller der det forekommer hyppige vannstandsvariasjoner i magasinet sier NVE(2003) at det samlede istrykket vil bli vesentlig større enn det termiske istrykket. Eksempelvis kan dette gjelde elvekraftverk og inntaksmagasin med en døgnvariasjon større enn +/- 0,2 m. Islasten vil da være avhengig av istrykkelsen. Istrykkelsen blir beskrevet som frostmengden på stedet.

Øvre grense for islast med hyppige vannstandsvariasjoner i magasin kan settes til:

$$P_{is-maks} = 250 * h^{1,5} \quad (4.1)$$

der: h = Istrykkelse [m]

Istykkelse kan antas å være:

$$h_{\text{maks}} = 0,02 * F^{0,5} \quad (4.2)$$

der: $F =$ Frostmengde, F_{100} [$^{\circ}\text{C} * \text{dager}$]

Verdien for frostmengde er hentet fra Statens Vegvesens Håndbok 163(Statens Vegvesen, 2006):

$$F_{100} = 25\,000 \text{ h}^{\circ}\text{C} = 1042 \text{ d}^{\circ}\text{C}$$

Maksimal istykkelse blir beregnet ut fra formel 4.2:

$$h_{\text{maks}} = 0,02 * 1042^{0,5} = 0,65 \text{ m}$$

Maksimal islast for dam Taraldsvikfossen blir beregnet ut fra formel 4.1:

$$P_{\text{is-maks}} = 250 * 0,65^{1,5} = 131 \text{ kN/m}$$

Beregningsformlene er satt ut i fra en forskningsrapport som ble utført i Norge (EBL Kompetanse 2002). I rapporten ble det utført en grundig litteraturstudie, in situ målinger av islast på dam Silvann i Narvik vinteren 1998/1999 og beregninger av åtte ulike dammer i Norge. Målingene fra dam Silvann varierte fra 50 – 135 kN/m (110 – 320 kPa), med en istykkelse som varierte fra 0.51 – 0.62 m (Hoseth og Fransson 1999). Målingene ble gjennomført med sirkulære lastceller med en diameter på 0.3 m (EBL Kompetanse 2002).

I andre publikasjoner (Kjeldgaard og Carsten 1980, Tsinker 1995) blir typiske verdier for islast i Norge presenter som 100 kN/m ved normale isforhold, og til 150 – 200 kN/m ved særdeles ugunstige forhold.

4.2 Internasjonalt regelverk

4.2.1 Sverige

I Sverige definerer regelverket også islast som en termisk last. Den anbefalte termiske islasten varierer fra 50 til 200 kN/m avhengig av geografiske plassering. Den anbefalte verdien for dammer plassert sør i landet vil være 50 kN/m. Anbefalt verdi for dammer rundt Stockholm og Karlstad er 100 kN/m, og alle fylker plassert nordligere vil være 200 kN/m (RIDAS, 2008). Islasten sine mekansimer og statistikk over isforhold er basert på anbefalinger av Fransson og Bergdahl (Fransson og Bergdahl, 2009).

4.2.2 USA

For stabilitetsberegninger av dammer i USA er beregningsmetode og anbefalte verdier for termisk islast basert på en beregningsmodellen (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) og et femårig måleprogram (Sanderson, 1988). Statisk islast blir definert som en termisk last eller en last fra vannstandsvariasjon.

For å beregne islasten må istykkelsen beregnes ut ifra klimatisk forhold. Det er ikke oppgitt noen geografiske grenser for islasten, slik som i Sverige (EBL Kompetanse AS, 2002). Beregningsverdiene for islasten varierer fra 200 – 400 kN/m, mens målt islast i USA varierer fra 100 – 350 kN/m (Sanderson, 1984). Annen litteratur (Kocahan and Rodionov, 2003) anbefaler 150 kN/m for 0,64 m tykt isdekke, og 220 kN/m for 0,9 m tykt isdekke.

4.2.3 Canada

I regelverket for dammer i Canada er det antatt at istrykket varierer lineært med istykkelsen. For henholdsvis 0,3 og 0,6 m tykke isdekker er anbefalt verdi for islast 150 og 220 kN/m (Canadian Department of Environmental, 1971). I nyere litteratur (Tsinker, 1995, Kocahan and Rodionov, 2003) anbefales en verdi for islast 150 – 220 kN/m for stive konstruksjoner, og 70 – 75 kN/m for fleksible konstruksjoner.

I et studie som fokuserte på statiske islaster på dammer i Canada (Comfort m. fl., 2003), ble det målt betydelige høyere islast enn tradisjonelle verdier (374 kN/m). Disse lastene oppstod ved en kombinasjon av termisk utvidelse og vannstandsvariasjon. Basert på disse målingene ble det utformet en veileder (Static Ice Loads On Hydro-Electric Structures, 2003) som kan brukes for sikkerhetsanalyser og stabilitetsberegninger for dammer i Canada. Veilederen viser til målte verdier fra 61 – 374 kN/m for maksimal islast.

4.2.4 Østerrike

I designfasen brukes det i Østerrike et kriterium som gir en anbefalt verdi for islast lik 146 kN/m. I sikkerhetsanalyser og vurderinger for en driftsituasjon, kontrolleres dammene og istrykk som varierer fra 14 – 48 kN/m (EBL Kompetanse AS, 2002).

5 TIDLIGERE BEREGNINGSMETODER

Følgende kapittel er en gjennomgang av tidligere forslag til beregningsmetoder for istrykk. Flere av dem fokuserer på isens reologi, noen kun på termisk diffusjon og andre har prøvd å beskrive hele lastprosessen. Det vil bli fokusert på beregningsmodeller som beskriver istrykket som oppstår i isen, og dermed ikke på modeller som fokuserer på enkelte fysiske eller mekaniske aspekter for isen. Det vil dog være nødvendig å presentere aspektene som ligger til grunn. Modellene vil bli presentert med de originale benevningene og symbolbruk. Beregningsmodellene vil bli brukt for å beregne opptredende islast for dam Taraldsvikfossen. Resultatene vil kunne variere, og vil skape en større forståelse for maksimal teoretisk islast og hvilke parametere som påvirker den maksimale islasten mest. Alle resultatene vil bli sammenliknet med dagens regelverk og utførte målinger. I tillegg til resultatet fra beregningsmodellene, er det også blitt foretatt en gjennomgang av tidligere foreslått maksimal islast. Alle beregningene er presentert i vedlegg A.

5.1 Termisk islast

Resultatene fra målingene på dam Taraldsvikfossen er primært istrykk som oppstår fra en vannstandsvariasjon, men det er viktig å få en helhetlig oversikt over beregningsmetodene for islast. Da islast tradisjonelt har blitt målt som en termisk last, er det nødvendig å gjennomgå disse beregningsmodellene.

5.1.1 Temperaturendring

For å kunne beregne spenningene som oppstår i isen ved en termisk ekspansjon, er det nødvendig å legge til grunn den dimensjonerende temperaturendringen (Bergdahl, 1978).

Formel 5.1 blir brukt for beregning av dimensjonerende temperaturendring:

$$\Delta\theta = \frac{(\theta_{\min} - \theta_{\text{mid}})}{\lambda_{\text{overgang}}} \quad (5.1)$$

der: $\Delta\theta$ = dimensjonerende temperaturendring [°C]
 θ_{\min} = laveste lufttemperatur [°C]
 θ_{mid} = midlere lufttemperatur, <0 [°C]
 $\lambda_{\text{overgang}}$ = overgangsmotstand mellom luft og isoverflate

For dam Taraldsvikfossen gjelder følgende data:

$$\theta_{\min} = -34,0^{\circ}\text{C} \text{ (Meteorologiske institutt, 2017)}$$

$$\theta_{\text{mid}} = 3,5^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \text{ (Statens Vegvesen, 2006)}$$

$$\lambda_{\text{overgang}} = 0,608$$

Dimensjonerende temperaturendring for dam Taraldsvikfossen blir:

$$\Delta\theta = \frac{(-34-0)}{0,608} = -55,92^{\circ}\text{C}$$

5.1.2 Elastisk materiale

Termisk ekspansjon av is blir vanligvis beskrevet:

$$\varepsilon = \alpha * \Delta\theta \quad (5.2)$$

der ε = termisk tøyning

α = termisk utvidelseskoeffisient [$^{\circ}\text{C}$]

$\Delta\theta$ = dimensjonerende temperaturendring [$^{\circ}\text{C}$]

For videre beregning av istrykk blir følgende formel brukt:

$$\sigma = \varepsilon * E_{is} \quad (5.3)$$

der σ = istrykk [kPa]

ε = termisk tøyning

E_{is} = E-modul for is [MPa]

For beregning av maksimal islast blir følgende formel brukt:

$$P_{is} = \sigma * A \quad (5.4)$$

der P_{is} = islast [kN/m]

σ = istrykk [kPa]

A = isdekkets tverrsnittsareal [m^2]

Beregningsmodellen er en forenklet modell, og tar blant annet ikke hensyn til kryp eller riss.

Modellen antar også at spenningsfordelingen er helt lineær. Opptredende islast vil derfor

forventes å bli unaturlig høy sammenliknet med andre beregningsmodeller. Det vil da være rimelig å anta at krypdeformasjon, riss og en ikke-lineær spenningsfordeling vil være viktige parametere når man beskriver termisk islast.

5.1.3 Røyen (1922)

Den første vitenskapelige forskningen på istrykk mot dammer, som vi kjenner til, er fra en publikasjonen fra Røyen (Røyen, 1922). Røyen oppdaget at is, ulikt andre konstruksjonsmaterialer, er et meget tidsavhengig materiale. For å lage en god beregningsmodell, sammenliknet Røyen krypdeformasjonsgrafer med grafer fra tidligere litteratur (Hess, 1902, Kreuger, 1921).

Røyen foreslo så følgende formel for bestemmelse av maksimalt opptredende trykk ved en temperaturendring:

$$\sigma_{\max} = 0.9772 * \frac{\alpha}{c} * (T_i + 1) * \sqrt[3]{\dot{T} * (T_i + 1)^2} \quad (5.5)$$

- der:
- σ_{\max} = maksimalt istrykk [kp/cm^2]
 - α = termisk utvidelseskoeffisient [$^{\circ}\text{C}$]
 - c = konstant, $6 * 10^{-4} < c < 9 * 10^{-5}$ [$^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{kph}^{1/3}$]
 - T_i = midlere temperaturendring i isen [$^{\circ}\text{C}$]
 - \dot{T} = temperaturrate [$^{\circ}\text{C}/\text{h}$]

Ved å sette $\alpha = 5,5 * 10^{-5}^{\circ}\text{C}$ og $c = 6 * 10^{-4}^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{kph}^{1/3}$ blir maksimal islast beskrevet med formelen:

$$P_{\max} = 0.9h * (T_i + 1)^3 * \sqrt[3]{\dot{T} * (T_i + 1)^2} \quad (5.6)$$

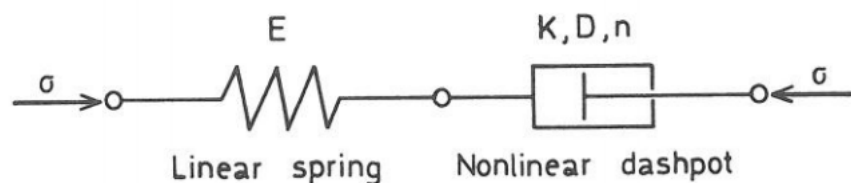
- der: h = istykkelse [m]

I følge Røyen kunne den teoretiske islasten mot en dam bli $P_{\max} = 345 \text{ kN}/\text{m}$, ved en temperaturstigning på 40°C . Dette er mye høyere enn det dagens regelverk foreslår. Modellen har dog flere mangler:

- Teorien rundt strekk-trykk-forholdet beskrevet av Røyen ble funnet ved hjelp av forsøk med parafinvoks, noe som ikke simulerer egenskapene til ferskvannsis. Forholdet ble hovedsakelig basert på tester med innsjøis. Begge disse forholdene gjør derfor modellen uegnet for å beskrive oppførselen til ferskvannsis (Kjeldgaard og Carstens, 1980)
- Det ble ikke sett på isens forskjellige krepstadier
- Elastisk deformasjon av isdekket ble neglisjert
- Forskjellen på enaksiell og biaksiell lasttilfeller ble ikke diskutert
- Temperaturen er antatt å opptre uniform over isens tykkelsen, noe som tilsier at maksimalt istrykk vil være proporsjonalt med istykkelsen.
-

5.1.4 Bergdahl (1978)

Noen forskere har påpekt at lineær viskøs-elastiske modeller gir en utilfredsstillende beskrivelse av trykk/strekk-forholdet i isen (Ashton, 1986). Bergdahl (Bergdahl, 1978) foreslo en modell som anser isen som et elastisk-plastisk materiale (figur 5.1). Modellen er en enkel ikke-lineær reologimodell som består av en lineær fjær i en serie av ikke-lineære dempere



Figur 5.1 Ikke-lineær reologimodell brukt av Bergdahl (Bergdahl 1978).

Differensiallikningen til figuren blir:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + KD(\sigma)^n \quad (5.7)$$

der: σ = istrykk [kPa]
 E = E-modul [kPa]
 K og n = empirisk konstant
 D = koeffisient for diffusjon

Temperaturavhengigheten av den viskøse krypraten er beskrevet av Arrhenius' formel for diffusjon:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_s}{RT_{\text{abs}}}} \quad (5.8)$$

der $D_0 = (9,13 \pm 0,57) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $Q_s =$ aktiveringsenergien (selvdiffusjonsenergi), 59,8 kJ/mol
 $R =$ gasskonstanten, 8,31 J/mol*K
 $T_{\text{abs}} =$ absolutt temperatur [K]

Basisen for verdiene på K og n er fra eksperimenter utført på isens monokrystaller lastet parallelt med basalplanet (Drouin, 1971, Drouin og Michel, 1974). Drouin og Michel (1974) sin beregningsmodell resulterer i høyere istrykk sammenliknet med Bergdahl (1978) sin modell (Bergdahl, 1978). Hovedgrunnen for dette er at Bergdahl (1978) valgte en mye høyere E-modul verdi (6.1 GPa) enn Drouin og Michel (1974) (1.5 GPa). Resultatet av deformasjonsreduksjonen i Drouin og Michel (1974) reduserte den kalkulerte islasten, og derfor virker resultatene fra Bergdahls (1978) modell å ha for høy verdi (Fransson, 1988).

For beregning av maksimal termisk islast viser Bergdahl (1978) til:

$$P_b = 2 \sqrt{\frac{\rho_w g E h^3}{12(1-\nu^2)}} \quad (5.9)$$

der $\rho_w =$ densiteten til vann [kg/m³]
 $g =$ tyngdeakselerasjonen, 9,81 m/s²
 $E =$ E – modul [MPa]
 $h =$ istykkelse [m]
 $\nu =$ Poissons konstant

5.1.5 Fransson (1988)

Fransson (1988) foreslår en to-steps prosess for å bestemme istrykk. Modellen går ut på å bestemme maksimalt istrykk ved senter av isdekke ved en enkel analytisk modell, og deretter beregne maksimal islast ved å anta en trykkfordeling i isen. Det er mulig å anta at summen av istrykket i et isdekke kan bli basert på deformasjonsutviklingen i senteret av isen. Fransson (1988) foreslår derfor at det er en sammenheng mellom historisk klimadata og den opptredende temperaturen i isens senter.

Temperaturen ved en vilkårlig dybde, x , og tid, t , i isdekke kan bli beregnet ved å anta endimensjonal varmekonduktivitet. Endringen i temperatur ved senter av isen øker med en tilnærmet rett linje i løpet av en tidsperiode der det totale istrykket øker.

Reologimodellen som Fransson (1988) bruker består av en lineær fjær i en serie av ikke-lineære og temperaturavhengige dempere. Trykket, σ , skal forestille en-aksialt trykk:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + B\left(\frac{\sigma}{\sigma_*}\right)^n \quad (5.10)$$

der: $\dot{\sigma}$ = trykkrate [kPa]
 E = E-modul [kPa]
 σ = istrykk [kPa]
 σ_* = indeks istrykk [kPa]
 n = empirisk konstant
 B = temperaturavhengig kryprate

Den temperaturavhengige krypraten kan blir beregnet ved:

$$B = B_0 \left(\frac{T_*}{T_1 - T}\right)^m \quad (5.11)$$

der: B_0 = tøyningraten ved $T=0$
 T_* = Indeks temperatur, $+1^\circ\text{C}$
 T_1 = empirisk konstant
 T = temperatur [$^\circ\text{C}$]
 m = empirisk konstant

Den anbefalte reologimodellen baserer seg på samme parametere som modellen presentert av Bergdahl (1978). Hovedforskjellen mellom modellene er at den empiriske konstanten, n , er kalibrert opp mot feltmålinger. Det er derfor forventet at reologimodellen til Fransson (1988) gir en mer realistisk verdi. Ut ifra modellen blir maksimal istrykk beregnet:

$$\sigma_{\text{maks}} = \sigma_* \left(\frac{\alpha \dot{T}}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.12)$$

der: α = lineær konstant for termisk ekspansjon
 \dot{T} = temperaturrate
 B = krypraten ved temperaturen når $\sigma_{\text{maks}} = \sigma$

Differensiallikningen (5.13) kan løses empirisk ved å bruke FDM-analyse, men mangelen på en analytisk løsning for reologilikningen, samt at konstanten n ikke kan bestemmes ved enkle materialtester, gjør det svært komplisert å beregne lastsituasjoner med lav trykkverdi. Ved slike situasjoner anbefaler Fransson (1988) å bruke enklere beregningsmodeller.

Videre presenterer Fransson (1988) hvordan opptredende istrykk og islast kan beregnes ved en enkel analytisk modell. Modellen tar for seg et isdekke med kjente parametere og med komplett lateral fastholdning. Det potensielle istrykket i senter av isdekke beskrives:

$$\sigma_{0.5}^{\text{maks}} = a_1(-T_0)b_{0.5}e^{(-a_2d\left(\frac{-b_{0.5}}{T_0}\right))} \quad \text{for } 0.2 < d < 2 \text{ m} \quad (5.13)$$

$$\text{og } \sigma_{0.5}^{\text{maks}} = a_3(-T_0)^{1.5}d^{-1} \quad \text{for } d > 0.5 \text{ m} \quad (5.14)$$

der: a_1 = 0.224 (α/c)
 a_2 = 2.49
 a_3 = 0.331 (α/c)
 T_0 = temperaturvariabel [$^{\circ}\text{C}$]
 d = istykkelse [m]
 b = temperaturrate [$^{\circ}\text{C}/\text{h}$]

Islasten, P, kan så bestemmes:

$$P = \beta \sigma_{0.5}^{\text{maks}} d \quad (5.15)$$

der: β = funksjon av trykkfordelingen

5.2 Islast ved vannstandsvariasjon

5.2.1 Comfort m. fl. (2003)

Comfort m.fl. (2000) identifiserte at vannstandsvariasjon hadde en stor påvirkningen på den horisontale islasten. Parallelt med et omfattende måleprogram, på både termisk islast og islast ved vannstandsvariasjon, ble det utformet to ulike beregningsmodeller som beskriver begge situasjonene. Begge modellene baseres på empiri, og er et resultat fra måleprogrammet.

I følge Comfort m.fl. (2003) er den termiske islasten avhengig av to bidrag:

- Innebygd istrykk som oppstod før starten av lasttilfellet
- Linjelast fra termisk utvidelse som et resultat fra endring i lufttemperatur og nedbør

(1) For beregning av termisk islast foreslår Comfort m.fl. (2003) følgende formel:

$$LL_{\text{total}} = \Delta LL_{\text{thermal}} + LL_{\text{residual}} + LL_{\text{contingency}} \quad (5.16)$$

der: $\Delta LL_{\text{thermal}}$ = linjelast grunnet temperaturendring i isen [kN/m]

LL_{residual} = linjelast grunnet det innebygde trykket i isdekke [kN/m]

$LL_{\text{contingency}}$ = last for å sikre at målt last ikke overstiger beregnet last [kN/m]

Comfort m.fl. (2003) anerkjente at denne tilnærmingen ikke er korrekt i forhold til isens reologiske oppførsel, men understreket at hovedmotivasjonen med å lage den empiriske modellen var å kunne forutse opptredende islast.

(2) Linjelast grunnet temperaturendring beregnes ved følgende formel:

$$LL_{\text{thermal}} = 0.064\Delta A^{0.6}h^{0.88}\text{Dur}^{f(\Delta A)} \quad (5.17)$$

der: ΔA = endring av profilområde til istemperaturen [$^{\circ}\text{Ccm}$]

h = istykkelse [cm]

Dur = lasttilfellets varighet [dager]

$$f(\Delta A) = \min\left(\log\frac{160}{\Delta A}\right); 0 \quad (5.18)$$

(3) Islast grunnet det innebygde trykket i isdekke beregnes ved følgende formel:

$$LL_{\text{residual}} = -0.00528A_i + 21.37 \quad (5.19)$$

der: A_i = profilområde til istemperaturen [$^{\circ}\text{Ccm}$]

Comfort m.fl. (2003) oppdaget at islastens målte verdi var både høyere og mer varierende når magasinet ble utsatt for en vannstandsvariasjon. Lasten økte i verdi når både temperaturendringer og vannstandsvariasjonen påvirket isdekke. I følge beregningsmodellen Comfort m.fl. (2003) presenterer er islast grunnet vannstandsvariasjon avhengig av følgende bidrag:

- Islast som et resultat av at isdekke blir utsatt for en vannstandsvariasjon
- Kombinert last når temperaturendring og vannstandsvariasjon påvirker isdekke

(1) For beregning av total islast ved en kombinasjon av temperaturendring og vannstandsvariasjon viser Comfort m.fl. (2003) til følgende formel:

$$LL_{\text{total}} = \Delta LL_{\text{thermal}} + LL_{\text{residual}} + LL_{\text{waterlevel}} + LL_{\text{contingency}} \quad (5.20)$$

der: $LL_{\text{waterlevel}}$ = linjelast grunnet vannstandsvariasjon [kN/m]

(2) Linjelast grunnet vannstandsvariasjon beregnes ved følgende formel:

$$LL_{\text{waterlevel}} = F_1 \left[5 + (7.5 * 10^{-8})\Delta A^2 \frac{A_i^{1.2}}{\text{Dur}^{0.4}} \right] \quad (5.21)$$

F_1 bestemmes som følger:

$$F_1 = f(\Delta A)f(\text{drop})f\left(\frac{a}{h}\right) \quad (5.22)$$

der: $f(\Delta A) = \max \text{ of } 0 \text{ or } 1 - 4\left(\frac{\Delta A}{A_m}\right)$ (5.23)

$$f(\text{drop}) = \max \text{ of } 0 \text{ or } 1 - 20\left(\frac{\text{drop}}{2h}\right)^{24} \quad (5.24)$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = \left[\frac{1}{\max \text{ of } 0.22 \text{ or } \frac{a}{h}} \right]^2 \quad (5.25)$$

A_m = maksimalt profilområde til istemperaturen, $20 \cdot h$ °Ccm

a = gjennomsnittlig amplitude på vannstandsvariasjonen [cm]

drop = reduseringen eller økningen av vannivå [cm]

(3) Linjelast grunnet temperaturendring vil bli beregnet med formel 6.17, mens linjelast grunnet det innebygde trykket i isdekke beregnes ved følgende formel:

$$LL_{\text{residual}} = 0.37f(h) + \frac{1.47}{h} \quad (5.26)$$

der: $f(h) = h - 25$ for $h > 25$ [cm] (5.27)

Comfort m.fl. (2003) konkluderer med at beregningsmodellen for kun den termiske islasten er god, og stemmer godt overens med feltmålingene. For beregningsmodellen som kombinerer termisk islast og islast grunnet vannstandsvariasjon beskrives som mindre nøyaktig (Comfort m. fl., 2000, Comfort m. fl., 2003). Variasjonen mellom den målte og den beregnede lasten stemmer generelt godt for høye lastverdier, som er de mest kritiske verdiene.

5.3 Andre anbefalte maksimalverdier

5.3.1 Stander m.fl. (2006)

Stander (2006) presenter feltmålinger fra La Gabelle magasin som ligger i Quebec, Canada, for vinteren 1992/1993. Feltnmålingene var hovedsakelig på istrykk grunnet vannstandsvariasjon. Resultatet viser at en vannstandsvariasjon øker istrykket med 100 – 200 kPa ved en istykkelse på 0.75 m (Stander, 2006).

Måleprogrammet ble utvidet noen år senere. Det ble utført målinger på La Gabelle og tre dammer i Canada i perioden 1995-1998 (Carter m. fl., 1998). Følgende verdier for maksimal islast ble målt mot dammene:

Ved 0.1 m vannstandsvariasjon og 0.65 m tykt isdekke:

$$P_{\text{maks}} = 130 \text{ kN/m}$$

Ved 0.6 m vannstandsvariasjon og 0.70 m tykt isdekke:

$$P_{\text{maks}} = 145 \text{ kN/m}$$

5.3.2 Taras m.fl. (2011)

I 2007 ble det igangsatt et måleprogram som skulle evaluere islastens påkjenning på dammer. Måleprogrammet ble utført på La Gabelle vinteren 2007/2008 og vinteren 2008/2009, Beaumont vinteren 2008/2009 og Barrett Chute vinteren 2010/2011 (Morse og Richard, 2009, Taras m. fl., 2011, Morse m. fl., 2011).. Alle dammene ligger i Canada. Måleprogrammet fokuserte hovedsakelig på målinger av termisk islast.

Måleprogrammet viser til resultater med en generell størrelsesorden lik resultatene fra Stander (2006). Taras m.fl. (2011) viser til lasttilfeller der maksimal opptredende islast øker med 30 – 80 kN/m ved lastbidrag fra en vannstandsvariasjon. Følgende verdier for maksimal islast ble målt mot dammene:

Termisk islast ved 0.45 m tykt isdekke:

$$P_{\text{maks}} = 160 \text{ kN}$$

6 BEREGNING AV ISTRYKK

Det kommende kapittelet gjennomgår en analytisk beregningsmodell som beskriver de mekaniske aspektene til et isdekke som blir utsatt for vannstandsvariasjon. Det har aldri blitt forslått noen analytisk beregningsmodell for islast grunnet vannstandsvariasjon tidligere. Lastbidraget fra en vannstandsvariasjon har tradisjonelt blitt betraktet som et vertikalt lastbidrag, og har blitt behandlet separat fra den horisontale linjelasten (Ashton, 1986).

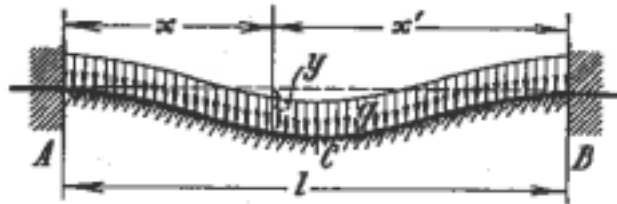
Hovedmotivasjonen for modellen er ikke å skape en komplett modell som kan forutse nøyaktig islast, men heller å skape et bedre kompetansegrunnlag for å forstå de ulike parameterne som påvirker den totale islasten.

Beregningsmodellen i dette kapittelet kombinerer lastbidragene fra en vannstandsvariasjon, fra temperaturendring og fra en arealutvidelse som følge av gjenfrysning av sprekker. Da modellen kun fokuserer på tre lastkomponenter vil den ikke være korrekt i forhold til isens reologiske oppførsel. Resultatverdien til modellen vil derfor forrustetes til å bli betraktelig høyere enn målt islast.

Isdekket er ansett som en todimensjonal bjelke med en kjent lengde, L , og som ligger på et elastisk underlag som representerer vannets oppdrift. For beregning av bjelker på elastisk underlag er det i dette kapittelet referert til Hetényi (1971) og Verruijt (1995). For beregning av bjelker utsatt for temperaturutvidelse blir det referert til Usmani m.fl. (2001).

6.1 Lastbidrag fra vannstandsvariasjon

Isdekket er ansett som en symmetrisk bjelke som er fast innspent i både dammens framside, A, og omliggende terreng, B (figur 6.1). Den jevnt fordelte lasten, q , representerer egenlasten til isdekke.



Figur 6.1 Bjelke fast innspent i begge endene, med jevnt fordelt last over hele lengden (Hetényi, 1971)

Det er antatt en konstant tykkelse, h , ved hele bjelkens lengde. Deretter kan vannstandsvariasjonen beskrives som nedbøyning i midten av bjelken ($x = x' = 0.5 l$).

(1) Vannstandsvariasjonen, y_c , kan bli beregnet med følgende formel (Hetényi, 1971):

$$y_c = \frac{q}{k} \left[1 - \frac{2(\sinh \frac{\lambda l}{2} \cos \frac{\lambda l}{2} + \cosh \frac{\lambda l}{2} \sin \frac{\lambda l}{2})}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \right] \quad (6.1)$$

$$\text{der: } \lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (6.2)$$

$$k = bk_0 ; k_0 = \text{modul til underlaget [N/mm}^3\text{]} ; b = \text{enhetsbredde}$$

$$EI = \text{bjelkens bøyestivhet [Nmm}^2\text{]}$$

$$q = \text{isdekkets egenvekt [N/mm]}$$

$$l = \text{isdekkets lengde [mm]}$$

(2) Vinkelen, θ , til nedbøyningen kan beregnes ved (Hetényi, 1971) :

$$\theta = \frac{2q\lambda}{k} \frac{\sinh \lambda x \sin \lambda x' - \sin \lambda x \sinh \lambda x'}{\sinh \lambda l + \sin \lambda l} \quad (6.3)$$

$$\text{der: } x = \text{isdekkets egenvekt}$$

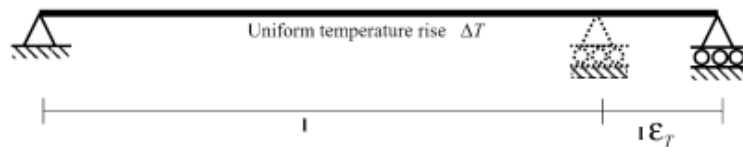
$$x' = \text{gjennomsnittlig amplitude på vannstandsvariasjonen [cm]}$$

(3) Opp tredende moment grunnet vannstandsvariasjon, M_V , på dammen beregnes ved følgende formel:

$$M_V = \frac{q \sinh \lambda l - \sin \lambda l}{2 \lambda^2 \sinh \lambda l + \sin \lambda l} \quad (6.4)$$

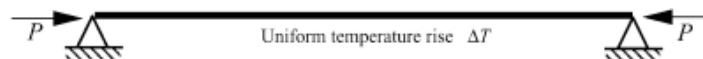
6.2 Lastbidrag fra temperaturendring

Ved en økning i temperatur vil et isdekke få en termisk utvidelse. Hvis et isdekke blir utsatt for en uniform temperaturøkning vil en fritt opplagt bjelke, uten aksielle restriksjoner, vil dekke forlenges horisontalt (figur 6.2).



Figur 6.2 Fritt opplagt bjelke utsatt for en uniform temperaturøkning (Usmani m. fl., 2001)

I følge regelverket blir en damkonstruksjon beregnet som uendelig stiv. Dette fører til at dammen ikke kan ta opp noe deformasjon eller lengdeutvidelse. Derfor vil en mer realistisk tilnærming være å anse isdekke som en bjelke uten mulighet for horisontal forflytning (figur 6.3).



Figur 6.3 Bjelke, uten mulighet for horisontal forflytning, utsatt for en uniform temperaturøkning (Usmani m. fl., 2001)

Ved å anta at isdekke ikke kan ekspandere i lengderetningen vil dammen trykke tilbake på isen med en kraft P . (1) Størrelsen på denne kraften kan beregnes ved:

$$P_T = EA\alpha\Delta T \quad (6.5)$$

der: E = E-modul [N/mm²]
 A = Areal [mm²]
 α = termisk utvidelseskoeffisient [°C]
 ΔT = Uniform temperaturøkning [°C]

Hvis temperaturen øker uendelig, vil isdekke knekke før dekke når flytespenningen. Denne lasten er beskrevet som Eulers knekklast, P_{cr} , og kan beregnes ved (Usmani m. fl., 2001):

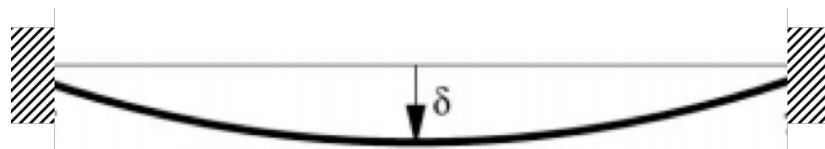
$$P_{cr} = \frac{\pi E}{l^2} \quad (6.6)$$

der: E = E-modul [N/mm²]
 l = Isdekkets lengde [mm]

6.3 Lastbidrag fra gjenfrysing av sprekker

Etter at en vannstandsvariasjon har virket på isdekke, og vannivået går opp til normalt nivå, vil vann sige inn i sprekken som har oppstått. Hvis temperaturen er lav nok vil vannet i sprekken fryse og føre til en lengdeutvidelse av isdekket.

Ved å anse isdekket som fast innspent, vil isdekke ha liten mulighet til å ekspandere i lengderetningen. Det er mer sannsynlig at det vil bøye seg opp eller ned for å unngå knusing (figur 6.4).



Figur 6.4 Bjelke med en utbøying grunnet fast innspenning og lengdeutvidelse

Bjelken vil beregnes likt som i kapittel 6.1, og ved beregning av moment blir formel (6.1) og (6.4) benyttet. Deformasjonen, δ , vil være lik utbøyingen, $w(x)$, og vil være avhengig av sprekkprofilen, antall sprekker og % av gjenfrysing av sprekkprofilen. Det antas videre at funksjonsforløpet til knekkformen vil ha en trigonometrisk funksjon, det vil si en sinusformet utbøyning. Ved en nærmere analyse av vertikalforskyvningen δ er det rimelig å anta at buelengden til bjelken er konstant, Dette er analogt med at aksialdeformasjonene neglisjeres.

(1) For å estimere δ kan buelengdeformelen benyttes:

$$s = \int \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} dx \quad (6.7)$$

(2) For små vinkler ($w \ll 1$) kan integranden forenkles ved hjelp av en rekkeutvikling:

$\sqrt{1+u} = 1 + (1/2)u - (1/8)u^2 + (3/48)u^3 - \dots$. Ved å kun ta med de to første leddene blir integralet:

$$s = \int_0^{L-\Delta} \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} dx \quad (6.8)$$

(3) Da aksialdeformasjonene blir neglisjert, må buelengden, s , mellom $x = 0$ og $x = L - \Delta$ være lik L . Videre kan det bestemmes et uttrykk for Δ :

$$\begin{aligned} s = L &= L - \Delta + \int_0^{L-\Delta} \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} dx \\ \rightarrow \Delta &= \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 dx \end{aligned} \quad (6.9)$$

I den siste overgangen er det antatt at bjelkens lengde $L \approx L - \Delta$.

(4) Da bjelken får en sinusformet utbøyning med en amplitude, w_0 , i midtsnittet kan uttrykket bli formulert på følgende måte:

$$w(x) = w_0 \sin\left(\frac{\pi}{L-\Delta}\right) \sim w_0 \sin\left(\frac{\pi}{L}\right) \quad (6.10)$$

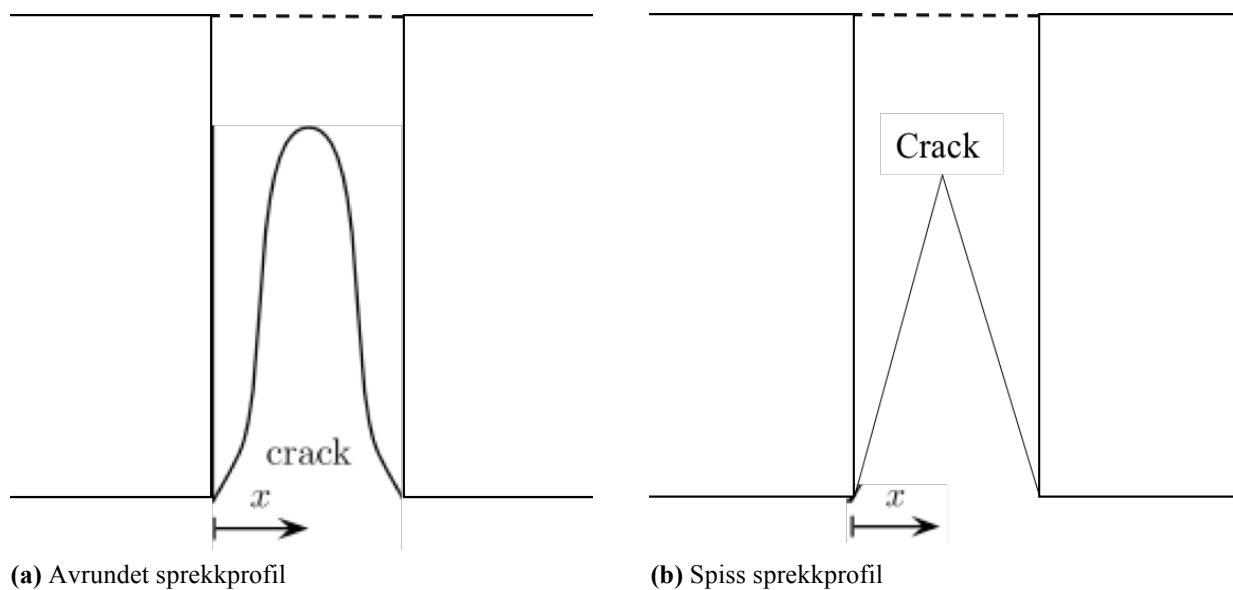
(5) Innsatt i formel 6.9 vil nedbøyningen på midten av bjelken bli uttrykt som:

$$\Delta = \frac{1}{2} \int_0^L \left(w_0 \frac{\pi}{L} \cos \left(\frac{\pi}{L} x \right) \right)^2 dx$$

$$\rightarrow \Delta = \frac{\pi^2 w_0^2}{4 L^2} L$$

$$\rightarrow w_0 = \sqrt{\Delta \frac{4L^2}{L\pi^2}}$$

En sprekkprofil vil typisk være enten spiss eller avrundet (Metge, 1976). Lengdeutvidelsen, Δ , av en sprekk vil være avhengig av tykkelse, dybde, profil og prosentvis gjenfrysning av sprekken. Der det spisse profilet (figur 6.5a) vil ha større potensiell lengdeutvidelse enn det avrundende profilet (figur 6.5b) ved lave vannstander da det vil ha et større areal. Vannet i profilet vil typisk fryse fra toppen og nedover (Metge, 1976).



Figur 6.5 Typiske sprekkprofiler for et isdekke. x representerer avstanden fra isblokken til senter

For å beregne potensiell lengdeutvidelse Δ kan følgende formel benyttes:

$$\Delta_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^N \Delta_n \quad (6.12)$$

der: n = antall sprekker parallelt på dammen

Δ_n = lengdeutvidelse av sprekk n [mm]

6.4 Lastmodell

For å kombinere alle de overnevnte lastbidragene vil superposisjonsprinsippet bli benyttet. Ved å superponere alle bidragene vil resultatet bli den totale spenningen som virker mot damkonstruksjonen. Lastbidragene fra vannstandsvariasjonen og gjenfrysningen av sprekker vil være et bøyemoment, mens lastbidraget fra termisk utvidelse vil være en normalkraft. Resultatet til superponeringen vil bli sammenliknet med målt istrykk i kapittel 8.5.

Isdekkets tverrsnitt blir ansett som kvadratisk med høyde lik istykkelsen og bredde lik en enhetsbredde (1 m).

(1) Lastbidraget til vannstandsvariasjonen kan bli beskrevet som en bøyespennning ved:

$$\sigma_{b1} = \frac{M_V}{I_{x0}} y \quad (6.13)$$

der: M_V = moment fra vannstadsvariasjon [Nmm]

$$I_{x0} = \text{det annet arealmoment} = \frac{bh^3}{12} \text{ [mm}^4\text{]} \quad (6.14)$$

$$y = \text{avstand til normalaksen} = \frac{h}{2} \text{ [mm]} \quad (6.15)$$

(2) Lastbidraget til termisk utvidelse kan bli beskrevet som en normalspenning ved:

$$\sigma_n = \frac{P_T}{A} \quad (6.16)$$

der: P_t = normalkraften fra termisk utvidelse [N]

$$A = \text{isdekkets tverrsnitt [mm}^2\text{]}$$

(3) Lastbidraget til vannstandsvariasjonen kan bli beskrevet som en bøyespennning ved:

$$\sigma_{b2} = \frac{M_F}{I_{x0}} y \quad (7.17)$$

der: M_F = moment fra arealutvidelse ved gjenfrysing av sprekker [Nmm]

Den totale spenningen som oppstår i isdekket kan deretter beregnes ved:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{b1} + \sigma_n + \sigma_{b2} \quad (7.18)$$

7 MÅLEPROGRAM

7.1 Motivasjon

Måleprogrammet på dam Taraldsvikfossen vinteren 2016/17 ble gjennomført som grunnlag for å etablere måleprosedyrer, bedre dimensjoneringsgrunnlaget og øke forståelsen for islast grunnet vannstandsvariasjon på dammer. Nyere forskning (Comfort m. fl., 2003, Blazevic, 2011) viser at islast grunnet vannstandsvariasjon, kombinert med termisk ekspansjon, har større teoretisk potensiale, større målt maksimal last og større lastvariasjon enn last kun generert fra termisk ekspansjon alene. Det har aldri blitt gjennomført målinger av islast med kontrollert regulering av et magasin tidligere, og resultatene er derfor av høy interesse for fagfeltet. Det er også utført en generell vurdering av måleprogrammet og måleresultatene som grunnlag for videreføring av liknende måleprogrammer.

Målet med programmet var hovedsakelig å simulere en vannstandsending, og se på isdekkets oppførsel og opptredende laster. Tidligere litteratur (Comfort m. fl., 2003) har kun sett på ukontrollerte reguleringer, og har derfor ikke hatt mulighet til å fremprovosere en slik last. Det er derfor helt unikt å kunne simulere slike lastsituasjoner ved tilnærmet optimale forhold.

7.2 Målested

Det ble lagt stor vekt på å finne et målested der forholdene lå til rette for oppbygging av et betydelig istrykk. Magasinet måtte derfor være lokalisert på et område der det var stabilt lave temperaturer og med få ytre påkjenninger i form av vind eller store. Samtidig måtte målestedet ha mulighet for kontrollert regulering uten store økonomiske eller miljømessige konsekvenser. Det var også nødvendig å finne et anlegg der adkomst var enkel med henhold til oppfølging.

Det ble etter avtale med Norut Narvik valgt å utføre måleprogrammet på dam Taraldsvikfossen. Norut Narvik har siden vinteren 2012/2013 utført målinger av statisk islast, grunnet termisk ekspansjon, på dam Taraldsvikfossen. Det var derfor godt tilrettelagt for målinger av islast fra vannstandsvariasjon på dam Taraldsvikfossen.

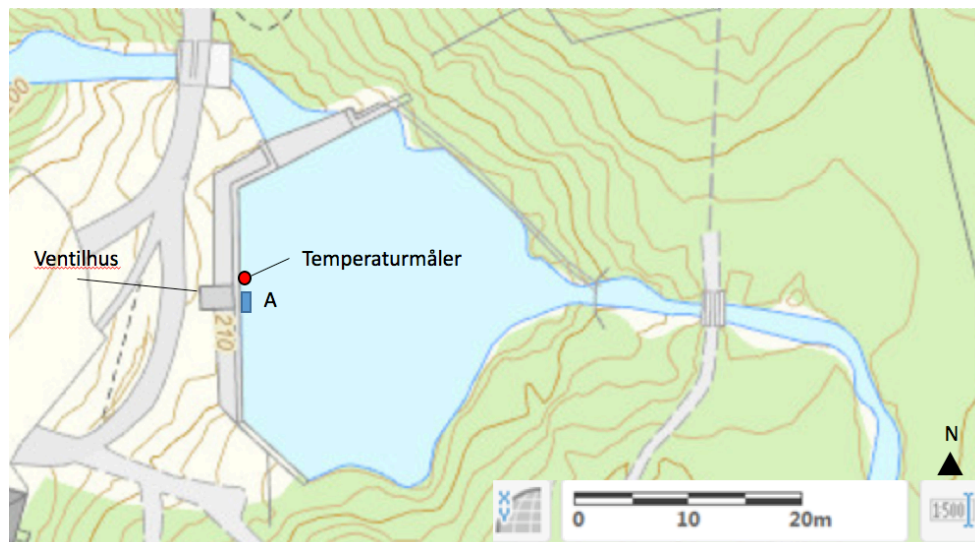
Dam Taraldsvikfossen er en gravitasjonsdam, med et tilhørende magasin. Magasinet fungerer som en reserveløsning til drikkevannskilde til Narvik by. Dammen er av typen gravitasjonsdam i betong med vertikal flate på vannsiden. For nærmere geometri og detaljer av dam og magasin se kapittel 1.3.

7.3 Metodikk

7.3.1 Installasjon

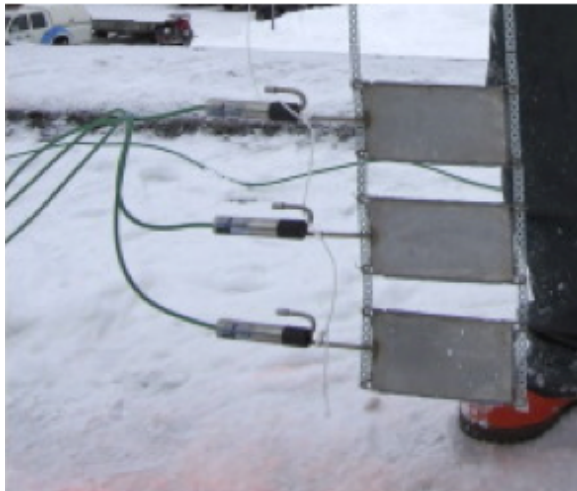
Måling av istrykk på en konstruksjon kan gjennomføres enten ved å instrumentere konstruksjonen og måle istrykket eller ved å måle trykket i isen foran konstruksjonen. På dam Taraldsvikfossen er trykksensorene plassert på damkonstruksjonen.

Hovedsakelig er det to typer sensorer som kan brukes til å måle istrykk (Cox og Johnson, 1983): Sylindriske sensorer og tynne og vide kvadratiske sensorer (flat-jacks). Sylindriske sensorer har en effektiv modulus som er mye større enn isens, og kvadratiske sensorer har en effektiv modulus nære isens. Begge sensorene har nytt god suksess i tidligere forsøk, og i en nylig serie av feltmålinger ble det konkludert at de var godt tilpasset til målingene (Morse m. fl., 2011, Taras m. fl., 2011, Petrich m. fl., 2015).

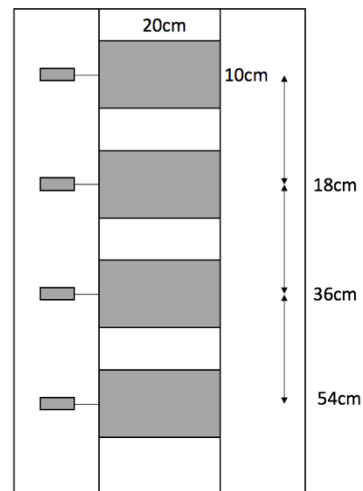


Figur 7.1 Oversiktsbilde over installert trykcelle, A, temperaturmåler og ventilhus (NVE Atlas).

I dette måleprogrammet ble det installert fire oljefylte GeoKon 4850 trykkceller midt på dammen (figur 7.1). Cellene bestod av to rektangulære stålplater (10*20cm) som var sveiset sammen med luftfriolje mellom platene. Et lite rør koblet cellen til en vibrerende trådtryktransduser som også måler temperatur med en temperaturavhengig motstand.



(a) Installerte trykkceller



(b) Størrelse og plassering av trykkcellene

Figur 7.2 Utforming av den installerte trykkcellen A.

Trykkcellene ble kalibrert med en nøyaktighet på < 0.5 kPa. Cellene ble så montert på en stålramme, med vertikal avstand senteravstand 18cm (figur 7.2b). I oppgaven vil fellesbetegnelsen for trykkcellene være trykkcelle A, hver enkelt trykkcelle blir navngitt som A1, A2, A3 og A4, der A1 er den øverste cellen. Vannivået lå mellom trykkcelle A1 og A2. Trykkcelle A1 ble plassert slik for å ta høyde for at isen også vokste over vannivå.

Trykkcelle A kunne måle istrykk, is- og vanntemperatur og vannstandsvariasjon. Ved at trykkcellene var på forskjellige vertikale nivåer gjorde det også mulig å se på utviklingen av istrykket i tverrsnittet av isdekket. Det ble også installert en temperatursensor, to meter fra dammen, som målte lufttemperatur.

Trykkcellen og temperaturmåleren ble utplassert 28.oktober 2016. Isdekket var 130 mm tykt ved dammen under installasjon, og isdekket var krystallklart med ingen tørre eller våte sprekker. Ved instrumenteringen ble det sagt et spor i isen hvoretter trykkcellen ble plassert i isen, vann etterfylt og trykkcellen frosset inn i isen. Trykkcellen måler trykk i en retning parallelt med isdekket.

7.3.2 Loggføring

Når trykksensorene ble plassert i isen, ble de også koblet til registreringsutstyr og en lagringsenhet som var lokalisert i ventilhuset på dammen (figur 7.1). All data ble sendt ut fra dammen via et telefonmodem som var plassert på dammen. Dette gjorde det mulig å følge med på målingene i nåtid, selv uten å være på dammen. Ventilhuset hadde tilgang til strøm som også gjorde det mulig å få ut måledata direkte på dammen, dette hadde stor nytteverdi under selve reguleringen av magasinet.

Alle instrumentene var koblet til en CR1000 datalogger, og istrykket ble registrert med et tidsintervall på 5 minutter hele måleperioden. Registreringen fungerte hele måleperioden. Snødybde, fribord og istykkelse ble målt manuelt og loggført før og under hver test.

7.3.3 Regulering av magasin

Da et slikt måleprogram aldri har blitt gjennomført tidligere ble det knyttet stor usikkerhet til hvordan isdekket ville oppføre seg under den kontrollerte reguleringen. I følge tidligere måleprogrammer av islast (Comfort m. fl., 2003, Taras m. fl., 2011, Stander, 2006) har det blitt observert at verdien til islasten ble størst ved variasjoner lik $0.5h < a < h$. Der h symboliserer istykkelsen og a variasjonen i vannivå. Da den gjennomsnittlige istykkelsen ble målt til 600 mm var det forventet at islasten ville være størst ved $300\text{mm} < a < 600\text{mm}$.

Tabell 7.1 Oversikt over vannstandsvariasjonen og varigheten til feltforsøkene

Forsøksnummer	Vannstandsvariasjon	Varighet
1	0.06 m	11 t
2	0.22 m	11 t
3	0.35 m	24 t

Det var viktig å velge en måleperiode som hadde stabilt kalde temperaturer med liten temperaturvariasjon, da et slikt fenomen kunne ha en påvirkning på den opptredende islasten. Det ble konkludert med at uke 10 hadde de beste forutsetningene for måleperioden. Basisen for konklusjonen var stabile klimatiske forhold i uke 8 og 9 for målområde, samt fordelaktige værmeldinger for perioden.

Vannstandsvariasjonen og varigheten til forsøkene er presentert i tabell 7.1.

Vannstandsvariasjonen er målt fra vannivå før reguleringsstart til vannivå ved slutten av nedtappingen. Varigheten er målt fra starten av reguleringen til tidspunktet vannivået var tilbake til normalt nivå.

Det ble gjennomført tre ulike forsøk. Forsøk 1 ble utsatt for en meget lav vannstandsvariasjon da motivasjonen for dette forsøket var å observere oppførselen til tappemekanismene, tilsiget og isdekket. Da gjennomføring av forsøket ble vurdert til å ha god kvalitet ble det valgt å inkludere forsøket i måleprogrammet.

Forsøk 2 ble utsatt for en større vannstandsvariasjon, men med lik varighet som forsøk 1. Etter rundt 100 mm vannstandsvariasjon ble det observert sprekkdannelse i isdekket. Det ble konkludert med å stoppe variasjonen på 220 mm da det var en fare for at sprekkmønsteret kunne ha en påvirkning på forsøk 3.

For å observere et lengre lastforløp ble forsøk 3 gjennomført med mye større varighet enn de andre forsøkene. Ved en vannstandsvariasjon på 300 mm ble det vurdert at sprekke nær dammen og ved omliggende terreng var av så stor størrelse at det var fare for at isdekke skulle brytes opp fra innspenningen. Da en slik oppbrytning kunne redusere islasten betraktelig ble det konkludert med å stoppe nedtappingen ved 350 mm, slik at isdekke var intakt under hele feltforsøket.

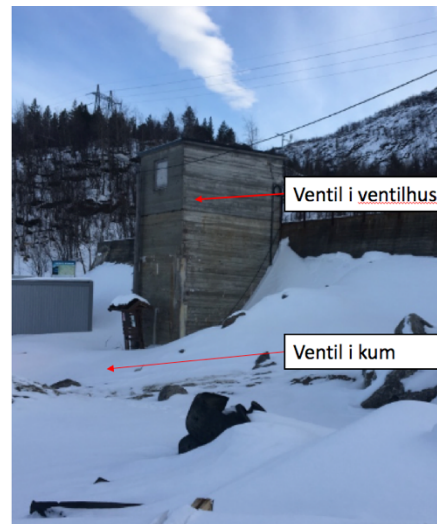
Ved videre kommentering og diskusjoner av forsøkene vil det bli referert til tabell 7.1 og forsøksnummereringen.

7.3.4 Gjennomføring

Dam Taraldsvikfossen hadde to stengeventiler, én lokalisert i ventilhuset og én lokalisert nede i en kum (figur 7.3b). Begge ventilene var stengeventiler på samme tapperør. Det var svært viktig å kunne kontrollere reguleringen nøyaktig. Det ble derfor valgt full lysåpning på ventilen i kummen, slik at reguleringen kunne kontrolleres med åpningsmekanismen i ventilhuset.



(a) Åpningsmekanismen til stengeventilen ved ventilhuset



(b) Plassering av stengeventilene

Figur 7.3 Oversiktsbilde over åpningsmekanismen og plassering av stengeventilene

Det var knyttet stor usikkerhet til størrelsen på tilsiget til magasinet, og det var ingen målinger på hvor mye tilsig magasinet hadde til hver tid. Måledata fra NVE viste at tilsiget fra elva ble kraftig redusert under vinterperioden.² Det ble derfor nødvendig å kalibrere lysåpningen til stengeventilen med måledataen i nåtid fra ventilhuset. Dette ble gjennomført hvert 15 minutt under reguleringen.

Vannstandsvariasjonen ble registrert via trykkcellene, og ble regulert på millimeternivå fra ventilhuset. Det ble i tillegg utført manuelle målinger med en tømmerstokk inne i ventilhuset for kontroll.

² Det ble i ettertid registrert at tilsiget hadde mye høyere verdi enn det NVE hadde oppgitt. Dette førte til at vannet gikk opp til normalt nivå raskere enn først antatt. Det hadde ingen påvirkning på nedtappingen.

7.4 Tidsperiode

For å øke forståelsen for islast, og skape et godt sammenlikningsgrunnlag, ble det valgt å se på hele lastsituasjonen vinteren 2016/2017. Det ble utført målinger av statisk istrykk grunnet termisk lastbidrag hele vinteren 2016/2017 av Norut Narvik. Observasjoner av isforhold og lastforløp startet i november 2016, og ble avsluttet i mars 2017. Målinger av istrykk, luft-, is og vanntemperatur og vannstandsvariasjon startet i januar og ble avsluttet mars 2017. Det var automatisk innsamling av måleparametere hvert 5 minutt, og målingene pågikk kontinuerlig i perioden.

Selve vannstandsreguleringen ble gjennomført i uke 10. Dette tidsrommet ble valgt fordi det var gode isforhold, stabilt lave temperaturer og stabile værforhold i perioden før og under reguleringen.

7.5 Isforhold

I Nord-Norge var vinteren 2016/17 meget nedbørsrik. I følge data fra det meteorologiske institutt (eklima.no, 2017) var vinteren 2016/2017 nesten dobbelt så nedbørsrik som normalen (180% av normalen). Det har kommet av at mange lavtrykk har kommet inn fra vest. Dette førte også til unormalt høye lufttemperaturer denne vinteren.

Under installasjonen av instrumentene var det gode isforhold, og på dette tidspunktet var isdekket dominert av stålis. Siste halvdel av februar og første halvdel av mars, da forsøkene ble gjennomført, var det normal verdi på lufttemperaturen og nedbørsmengden i forhold til normalen. Den nedbørsrike og milde vinteren hadde derfor ingen stor betydning for måleresultatene.

Før forsøkene ble det gjennomført målinger av isforholdene. Første målepunkt var nært ventilhuset og de resterende målepunktene ble tatt normalt på dammen (tabell 7.2). Isdekkets tykkelse varierte fra 500 mm, nær dammen, og 700 mm, ved senter av isdekket. De samme målingene ble også utført under forsøk 3 for å se på isdekkets oppførsel under vannstandsvariasjon.

I uke 9, uken før gjennomføringen av forsøkene, kom det rundt 200 mm snø som ble liggende på isdekket under hele forsøksperioden. To uker før gjennomføringen var det stabilt kalde temperaturer uten store raske variasjoner, med -2°C som høyeste lufttemperatur, -14°C som laveste lufttemperatur og en gjennomsnittstemperatur -8°C for hele perioden. Dette var den mest stabile perioden for lufttemperatur vinteren 16/17. Det var tilnærmet optimale forhold for måling av istrykk med lastbidrag fra en vannstandsvariasjon i uke 10 2017.

Tabell 7.2 Målinger av istrykkelse, snødybde og fribord før vannstandsvariasjon

Måling	Avstand fra dam	Istrykkelse	Snødybde	Fribord
M1	0.1 m	52 cm	20 cm	4 cm
M2	0.5 m	49 cm	15 cm	3 cm
M3	1 m	48 cm	12 cm	1 cm
M4	2 m	51 cm	30 cm	2 cm
M5	5 m	56 cm	17 cm	3 cm
M6	10 m	66 cm	6 cm	4 cm
M7	15 m	70 cm	6 cm	5 cm
M8	20 m	72 cm	8 cm	6 cm
M9	25 m	72 cm	12 cm	3 cm

Da isdekket ble målt til en tykkelse på 500 mm ved dammen, ble det konkludert med at alle de tre nederste trykkcellene (A2, A3 og A4) var dekket av is under forsøkene. Det ble også underbygget ved at alle sensorene målte en temperatur $< 0^{\circ}\text{C}$. Trykkcelle A1 var ikke dekket med is, så resultatene fra denne cellen ble neglisjert.

8 RESULTAT

8.1 Temperatur

Utviklingen av luft – og istemperaturer i måleperioden er illustrert i vedlegg 1, og maksimal og minimumsverdier er presentert i tabell 8.1. Lufttemperaturplottet er basert på målinger fra værstasjonen innsatt på ventilhuset . Plottet for Istemperatur er basert på målinger fra senter av de tre laveste trykkcellene (A2, A3 og A4).

Tabell 8.1 Luft - og istemperaturer under reguleringen av magasinet

Forsøk	Lufttemperatur		Istemperatur					
	Min	Maks	A2		A3		A4	
1	-8°C	-5°C	-6°C	-5°C	-3°C	-2°C	-1°C	-1°C
2	-9°C	-1°C	-6°C	-4°C	-3°C	-2°C	-1°C	-1°C
3	-10°C	+2°C	-4°C	-1°C	-2°C	-1°C	-1°C	-0.5°C

Ved forsøk 1 var det stabilt lave temperaturer under reguleringen, med liten variasjon. Det var derfor ingen markant temperaturstigning som forårsaket oppbygging av et termisk istrykk. Lufttemperaturen varierte fra -8°C til -5°C. Istemperaturen hadde en lav varians og sank med -1°C ved alle trykkcellene. Det tydet derfor på at isen ikke ble påvirket av temperaturfallet på 3°C.

Ved forsøk 2 var det større variasjoner i lufttemperaturen, og endringen hadde så store forskjeller på ytterpunktene at den blir definert som et termisk lasttilfelle (Petrich m. fl., 2015). Lufttemperaturen var -9°C før reguleringen, -1°C ved laveste punkt i vannstandsvariasjonen og -5°C når vannivået var tilbake på normalt nivå igjen. Istemperaturen i isdekket ble påvirket i større grad enn ved forsøk 1. I forsøk 1 sank istemperaturen i isdekket, mens i forsøk 2 økte istemperaturen på det meste med 2°C i trykkcelle A2. Dette tydet på at økningen i lufttemperatur hadde en påvirkning på isen. Da varigheten til lufttemperaturendringen kun varte i 5 timer, samt falt ned igjen til -5°C etter nye 5 timer, så ble det forventet at endringen ikke vil ha stort utslag på det totale istrykket.

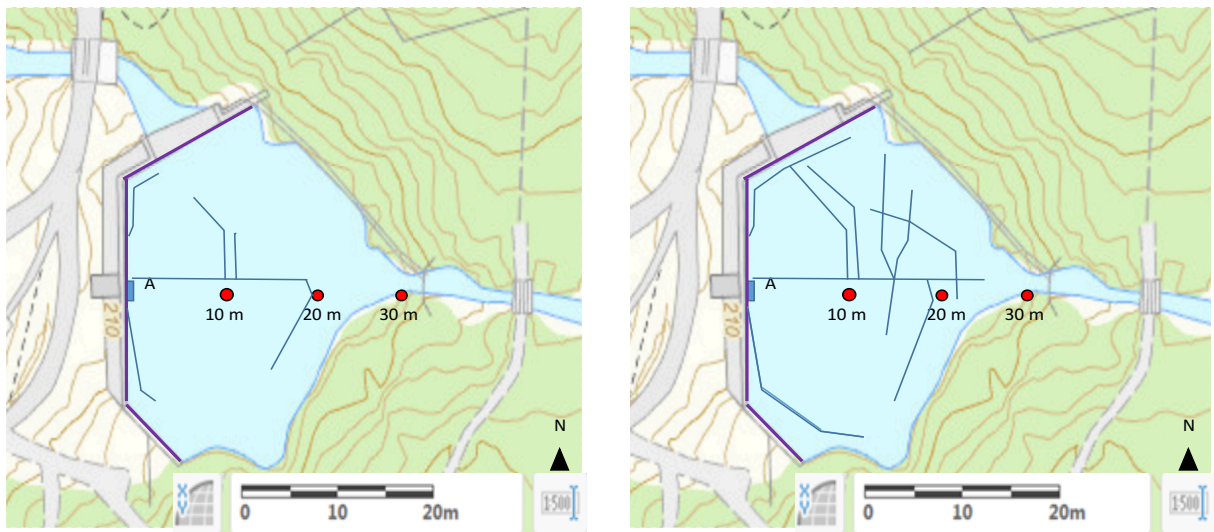
Under forsøk 3 var det store temperaturvariasjoner, og som forsøk 2 blir endringen definert som et lasttilfelle (Petrich m. fl., 2015). Lufttemperaturen varierte fra -10°C til 2°C under reguleringen. Temperaturøkningen varte i 40 timer før temperaturen falt ned igjen til -3°C da vannivået kom opp til normalt nivå. Istemperaturen var allerede 2°C varmere ved reguleringsstart enn de andre forsøkene, og hadde en mye større variasjon. Det mest merkbare tilfelle var at istemperaturen i trykkcelle A2 varierte fra -4°C til -1°C . Da vannstandsvariasjonen var størst ved dette forsøket, steg det noen steder vann på overflaten av isen. Dette kan ha bidratt med å øke temperaturen i isen.

Isens temperatur kan skille seg markant fra lufttemperaturen (grunnet isolerende virkning av snø og varmemotstand i is) og den er ofte 5 grader varmere i kuldeperioder. Ved værromslag fra kaldt til varmt kan isens temperatur også under ikke stasjonære forhold relativt enkelt beregnes time for time ved hjelp av varmeledningsformelen. Dette stemmer godt overens med målte temperaturer da varmeledningen bare skjer vertikalt.

Det ble oppdaget en mulig usikkerhet rundt verdien til lufttemperaturen. Det ble observert en tydelig sammenheng mellom økningen i lufttemperatur og vannstandsvariasjonen. Lufttemperaturen økte på tilnærmet nøyaktig samme tidspunkt som når vannstandsvariasjonen sank, og motsatt når vannstanden økte igjen sank temperaturen. Disse to parameterne er ikke avhengig av hverandre når det gjennomføres en regulert nedtapping, og trykkcellen, som måler vannstandsvariasjon, er helt uavhengig fra værstasjonen, som måler lufttemperatur. Testene ble også gjennomført på forskjellige tidspunkt på døgnet. Etter en sammenlikning med historisk klimadata (eklima.no) for to ulike værstasjoner i Narvik for måleperioden ble det konkludert med at parameterne ikke påvirket hverandre, og at sammenhengen var tilfeldig. Lufttemperaturen ble derfor vurdert til å gi korrekt verdi.

8.2 Sprekkemønster

Som nevnt i kapittel 5 vil sprekker ha en direkte påvirkning på den opptredende islasten, ved at sprekker som dannes under en vannstandsvariasjon vil fryse igjen. Sprekker, både åpne og gjenfryste, er et fenomen som alltid vil forekomme i is, og vil alltid ha en påvirkning på oppførselen og oppbrytningsprosessen til isen. Under alle forsøkene var det en visuelt tydelig sprekkdannelse, og sprekken økte i både dybde, tykkelse og lengde ved økt vannstandsvariasjon.



(a) Sprekkemønster under forsøk 2

(b) Sprekkemønster under forsøk 3

Figur 8.1 Utviklingen av sprekkemønsteret etter en vannstandsvariasjon. Utformingen til sprekken er representert med en blå linje. Plasseringen av trykkcelle A er representert med symbolet A.

Figur 8.1

viser sprekkemønsteret til isdekket, etter reguleringen av magasinet, for forsøk 2 og 3. Figuren illustrerer tydelige sprekker som var åpne helt opp til overflaten. Både før og etter forsøk 1 var det ingen synlige sprekker som ble observert.

Under forsøk 2 ble det raskt dannet en stor sprekke, med 20 mm tykkelse, normalt på dammen. De resterende sprekken ble dannet mot slutten av nedtappingen, og hadde en tykkelse på 10 mm. Alle sprekken var tørre. Det ble observert at isen var fast innspent i både dam og i omliggende terreng på magasinet under hele vannstandsvariasjonen.

12 timer etter at vannstanden hadde gått tilbake til normalt nivå hadde sprekken blitt markant smalere og kortere. Tykkelsen til sprekken normalt på dammen hadde blitt redusert med 10 mm, og sprekk lengden ble redusert med 2 meter. Tykkelsen til de resterende sprekken ble redusert med 5 mm, og sprekk lengdene ble redusert med 1-2 meter.

Forsøk 3 var det eneste forsøket der det ble observert sprekker før reguleringsstart. Sprekkmønsteret ble kort tid etter reguleringsstart tilnærmet likt som ved forsøk 2 (figur 8.1b). Nye tørre sprekker ble utviklet etter 150 mm nedtapping (figur 8.1ab). Det ble ikke utviklet ytterligere sprekker etter dette punktet, men sprekken økte i tykkelse og lengde ved økt nedtapping. Ved 350 mm nedtapping hadde sprekken normalt på dammen 30 mm tykkelse, mens sprekken parallelt med dammen hadde 50 mm tykkelse. Det ble observert at isdekket var fast innspent i både dam og terreng under hele vannstandsvariasjonen.



(a) Vannfylt sprekk nær søndre side av magasinet



(b) Tørre sprekker målt 10 m fra dammen

Figur 8.2 Eksempler på sprekker dannet under forsøk 3.

Etter at vannstanden hadde blitt tappet ned 250 mm ble det observert vannfylte sprekker for første gang (figur 8.2a). Disse sprekken ble observert ved søndre og nordøstlige side av

magasinet. Etter 300 mm nedtapping ble det også observert vannfylte sprekker 20 meter fra dammen.

I motsetning til forsøk 2 ble ikke sprekke i forsøk 3 fryst igjen i like stor grad. 12 timer etter vannstandsvariasjonen hadde isdekket fortsatt det opprinnelige sprekkmønsteret (figur 8.8b) uten noen betydelig reduksjon i tykkelse eller lengde.

8.3 Vertikal posisjonsendring av isdekket

I tillegg til å observere sprekkmønsteret, ble det også gjennomført målinger av isforholdene vinkelrett på dammen under forsøk 3. Disse målingene er presentert i figur 8.3, og viser hvordan isdekket endrer vertikal posisjon under en vannstandsvariasjon. Målepunktene ble valgt ved å se på sprekkmønsteret fra forsøk 2. Sprekker i et isdekke oppstår ved at dekket ikke klarer å oppta den opptredende påkjenningen og det vil dannes isblokker som roterer om sprekke. Det ble derfor forventet størst posisjonsendringen nær sprekke.

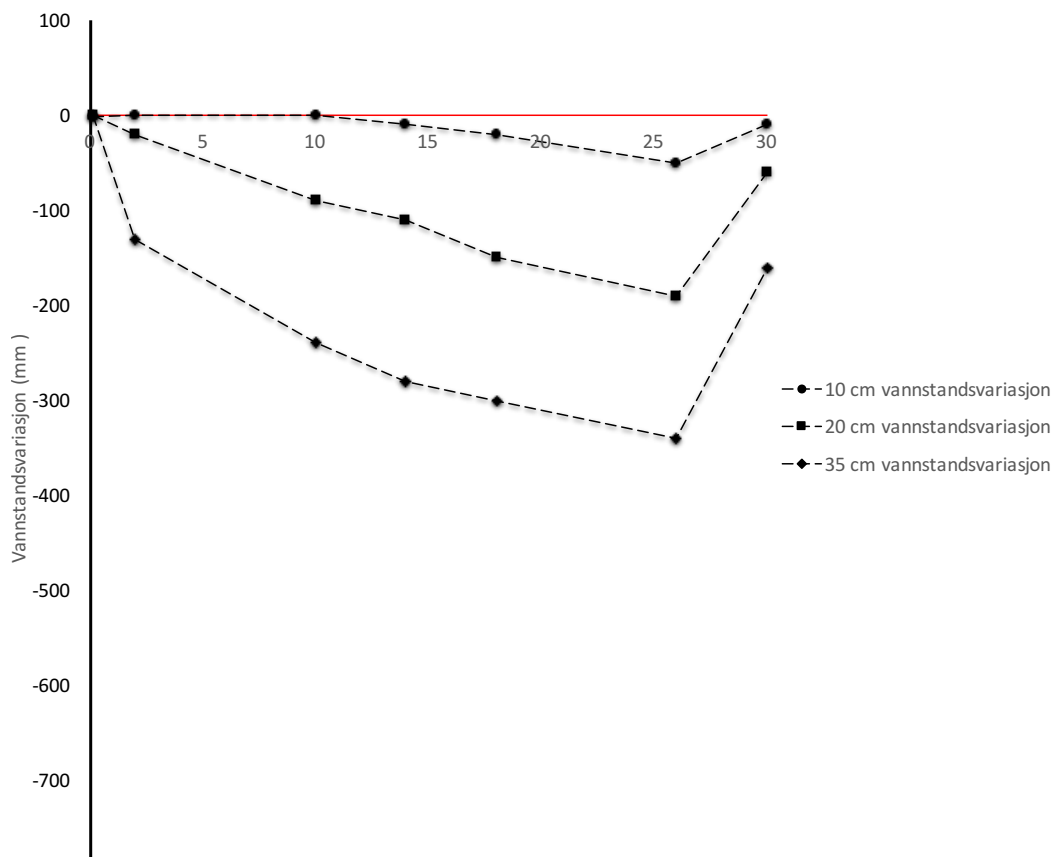
Forsøk 3 hadde en vannstandsvariasjonen på 0.35 m og en varighet på 24 timer. Verdien på vannstandsvariasjonen er innenfor isens tykkelse, og vil derfor kunne generere en høy lastkomponent (Comfort m. fl., 2003). Den største vertikale forskyvningen (340 mm) ble målt 26 meter fra dammens framside. Den vertikale forskyvning avtok nærme rendene til isdekket, og dekket hadde ingen forskyvning ved dammens framside. Det tilsier at isdekket var innspent i dammen, og tilnærmet innspent ved omliggende terreng.

Et resultat fra posisjonsendringen kan føre til en kileeffekt som blir karakterisert ved sprekkmønsteret til isen (Comfort m. fl., 2003). Det ble observert sprekker parallelt med dammens framside ved $L = 0.5$ m, 13 m, 18 m og 24 m (figur 9.1b). De målte sprekke samsvarer godt med posisjoneringen til isdekket. At en slik kileeffekt oppstår blir underbygget ved at gradienten til grafene endres i samsvar med sprekkenes posisjon.

En kileeffekt vil kunne genere et stort lastbidrag mot damkonstruksjonen. Som et resultat av den vertikale posisjonsendringen kan det oppstå en rotasjon av det innsente isdekket mot dammens framside. Sprekkdannelse førte til at isdekket ble brutt opp i mindre isblokker. Isblokken som var festet til dammens framside blir derfor dratt ut i toppen ved nedtapping og presset mot dammen når vannivået går opp til normalt nivå (figur 4.4).

Da isdekket var festet til både dam og omliggende terreng, samt at hele dekket var intakt under hele vannstandsvariasjonen, forventes det at resultatene fra forsøket vil gi en stor lastkomponent. En slik effekt vil ha størst påvirkning kombinert med en termisk utvidelse av isen og ved en ”skarp” sprekkprofil.

Et lastbidrag kan oppstå når vannivået siger tilbake til normalt nivå. Når vannivået stiger vil vann sige inn i sprekke i isdekket. Hvis sprekke blir utsatt for kalde temperaturer vil vannet fryse. Denne repeterende syklusen vil kunne genere vertikale lag av is inne i sprekke og isdekket vil utvides. Denne effekten vil inntreffe etter at vannivået er tilbake på normalt nivå. Da det ble observert vannfylte sprekker under forsøk 3 virker det sannsynlig at en slik effekt vil inntreffe.



Figur 8.3 Isdekkets posisjonsendring under forsøk 3. Dammens framside er ved L=0 m, og lengden øker vinkelrett på dammen, der L=30 m er ved enden av magasinet. Første målepunkt er rett ved trykkcelle A. De tre representere grafene viser hvordan isdekket

8.4 Måleresultat istrykk

8.4.1 Måleprogram

Målestedet ved dam Taraldsvikfossen var godt egnet for måleprogrammet. Meget god adkomst, lett å regulere vannstanden og gode isforhold både før og under hele måleperioden. I forhold til stabil loggføring og fleksibel informasjonstilgang var det også til stor fordel at ventilhuset hadde stabil strømforsyning.

I det respektive måleprogrammet var hovedmotivasjonen å vurdere islast grunnet vannstandsvairasjon, uten betydelig temperaturendring. Da vinteren 16/17 var både mildere og mer nedbørsrik enn normalt ble det ikke mulig å gjennomføre et større måleprogram. Andre aktuelle måleperioder ble vurdert til å ha ugunstige temperaturforhold og for mange ytre påkjenninger. Hvis de klimatiske forholdene ligger til rette for det er det anbefalt å utvide måleprogrammet for å få et større vurderingsgrunnlag.

Målingen av istrykk fungerte meget bra i hele perioden. Både styrings – og loggersystem fungerte godt og var stabil hele måleperioden. Data ble konvertert til både Excel-regneark og analyseprogrammet Matlab. For datasamling på dammen ble det benyttet en bærbar PC som ble koblet direkte med loggesystemet. All datasamling fungerte utmerket.

8.4.2 Maksimalt istrykk

Trykket ble målt med tre Carter-trykkceller plassert på dammen, med 180 mm vertikal avstand fra senter til senter trykkcelle. Måleresultatene til forsøkene er gitt i tabell 8.2, og viser summen av istrykket og islasten målt av trykkcelle A2, A3 og A4.

Tabell 8.2 Måleresultat for istrykk og linjelast for forsøk 1, 2 og 3

Forsøk	Istrykk	Linjelast
1	78 kPa	15 kN/m
2	274 kPa	50 kN/m
3	470 kPa	85 kN/m

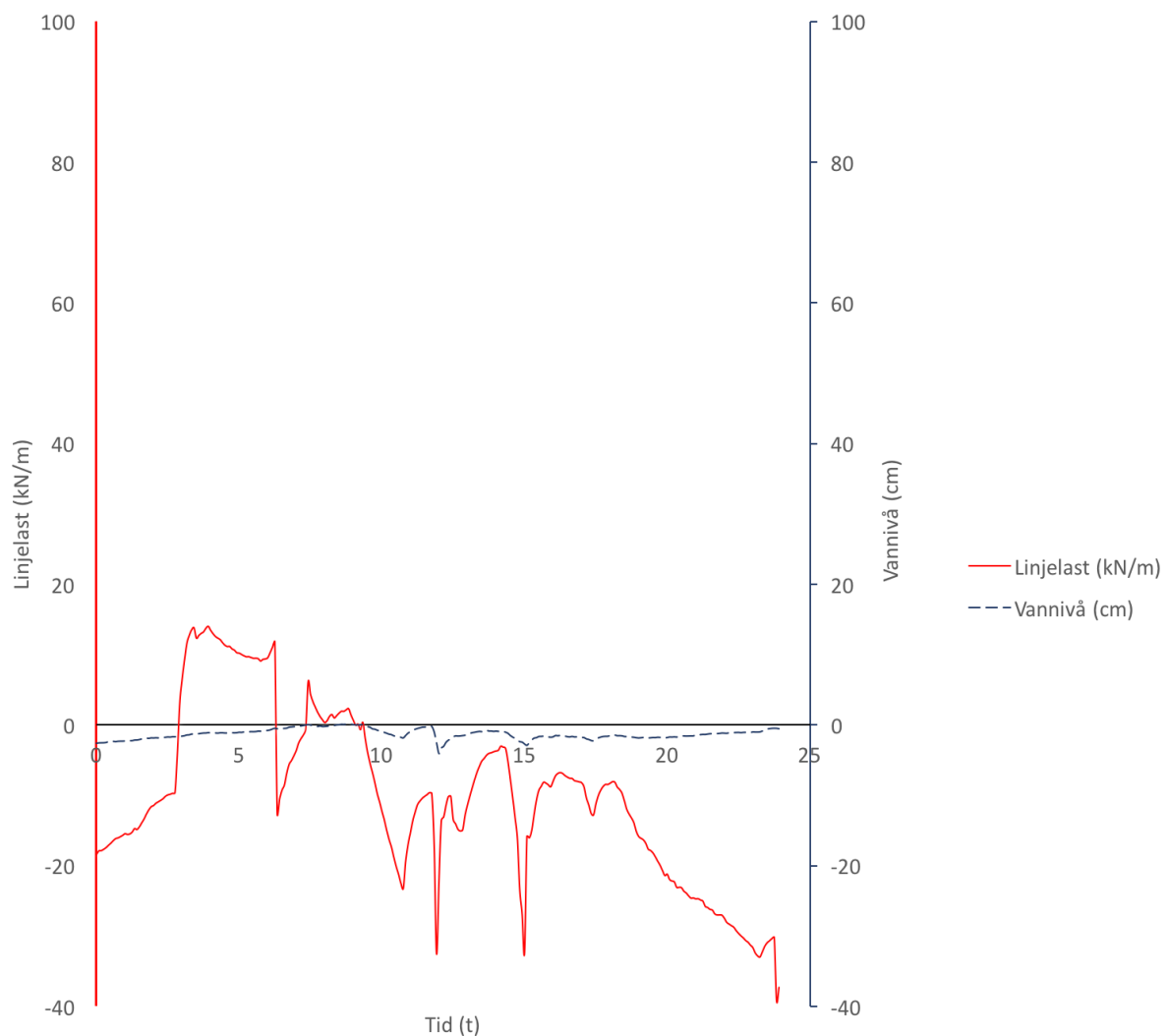
Trykkcellene målte kun istrykk, og det måtte omregnes til islast manuelt. Forholdet mellom istrykk og islast er beskrevet som $\sigma = P * A$. Der A er isens tverrsnittsareal mot dammens framside. Da trykkcellene ikke målte trykket i hele tverrsnittet av isen, ble det delt inn i lastsoner som skulle representere registreringsområde til hver enkelt trykkcelle. En slik omregningsmetode er utviklet av Carter m.fl.(1998), og har blitt vurdert til å fungere bra ved flere måleprogrammer (Stander, 2006, Petrich m. fl., 2015). Islasten ble så beregnet ut ved å summere islasten ved alle trykkcellene:

$$P = \sigma_{A2} A_{A2} + \sigma_{A3} A_{A3} + \sigma_{A4} A_{A4} \quad (8.1)$$

8.4.3 Lastforløp

Det målte istrykket på dammens framside varierte fra -100 kPa til 470 kPa. Egenskapene til trykkcellene førte til at de ikke kunne måle lavere verdi enn -100 kPa. Målinger med verdier under -100 kPa kunne føre til at oljen i trykkcellene ville begynne å koke, og en slik hendelse ville ført til at målingene ville bli svært usikre.

Istrykket vil variere ved forskjellige dybder i isdekkets tverrsnitt. I et typisk lastforløp for termisk islast vil trykket være størst i toppen, og avta med dybden til isdekke (Bergdahl, 1977). Ved et lastforløp for islast grunnet vannstandsvariasjon virker fordelingen å være annerledes. I alle forsøkene ble det observert samme spenningsfordeling; Ved nedtapping ble det målt høyere istrykk i trykkcelle A4 enn i A2. Da nedtappingen var ferdig, og vannet gikk opp til normalt nivå igjen, økte trykket i A2, mens istrykket i A4 ble redusert. Et slikt lastforløp kan være et resultat av at isdekket er fast innspent i dammen. Når deler av isdekket endrer vertikal posisjon vil den innsente delen av dekket bli dratt ut i toppen og samtidig presse mot dammens framside ved bunnen. Når vannet går tilbake til normalt nivå vil effekten reverseres. En slik lastfordelingen vil intensiveres ved større vannstandsvariasjon. De ulike trykkcellenes målinger av istrykk er representert i vedlegg E.



Figur 8.4 Lastforløpet til Forsøk 1. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannivå (cm) på y-aksene

Forsøk 1 blir presentert i figur 8.4. Før nedtappingen startet (10t) hadde isen et innebygd trykk som tilsvarte en linjelast på rundt 15 kN/m. Etter at regulering startet var det en tydelig reduksjon i istrykket, og denne reduksjonen ble holdt stabil helt til slutten av vannstandsvariasjonen

I følge Comfort m.fl. (2003) kan en vannstandsvariasjon både øke og redusere den totale islasten. En reduksjon kommer av at det dannes sprekker i isdekket, og at spenningene i isen blir ”frigjort” fra isen. Da det ikke ble observert sprekke dannelse under forsøket er det i kontrast til at et dette forekommer. Det kan dog ha blitt dannet sprekker på undersiden av dekket. Et slikt fenomen ville ikke være å observere fra oversiden, og vil ha samme reduksjonseffekt som sprekke dannelse på oversiden.

En annen grunn til en slik reduksjon kan være kontraksjoner i isdekket grunnet lave temperaturer før og under forsøket. Da det var moderat lave og stabile luft – og istemperaturer både før, under og rett etter forsøket, ble det vurdert at en reduksjon av en slik størrelsesorden virker usannsynlig å opptre kun ved termisk kontraksjon.

Ved å studere spenningsfordelingen ved de ulike trykkcellene ble det observert at trykket ble redusert raskt ved trykkcelle A2 ved starten av forsøket, mens trykkcelle A4 ikke hadde nevneverdige utslag. Det ble derfor vurdert at reduksjonen av islasten forekom sannsynligvis av at isdekke ble dratt ut i toppen, men at vannstadvariasjonen ikke var av stor nok amplitude for at dekket skulle presse på dammen ved bunnen. Forsøk 1 befester Comfort m.fl.(2003) sin påstand om at vannstandsvariasjon kan redusere den opptredende islasten.

Forsøk 2 blir presentert i figur 8.5. Før reguleringen startet hadde isdekket et innebygd istrykk som tilsvarte en linjelast lik -40 kN/m . Da isdekket ble utsatt for en kort kuldeperiode før forsøket samsvarer det godt med det innebygde trykket.

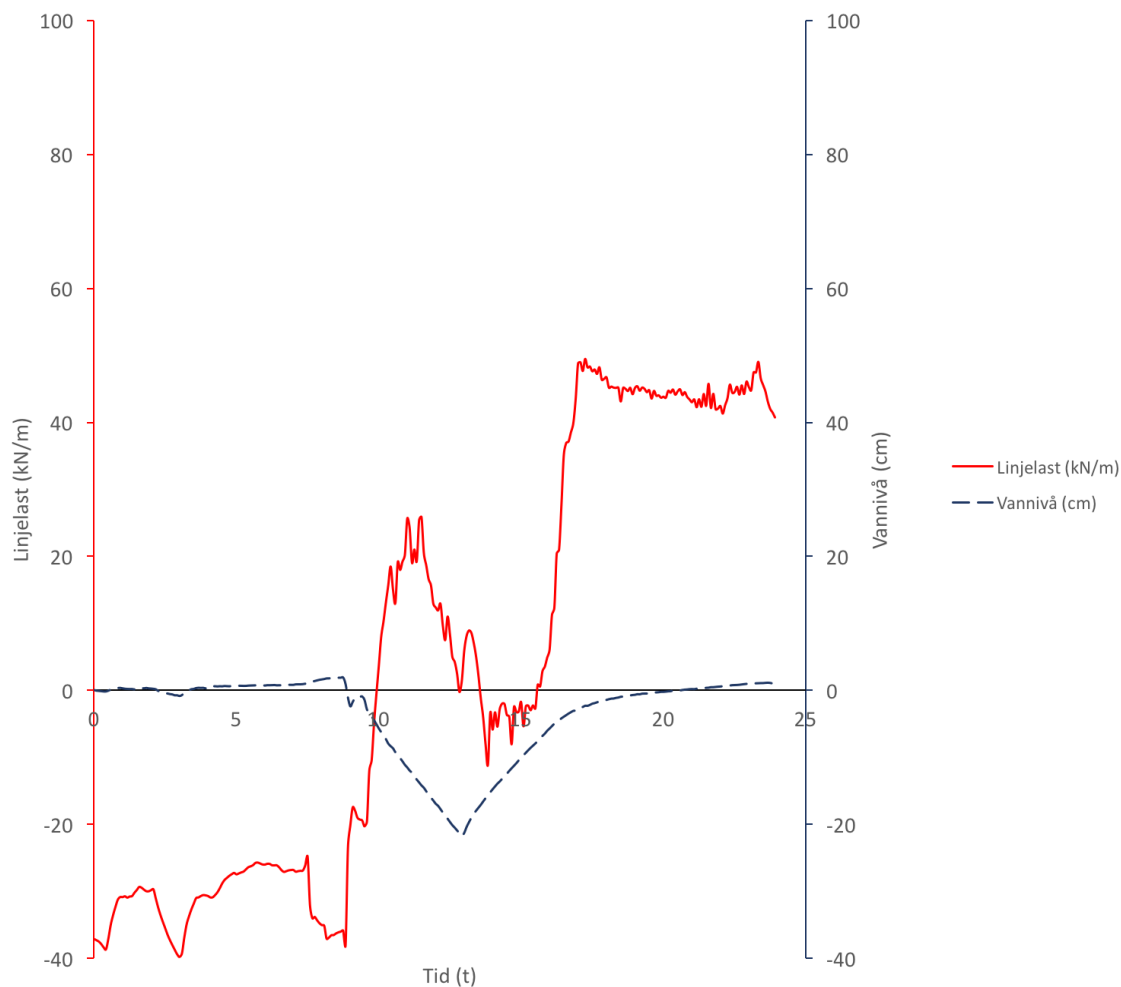
Islasten økte betraktelig med en gang nedtappingen startet (9t), og den totale lasten økte med 70 kN/m i løpet av 2 timer. Dersom det innebygde trykket ikke hadde forekommet virker det sannsynlig at islasten ville ha hatt en betraktelig høyere verdi på dette tidspunktet.

Da nedtappingen oppholdt, ble islasten redusert omgående. Et slikt fenomen tydet på at isdekket var fast innspent i dammen, og at det har oppstått en kileeffekt ved at dekket har rotert mot dammen under nedtappingen. En forekomst av en kileeffekt blir befestet ved at trykkcelle A4 registrerte en markant økning i istrykk under perioden.

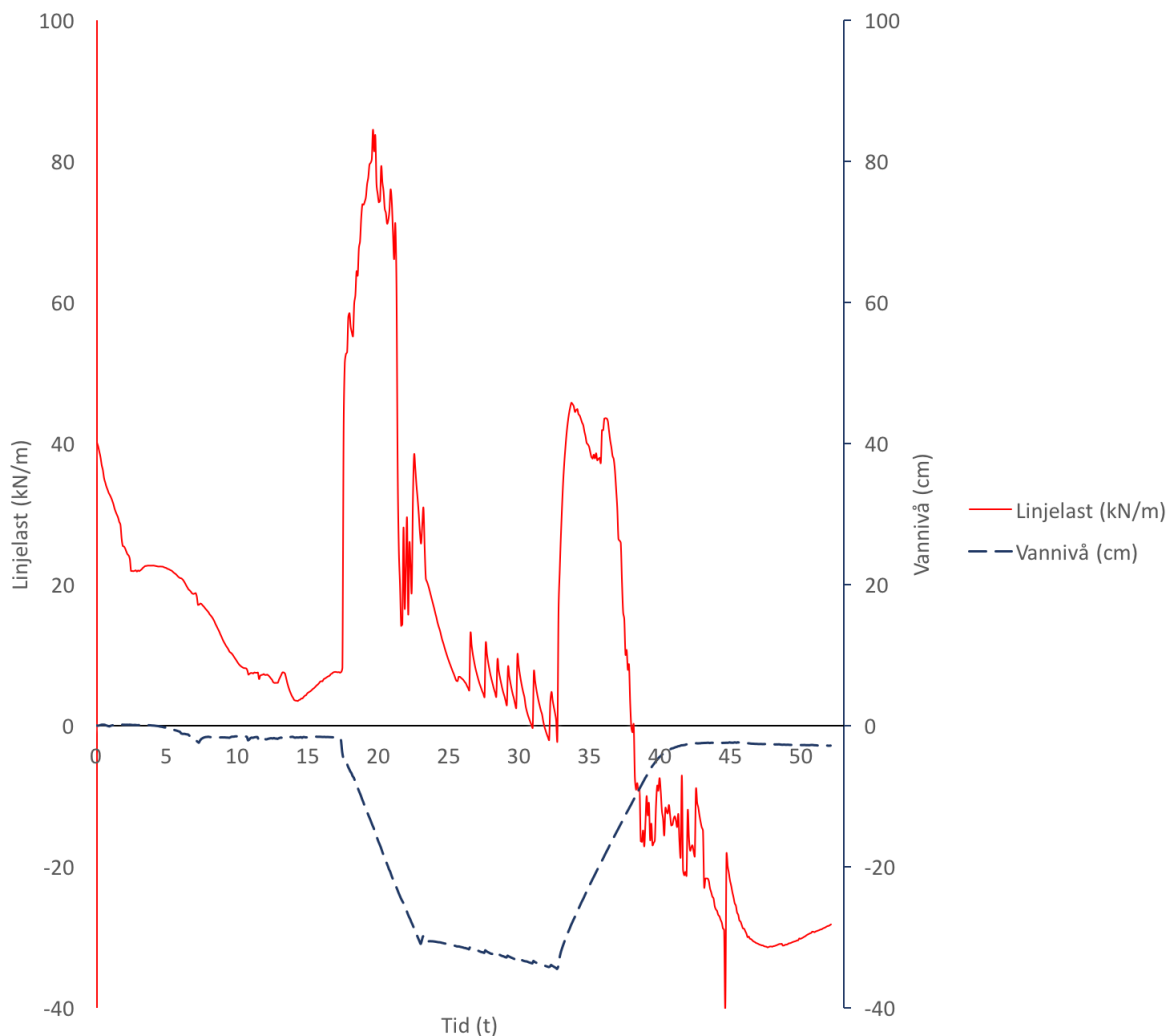
Da vannivået gikk opp til normalt nivå oppstod det et interessant tilfelle. Umiddelbart etter at vannivået var stabilisert økte islasten betraktelig. Et slikt fenomen kan være et resultat fra to ulike lasttilfeller; (1) Termisk ekspansjon vil oppstå i et isdekke der det skjer markante endringer i luft- og istemperaturen. Under forsøk 2 var det en markant endring i lufttemperaturen, og den økte med 8°C . (2) Frysing av sprekker som fører til en volumutvidelse. Et slikt fenomen oppstår ved at sprekker fryses ved at de blir vannfylte og blir utsatt for kalde temperaturer.

Det virker sannsynlig at isdekket ekspanderer på grunn av en temperaturendring. På en annen side endret ikke istemperaturen seg like markant som lufttemperaturen. Det tyder på at endringen i lufttemperatur ikke hadde stor nok påvirkning på isdekket for å produsere en last av en slik størrelsesorden. Det befester dermed at det oppstår et lastbidrag i tillegg til den termiske ekspansjonen.

Det ble observert dannelse av sprekker tilnærmet 2 mm under forsøk 2. Da lufttemperaturen sank betraktelig rett før vannet gikk opp til normalt nivå igjen virker det svært sannsynlig at store deler av sprekkenes ville fryse. Siden lufttemperaturen var stabil og lav ved slutten av forsøk 2 vil samsvarer det med at det største lastbidraget kommer av frysing av sprekkenes.



Figur 8.5 Lastforløpet til Forsøk 2. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannivå (cm) på y-aksene



Figur 8.6 Lastforløpet til Forsøk 3. Tid (t) på x-aksen og linjelast (kN/m) og vannivå (cm) på y-aksene

Forsøk 3 blir presentert i figur 8.6. Isdekket hadde tilnærmet null innebygd istrykk før reguleringen. Da lufttemperaturen før forsøket var meget stabil samsvarer det godt med den målte lasten.

Da nedtappingen (17t) startet økte islasten momentant. Islasten økte tilnærmet lineært med vannstandsvariasjon. Som i forsøk 2 virker det svært sannsynlig at en kileeffekt oppstår. Det målte trykket registrert av trykceller A4 økte markant under nedtappingen, og det målte trykket ved trykceller A2 ble kraftig redusert.

Etter 20 timer sank raten på nedtappingen, noe som førte til at islasten ble kraftig redusert. Vannivået ble holdt relativt stabilt for å se på effektene av et slikt fenomen. En interessant observasjon her er at det oppstår en ny lasttopp samtidig som da vannivået startet å gå tilbake til normalt nivå (33t). I samme periode var det en stor temperaturendring som antageligvis førte til en termisk ekspansjon. Da temperaturendringen foregikk over så kort tid, så virker det usannsynlig at en så stor islast kun blir produsert av en termisk ekspansjon. Da islasten avtar når vannet er tilbake på normalt nivå befester det antagelsen. Da det ble observert stor sprekkdannelse, samt vannfylte sprekker, er det sannsynlig at lasten oppstår på grunn av frysing av vannet sprekke.

I følge Comfort m. fl. (2003) er det forventet at det oppstår økt islast når vannstanden har gått tilbake til normalt nivå. Et lasttilfelle som beskrevet ovenfor bekrefter teorien, men den burde omformuleres noe. Det er sannsynlig at det oppstår islast når vannivået er *stabilisert* og ikke kun når vannet går tilbake til normalt nivå.

8.5 Sammenlikning av målt og beregnet islast

I følgende delkapittel vil det bli gjennomgått alle anbefalte verdier gitt fra presenterte beregningsmodeller, regelverk og tidligere måleprogrammer. I vedlegg A er alle beregningene presentert. Alle verdiene vil bli sammenliknet med det gjennomførte måleprogrammet, og vurdert deretter.

8.5.1 Sammenlikning med regelverk

I oppgaven er det presentert regelverk fra Norge, Sverige, USA, Canada og Østerrike. Det har blitt fokusert på kravet til maksimal islast ved stabilitetsberegninger av dammer. Basert på det nevnte grunnlaget, samt målte verdier, vil det bli gjort en vurdering av det norske regelverk for anbefalt verdi for islast.

Regelverket om damsikkerhet i Norge er lovfestet gjennom Damsikkerhetsforskriften (2009). Kravene som blir benyttet ved stabilitetsanalyse er dermed også lovfestet. Det samme gjelder for Sverige og Østerrike. I Canada er det lovfestet verdier for islast, men det er også godkjent å bruke krav fra retningslinjer. I USA er kravene kun gitt i retningslinjer.

Samtlige nasjoner beskriver islast som en termisk last, og de anbefalte verdiene er beregnet ut ifra målinger på termisk istrykk. Canada er i dag det fremste landet på forskning på islast ved vannstandsvariasjoner. De har laget retningslinjer for anbefalte verdier for islast ved vannstandsvariasjon.

Den anbefalte verdien for islast er relativt lik for alle landene. Sverige er det eneste landet som tar med geografisk plassering når anbefalt verdi for islast bestemmes. Ved beregning av islast benyttes det ulike beregningsmodeller for alle landene. Alle landene benytter modeller som er utviklet for det respektive landet. Det virker å være gjennomgående for alle landene at kravene ikke er over 220 kN/m.

Det norske regelverket er basert på en forskningsrapport (EBL Kompetanse AS, 2002) som inneholder et litteraturstudium, måleprogram og etterberegninger av flere dammer. Litteraturstudiet blir vurdert som meget omfattende og godt aktualisert. Det er dog noen faktuelle feil når det kommer til tolkningen av enkelte parametere og beregningsmodeller. Da litteraturstudiet hovedsakelig fokuserer på anbefalte maksimal verdier for islast har det lite betydning for sluttproduktet.

Måleprogrammet gjennomført i EBL Kompetanse (2002) er vurdert til å være lite omfattende sammenliknet med lignende måleprogrammer som andre land baserer sine regelverk på. Målingene presentert i EBL kompetanse (2002) er basert på ett måleprogram utført på én dam under én vinter uten å se på lastbidrag fra vannstandsvariasjon. Til sammenlikning har Canada flere måleprogram, der ett måleprogram er utført på opptil 8 dammer og med en varighet på opptil 10 år.

Måleprogrammet presentert i EBL Kompetanse (2002) måler istrykk med sirkulære trykkceller med en diameter på 0.3 meter. For omberegning fra istrykk til islast benyttes følgende formel: $P = \sigma * A$. Der σ representerer det målte istrykket og A representerer arealet trykket virker på. Måleprogrammet setter arealet lik istrykkelsen til isdekket. Det vil si at det antas at det målte trykket virker over hele istrykkelsen. Da trykkcellen kun måler trykk ved 0.3 m dybde virker det konservativt å anta at trykket representerer trykket i hele tverrsnittet. Islasten som blir presentert vil derfor realistisk ha lavere verdi.

Tabell 8.2 Sammenlikning mellom anbefalte (NVE) og målte verdier

NVE*	NVE**	Måleprogram
100 kN/m	131 kN/m	85 kN/m

* Minimumsverdi

** Verdi for situasjoner der vannstandsvariasjon oppstår

I tabell 8.3 blir de anbefalte verdiene til det norske regelverket sammenliknet med den målte maksimale is ved måleprogrammet i denne oppgaven. Da den målte verdien ikke overgår kravet, vurderes verdien til å være realistiske og gjeldende. Da måleprogrammet kun inneholder en måleperiode på en uke kan det ikke trekkes en konklusjon, men datagrunnlaget er ansett som godt nok for å gi innspill til det norske regelverket.

8.5.2 Sammenlikning med tidligere beregningsmetoder

For å danne et godt sammenlikningsgrunnlag er det valgt å kun se på maksimal islast for dam Taraldsvikfossen. Det vil si at alle beregningsmodellene har blitt brukt til å beregne den maksimale opptredende islasten som kan oppstå på dam Taraldsvikfossen. Alle beregningene er presentert i vedlegg A.

Alle beregnede og anbefalte verdier er presentert i tabell 8.4. Lastene er sammenliknet med regelverkets krav til islast med bidrag fra vannstandsvariasjon.

Tabell 8.3 Sammenlikning av beregnet og anbefalt verdier for islast

Metode	Islast	% av NVE
NVE	131 kN/m	100 %
Måleprogram	85 kN/m	65 %
Elastisk materiale	9296 kN/m	7096 %
Røyen	345* (598) kN/m	263 (456) %
Bergdahl	701 kN/m	535 %
Fransson	112 kN/m	85 %
Comfort	87 kN/m	66 %
Comfort**	551 kN/m	421 %
Stander**	145 kN/m	111 %
Taras**	160 kN/m	122 %

* Anbefalt verdi; beregnet verdi i parentes

** Verdier med lastbidrag fra vannstandsvariasjon

Et resultat som kommer tydelig fram er at modellen for elastisk materiale gir klart størst last. Da det er en meget konservativ modell er det et forventet resultat. Modellen tar ikke med spenningsfordeling, riss, kryp m.m.

Beregningsmodellen til Røyen (1922) gir en høyere last enn anbefalt islast fra regelverket og målt islast. Resultatet er også forventet da det er en veldig gammel og konservativ modell. Fysikken og mekanikken modellen er basert på gir urealistiske verdier.

Et uforventet resultat var at beregningsmodellen til Bergdahl (1978) ga så høy verdi. Modellen har nytt stor suksess ved tidligere beregninger av islast normalt på en dammens framside (Petrich m. fl., 2015). Den har dog blitt brukt som en semi-empirisk modell, og har blitt kalibrert opp mot målt data.

Beregningsmodellen til Comfort m.fl. (2003) er den eneste modellen som gir lavere verdi enn den anbefalte verdien til det norske regelverket. Modellen egner seg ikke for Norge, da den bruker parametere som er avhengig av klimadata som ikke er tilgjengelig i Norge.

Alle modellene og anbefalte verdene som inkluderer islast ved vannstandsvariasjon har høyere verdi enn den anbefalte verdien til det norske regelverket. Det må nevnes at verdiene gjelder for dammer i Canada, men et slikt resultat er bemerkelsesverdig. Det er tre måleprogrammer (Comfort m. fl., 2003), (Stander, 2006, Taras m. fl., 2011) som tidligere har sett på islast fra vannstandsvariasjon. Samtlige programmer har målt verdier som er høyere enn den anbefalt verdien for dam Taraldsvikfossen. Det kan dermed konkluderes med at regelverket må vurderes, og at et utvidet måleprogram må utføres i Norge.

Til slutt kan det konkluderes med at alle modellene gir høyere islast i forhold til målt islast. Den store variasjonen i beregnet verdi understreker at kunsten å forutse islast er en krevende prosess.

8.5.3 Sammenlikning med analytisk modell

Den foreslåtte beregningsmodellen for istrykk (formel 6.18) er en relativt enkel modell sammenliknet med andre foreslåtte analytiske modeller. Hovedmotivasjon bak modellen var ikke å lage en ferdig beregningsmodell for å forutse islast, men heller å skape et kompetansegrunnlag for hvilke parametere som påvirker lasten mest. Alle beregninger er presentert i vedlegg A.

Tabell 8.4 Oversikt over verdiene til de ulike lastbidragene

	Forsøk 1	Forsøk 2	Forsøk 3
Vannstandsvariasjon	269 kPa	975 kPa	1550 kPa
Temperaturendring	154 kPa	409 kPa	614 kPa
Frysing av sprekk	0 kPa	977 Pa	927 kPa
Totalt trykk	423 kPa	2361 kPa	3091 kPa

I tabell 8.5 er verdiene til de ulike lastbidragene til vært alle feltforsøk presentert. Da forsøk 1 ikke hadde observert sprekkdannelse ble lastbidraget for frysing av sprekk neglisjert. Som tabellen viser har lastbidragene fra vannstandsvariasjon og lengdeutvidelse grunnet frysing av sprekker mye høyere verdi enn lastbidraget fra termisk utvidelse. En sensitivitetsanalyse avdekket hvilke parametere som påvirket lasten mest:

- Bredder av sprekk
 - Bredden til sprekken gjorde et stort utslag på lengdeutvidelsen og deretter nedbøyningen til bjelken, og var en av parameteren som ga størst utslag på det totale trykket.
- % frysing av sprekk
 - Hvor mye av sprekken som faktisk fryser påvirket istrykket mye. Det hadde stor påvirkning på lengdeutvidelsen og deretter nedbøyningen til bjelken.
- Vannstandsvariasjon
 - Som forventet var vannstandsvariasjon en parameter som påvirket trykket mye. Trykket øker ved økt vannstandsvariasjon.
- Temperaturendring
 - Hadde ikke like stor påvirkning som de andre parameterne. Da lastbidraget fra termisk utvidelse ga generelt lavere verdi enn de andre lastbidragene.

Tabell 8.5 Sammenlikning mellom målt og beregnet istrykk ut fra beregningsmodell

Forsøk 1		Forsøk 2		Forsøk 3	
Målt	Beregnet	Målt	Beregnet	Målt	Beregnet
78 kPa	423 kPa	274 kPa	2361 kPa	470 kPa	3091 kPa

Tabell 8.6 sammenlikner det totale beregnede istrykket med målte verdier. Tabellen viser at modellen har stor feilmargin, og gir mye større verdi enn det målte istrykket.

Beregningsmodellen er ikke anbefalt å bruke for å forutse islast, men ved kalibrering og optimalisering kan det bli en nøyaktig modell.

9 KONKLUSJON

I denne oppgaven er det gjennomført et måleprogram på islast med vannstandsvariasjon. Måleprogrammet tok plass vinteren 2016/2017 på dam Taraldsvikfossen i Narvik. Programmet ble vurdert til å ha meget god kvalitet, men ville optimalt hatt flere forsøk. Da vinteren 2016/2017 var både mildere og er nedbørsrik enn normalt var det ikke mulig å gjennomføre flere forsøk.

Det ble foretatt tre ulike forsøk, på henholdsvis 0.06, 0.22 og 0.35 cm vannstandsvariasjon. Maksimalt islast ble målt til være 85 kN/m under forsøk 3. Målingene støtter opp under minimumsverdiene anbefalt i regelverket. Ved forsøk 1 ble det observert en reduksjon av islasten. Det var ingen klare observasjoner som forklarte reduksjonen, men målingen bekrefter

Lastforløpene til alle forsøkene befester hvilke lastbidrag som oppstår under en lastsituasjon med vannstandsvariasjon. Hovedsakelig er det tre store lastbidrag som påvirker isdekket: (1) Last direkte fra en vannstandsvariasjon ; (2) Last fra termisk ekspansjon ; (3) Last fra lengdeutvidelse av isdekket som resultat av frysning av sprekker. Observasjonene befester teorier fra tidligere litteratur.

Det ble foreslått en omformulering av anbefalt teori for lastbidrag (3). I følge Comfort m. fl. (2003) er det forventet at det oppstår økt islast når vannstanden har gått tilbake til normalt nivå. Et lasttilfelle som forsøk 3 bekrefter teorien, men den burde omformuleres noe. Det er sannsynlig at det oppstår islast når vannivået er *stabilisert* og ikke kun når vannet går tilbake til normalt nivå.

Det er blitt utført en vurdering av tidligere anbefalte beregningsmodeller. Modellene som ble vurdert var: utvidelse i et elastisk materiale, Røyen (1922), Bergdahl (1978), Fransson (1988) og Comfort (2003). Da modellene enten ga urealistisk verdi eller ikke var godt nok egnet, ble det konkludert med at ingen av de vurderte modellene kan bli anbefalt for stabilitetsberegninger.

I oppgaven ble det også foreslått en analytisk modell som skulle beskrive de mekaniske prosessene til et isdekke under påkjenning fra vannstandsvariasjon. Beregningsmodellen er ikke anbefalt å bruke for å forutse islast, men virker å forklare de ulike lastprosessen relativt godt.

Ved å sammenlikne resultatene fra litteraturstudie, måleprogram og analytisk modell blir det konkludert med at størrelsen på sprekker, antall sprekker og % frysing av sprekker i et isdekke hadde stor påvirkning på opptredende islast ved vannstandvariasjon. De nevnte parameterne hadde, sammen med vannstandsvariasjon, istykkelse og temperaturendring størst påvirkning på både lastens maksimal verdi og isdekkets oppførsel.

Det har også blitt foretatt en vurdering av dagens regelverk, og måten regelverket tolker og vurderer islast. Regelverket baserer seg på en rapport (EBL Kompetanse AS, 2002) som inneholder et litteraturstudie, måleprogram og etterberegninger. Både litteraturstudie og etterberegningene blir konkludert med å være godt utført. Måleprogrammet derimot blir konkludert med å ha noen uregelmessigheter. Programmet baserer seg kun på målinger på én dam under én vinter, og ser ikke på bidrag fra vannstandsvariasjoner. Sammenliknet med andre land er et slikt måleprogram lite omfattende. Det er også konkludert med at omberegningen fra istrykk til islast gir for høye verdier for islasten, og at det er brukt en konservativ beregningsmetode. Derfor er sluttende konklusjon for denne oppgaven at dagens regelverket er utdatert, og det er nødvendig å foreta et større måleprogram for å danne et tilfredsstillende sammenlikningsgrunnlag.

REFERANSER

- ASHTON, G. D. 1986. *River and lake ice engineering*, Water Resources Publication.
- BERGDAHL, L. 1977. Physics of ice and snow as affects thermal pressure.
- BERGDAHL, L. 1978. *Thermal ice pressure in lake ice covers*.
- BLAZEVIC, S. 2011. Islast mot lukedammer; forventet fordeling av last. *NTNU*.
- CANADIAN DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL 1971. Review of current ice technology and evolution of research priorities. *Inland Water Branch, Ottawa, Canada.*, Report series no. 17.
- CARTER, D., SODHI, D., STANDER, E., CARON, O. & QUACH, T. 1998. Ice thrust in reservoirs. *Journal of cold regions engineering*, 12, 169-183.
- COMFORT, G., GONG, Y. & SINGH, S. The factors controlling static ice loads on dams. Proceedings of the 15th International Symposium on Ice, Gdansk, Poland, 2000.
- COMFORT, G., GONG, Y., SINGH, S. & ABDELNOUR, R. 2003. Static ice loads on dams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 42-68.
- COMFORT, G., SINGH, S. & GONG, Y. 1998. Static ice loads on dams: Loads along a dam face, and on wooden and steel stoplogs. *Ice in Surface Waters, Vol 1*, 441-448.
- COX, G. F. & JOHNSON, J. B. 1983. Stress measurements in ice. DTIC Document.
- DANIELSEN, O. 1990. Numerisk simulering av islaster mot konstruksjoner.
- DICKINSON, H. C. & OSBORNE, N. S. 1915. The specific heat and heat of fusion of ice. *Journal of the Franklin Institute*, 179, 489-491.
- DROUIN, M. 1971. *Les poussées d'origine thermique exercées par les couverts de glace sur les structures hydrauliques*. Université Laval, Faculté des sciences.
- DROUIN, M. & MICHEL, B. 1974. Pressures of Thermal Origin Exerted by Ice Sheets upon Hydraulic Structures (Les Poussees d'Origine Thermique Exercees par les Couverts de Glace sur les Structures Hydrauliques). DTIC Document.
- EBL KOMPETANSE AS 2002. Islast mot dammer.
- EKSTRÖM, T. 2002. *Islaster mot hydrauliska konstruktioner: inriktning mot betongdammar*, Elforsk.
- ELFORSK 2013. Islast mot damkonstruksjoner. *Damsikkerhet*.
- ENERGI NORGE, A. 2016. Eksisterende betong- og murdammer. *Evaluering av sikkerhet*.
- ERANTI, E. M. & LEE, G. C. 1986. *Cold region structural engineering*, McGraw-Hill New York.

- FRANSSON, L. 1988. *Thermal ice pressure on structures in ice covers*. Luleå tekniska universitet.
- FRANSSON, L. & BERGDAHL, L. 2009. *Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads*, Elforsk.
- HETÉNYI, M. 1971. *Beams on elastic foundation: theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*, University of Michigan.
- JAKOB, M. & ERK, S. 1928. Thermal expansion of ice between 0 C and -235 C. *Z. Kalteind.*, 35, 125-30.
- KJELDGAARD, J. & CARSTENS, T. 1980. Thermal ice forces. *the Special State-of-the-Art Report*, 80-26.
- KOCAHAN AND RODIONOV 2003. The behaviour fusegates in ice affected environmental. *ASDSO-2003*.
- LÖFQUIST, B. 1987. Istryck mot bropelare. *Publikation*, 187, 43.
- MAXWELL, J. 1891. Medium in which small spheres are uniformly disseminated. A treatise on electricity and magnetism, 3d ed., part II, chapter IX, article 314. Clarendon press.
- METGE, M. 1976. *Thermal cracks in lake ice*, publisher not identified.
- MICHEL, B. 1978. Ice mechanics.
- MICHEL, B. & RAMSEIER, R. 1971. Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 36-45.
- MORSE, B. & RICHARD, M. 2009. A field study of suspended frazil ice particles. *Cold Regions Science and Technology*, 55, 86-102.
- MORSE, B., STANDER, E., CÔTÉ, A., RICHARD, M. & DESMET, V. Stress and Strain dynamics in a hydro-electric reservoir ice sheet. 16th CRIPE Workshop, 2011. 303-316.
- NVE 2003. Retningslinje for laster og dimensjonering til §§ 4-1 og 4-2 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg Norges vassdrags- og energidirektorat. Norges vassdragsog energidirektorat, Oslo.
- PETRICH, C., LANGHORNE, P. J. & HASKELL, T. G. 2007. Formation and structure of refrozen cracks in land-fast first-year sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112.
- PETRICH, C., SAETHER, I., FRANSSON, L., SAND, B. & ARNTSEN, B. 2015. Time-dependent spatial distribution of thermal stresses in the ice cover of a small reservoir. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 35-44.
- RIDAS 2008. Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhetsarbete. *Svensk Energi*.

- ROYEN, N. 1922. Istryck vid temperaturhöjningar. *Hyllningsskrift tillägnad FV Hansen, Stockholm.*
- SANDERSON, T. Thermal Ice Forces against Isolated Structures. Proceedings of the 7 th IAHR International Symposium on Ice, Hamburg, Germany, 1984.
- SANDERSON, T. J. 1988. Ice mechanics and risks to offshore structures.
- SCHWERDTFEGGER, P. 1963. Theoretical derivation of the thermal conductivity and diffusivity of snow. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ*, 61, 75-81.
- SINHA, N. K. 1989. Elasticity of natural types of polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 17, 127-135.
- STANDER, E. 2006. Ice stresses in reservoirs: effect of water level fluctuations. *Journal of Cold Regions Engineering*, 20, 52-67.
- STATENS VEGVESEN 2006. Vann - og frostsikring i tunneller *Håndbok 163.*
- STATIC ICE LOADS ON HYDRO-ELECTRIC STRUCTURES 2003. Summary Report, Ice Load Design Guide, and Ice Load. *Report T002700 0206*, Prediction Computer Program.
- TARAS, A., CÔTÉ, A., COMFORT, G., THÉRIAULT, L. & MORSE, B. Measurements of ice thrust at Arnprior and Barrett Chute dams. Proceedings of the 16th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Winnipeg, MB, Canada, 2011. 18-22.
- TSINKER, G. P. 1995. Marine structures engineering: specialized applications Springer. 548.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS 2002. Engineering and Design - Ice Engineering *EM 1110-2-1612.*
- USMANI, A., ROTTER, J., LAMONT, S., SANAD, A. & GILLIE, M. 2001. Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects. *Fire Safety Journal*, 36, 721-744.

VEDLEGG

Vedlegg A: Beregningsmodeller

Vedlegg A1: Elastisk materiale

$$\theta_{\min} = -34,0^{\circ}\text{C} \text{ (Meteorologiske institutt, 2017)}$$

$$\theta_{\text{mid}} = 3,5^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \text{ (Statens Vegvesen, 2006)}$$

$$\lambda_{\text{overgang}} = 0,608$$

Dimensjonerende temperaturendring for dam Taraldsvikfossen blir:

$$\Delta\theta = \frac{(-34-0)}{0,608} = -55,92^{\circ}\text{C}$$

der $\alpha = 5,5 * 10^{-5}\text{C}$

$$\Delta\theta = -55,92^{\circ}\text{C}$$

$$E_{\text{is}} = 9,3 \text{ MPa}$$

$$h = 0,65 \text{ m}$$

Termisk tøying:

$$\varepsilon = 5,5 * 10^{-5} * |-55,92| = 3.0756 * 10^{-3}$$

Istrykk:

$$\sigma = 9,3 * 10^6 * 3.0756 * 10^{-3} = 28603.08 \text{ kPa}$$

Islast:

$$P_{\text{is}} = \frac{28603.08 * 0,65 * 1,0}{2} = 9296 \text{ kN/m}$$

Vedlegg A2: Røyen

Tar utgangspunkt i forsøk 3:

$$\sigma_{\max} = 0.9772 * \frac{5,5 * 10^{-5}}{6 * 10^{-4}} * (12 + 1) * \sqrt[3]{2 * (12 + 1)^2} = 8.11 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_{\max} = 894 \text{ kPa}$$

der: $\alpha = 5,5 * 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c = 6 * 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{kph}^{1/3}$$

$$T_i = -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T \cdot = 2 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$$

$$P_{\max} = 0.9 * 0.65 * (12 + 1) * \sqrt[3]{2 * (12 + 1)^2} = 52.96 \text{ t/m}$$

$$P_{\max} = 598 \text{ kN/m}$$

der: $h = 0.65 \text{ m}$

Vedlegg A3: Bergdahl

For beregning av maksimal termisk islast viser Bergdahl (1978) til:

$$P_b = 2 \sqrt{\frac{9.81 \cdot 9.81 \cdot 9300 \cdot 0.65^3}{12(1-0)}} = 701 \text{ kN/m}$$

der $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$E = 9.3 \text{ MPa}$

$h = 0.65 \text{ m}$

$\nu = 0 \text{ MPa}$

Vedlegg A4: Fransson

$$\begin{aligned}\sigma_{0.5}^{\text{maks}} &= 2.24 * (55,92) * 2.08e^{(-2.49*0.65*(\frac{-2.08}{-55.92}))} && \text{for } 0.2 < d < 2 \text{ m} \\ \sigma_{0.5}^{\text{maks}} &= 245 \text{ kPa} \\ \text{der: } a_1 &= 0.224 (a/c) = 2.24 \\ a_2 &= 2.49 \\ T_0 &= -55,92 \text{ }^\circ\text{C} \\ d &= 0.65 \text{ m} \\ b &= 2.08 \text{ }^\circ\text{C/h}\end{aligned}$$

Islasten, P, kan så bestemmes:

$$\begin{aligned}P &= \beta\sigma_{0.5}^{\text{maks}}d \\ P &= 111.475 \text{ kN/m} \\ \text{der: } \beta &= 0.7\end{aligned}$$

Vedlegg A5: Comfort

Termisk bidrag

(1) Linjelast grunnet temperaturendring beregnes ved

$$\Delta A = 1345,08^\circ\text{Ccm (beregnet fra Blazevids (2011) temperaturprofil)}$$

$$h = 65 \text{ cm}$$

$$\text{Dur} = 5, \text{ valgt ut ifra definisjonen p\aa et lasttilfelle fra Petrich (2011)}$$

$$f(\Delta A) = \min\left(\log\frac{160}{1345,08}\right); 0 = -0.93$$

$$LL_{\text{thermal}} = 0.064 * 1345,08^{0.6} * 65^{0.88} * 5^{-0.93} = 42.54 \text{ kN/m}$$

(2) Islast grunnet det innebygde trykket i isdekke beregnes ved følgende formel:

$$A_i = -1972,21^\circ\text{Ccm (beregnet fra Blazevids (2011) temperaturprofil)}$$

$$LL_{\text{residual}} = -0.00528 * -1972,21 + 21.37 = 31.78 \text{ kN/m}$$

(3) For beregning av termisk islast foresl\aa Comfort m.fl. (2003) følgende formel:

$$LL_{\text{total}} = 42.54 + 31.78 + 13 = 87.3 \text{ kN/m}$$

der: $\Delta LL_{\text{thermal}} = 42.54 \text{ kN/m}$

$$LL_{\text{residual}} = 31.78 \text{ kN/m}$$

$$LL_{\text{contingency}} = 13 \text{ kN/m}$$

Med vannstandsvariasjon lik istykkelsen h:

(1) Linjelast grunnet vannstandsvariasjon beregnes ved følgende formel:

F_1 bestemmes som følger:

$$f(\Delta A) = \max \text{ of } 0 \text{ or } 1 - 4 \left(\frac{\Delta A}{A_m}\right)^{1.4} = 0.72$$

$$f(\text{drop}) = \max \text{ of } 0 \text{ or } 1 - 20 \left(\frac{\text{drop}}{2h}\right)^{24} = 1$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = \left[\frac{1}{\max \text{ of } 0.22 \text{ or } \frac{a}{h}} \right]^2 = 1$$

$$F_1 = f(\Delta)f(\text{drop})f\left(\frac{a}{h}\right) = 0.72$$

$$LL_{\text{waterlevel}} = 0.72 \left[5 + (7.5 * 10^{-8}) * 1345.08^2 \frac{1972.21^{1.2}}{5^{0.4}} \right] = 465,2 \text{ kN/m}$$

der:

$$A_m = 1380 \text{ }^\circ\text{Ccm}$$

$$a = 65 \text{ cm}$$

$$\text{drop} = 65 \text{ cm}$$

(2) Linjelast grunnet det innebygde trykket i isdekke beregnes ved følgende formel:

$$f(h) = h - 25 = 40$$

$$LL_{\text{residual}} = 0.37 * 40 + \frac{1.47}{1} = 16.27 \text{ kN/m}$$

(3) For beregning av total islast ved en kombinasjon av temperaturendring og vannstandvariasjon viser Comfort m.fl. (2003) til følgende formel:

$$LL_{\text{total}} = 42.54 + 16.27 + 27 + 465.2 = 551.01 \text{ kN/m}$$

der: $\Delta LL_{\text{thermal}} = 42.54 \text{ kN/m}$

$$LL_{\text{residual}} = 16.27 \text{ kN/m}$$

$$LL_{\text{contingency}} = 27 \text{ kN/m}$$

$$LL_{\text{waterlevel}} = 465.2 \text{ kN/m}$$

Vedlegg A5: Lastmodell

Forsøk 1 (0.06 m) :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = 0.036$$

$$q = \frac{204 \cdot 0.06}{\left[1 - \left(\frac{2 \left(\sinh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) + \cosh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \right)}{\sinh(0.036 \cdot 30) + \sin(0.036 \cdot 30)} \right) \right]}$$

$$q = \frac{12.4}{[0.245]} = 50.6 \text{ kN/m}$$

Opptredende moment grunnet vannstandsvariasjon, M_V , på dammen beregnes ved følgende formel:

$$M_V = \frac{50.6}{2 \cdot 0.036^2} * \frac{\sinh 0.036 \cdot 30 - \sin 0.036 \cdot 30}{\sinh 0.036 \cdot 30 + \sin 0.036 \cdot 30}$$

$$M_V = \frac{50.6}{2 \cdot 0.036^2} * 0.971 = 18955.5 \text{ kNm}$$

Lastbidrag fra temperaturendring

$$P_T = 9.3 * 10^3 * 650 * 5.5 * 10^{-5} * 3 = 100 \text{ kN}$$

Lastbidrag fra gjenfrysing av sprekker:

For å beregne potensiell lengdeutvidelse Δ kan følgende formel benyttes:

Ingen sprekkdannelse = ingen last

$$\Delta_{\text{tot}} = 0$$

$$\rightarrow w_0 = 0$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{18955.5 \cdot 10^3 \cdot 325}{22885416.67} + \frac{100 \cdot 10^3}{650} = 423.04 \text{ kPa}$$

Forsøk 2 (0.22 m) :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = 0.036$$

$$q = \frac{204 \cdot 0.22}{\left[1 - \frac{2 \left(\sinh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) + \cosh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \right)}{\sinh(0.036 \cdot 30) + \sin(0.036 \cdot 30)} \right]}$$

$$q = \frac{44.88}{[0.245]} = 183.18 \text{ kN/m}$$

Oppredende moment grunnet vannstandsvariasjon, M_V , på dammen beregnes ved følgende formel:

$$M_V = \frac{183.18}{2 \cdot 0.036^2} * \frac{\sinh 0.036 \cdot 30 - \sin 0.036 \cdot 30}{\sinh 0.036 \cdot 30 + \sin 0.036 \cdot 30}$$

$$M_V = \frac{183.18}{2 \cdot 0.036^2} * 0.971 = 68623.2 \text{ kNm}$$

Lastbidrag fra temperaturendring

$$P_T = 9.3 * 10^3 * 650 * 5.5 * 10^{-5} * 8 = 266 \text{ kN/m}$$

Lastbidrag fra gjenfrysing av sprekker:

For å beregne potensiell lengdeutvidelse Δ kan følgende formel benyttes:

2 sprekker på 0.0024m, lav temperatur etter regulering, ca 80% frysning =

$$\Delta_{\text{tot}} = 2 * (0.0024 * 0.8) = 0.004 \text{ m}$$

$$\rightarrow w_0 = \sqrt{0.004 \frac{4 \cdot 30^2}{30\pi^2}} = 0.220 \text{ m}$$

$$q = \frac{45}{[0.245]} = 183.6 \text{ kN/m}$$

$$M_V = \frac{183.6}{2 \cdot 0.036^2} * 0.971 = 68789 \text{ kNm}$$

Total spenning blir:

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{68623.2 \cdot 10^3 \cdot 325}{22885416.67} + \frac{266 \cdot 10^3}{650} + \frac{68789 \cdot 10^3 \cdot 325}{22885416.67}$$

$$\sigma_{\text{tot}} = 2361 \text{ kPa}$$

Forsøk 3 (0.35 m) :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = 0.036$$

$$q = \frac{204 \cdot 0.35}{\left[1 - \frac{2 \left(\sinh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) + \cosh\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{0.036 \cdot 30}{2}\right) \right)}{\sinh(0.036 \cdot 30) + \sin(0.036 \cdot 30)} \right]}$$

$$q = \frac{71.4}{[0.245]} = 291.43 \text{ kN/m}$$

Opptredende moment grunnet vannstandsvariasjon, M_V , på dammen beregnes ved følgende formel:

$$M_V = \frac{291.43}{2 \cdot 0.036^2} \cdot \frac{\sinh 0.036 \cdot 30 - \sin 0.036 \cdot 30}{\sinh 0.036 \cdot 30 + \sin 0.036 \cdot 30}$$

$$M_V = \frac{291.43}{2 \cdot 0.036^2} \cdot 0.971 = 109173.3 \text{ kNm}$$

Lastbidrag fra temperaturendring

$$P_T = 9.3 \cdot 10^3 \cdot 650 \cdot 5.5 \cdot 10^{-5} \cdot 12 = 399 \text{ kN/m}$$

Lastbidrag fra gjenfrysing av sprekker:

3 sprekker på 0.004cm, mild temperatur etter regulering, ca 30 % frysning =

$$\Delta_{\text{tot}} = 2 \cdot (0.004 \cdot 0.3) = 0.0036 \text{ m}$$

$$\rightarrow w_0 = \sqrt{0.0036 \frac{4 \cdot 30^2}{30\pi^2}} = 0.21 \text{ m}$$

$$q = \frac{43}{[0.245]} = 174 \text{ kN/m}$$

$$M_V = \frac{174}{2 \cdot 0.036^2} \cdot 0.971 = 65259 \text{ kNm}$$

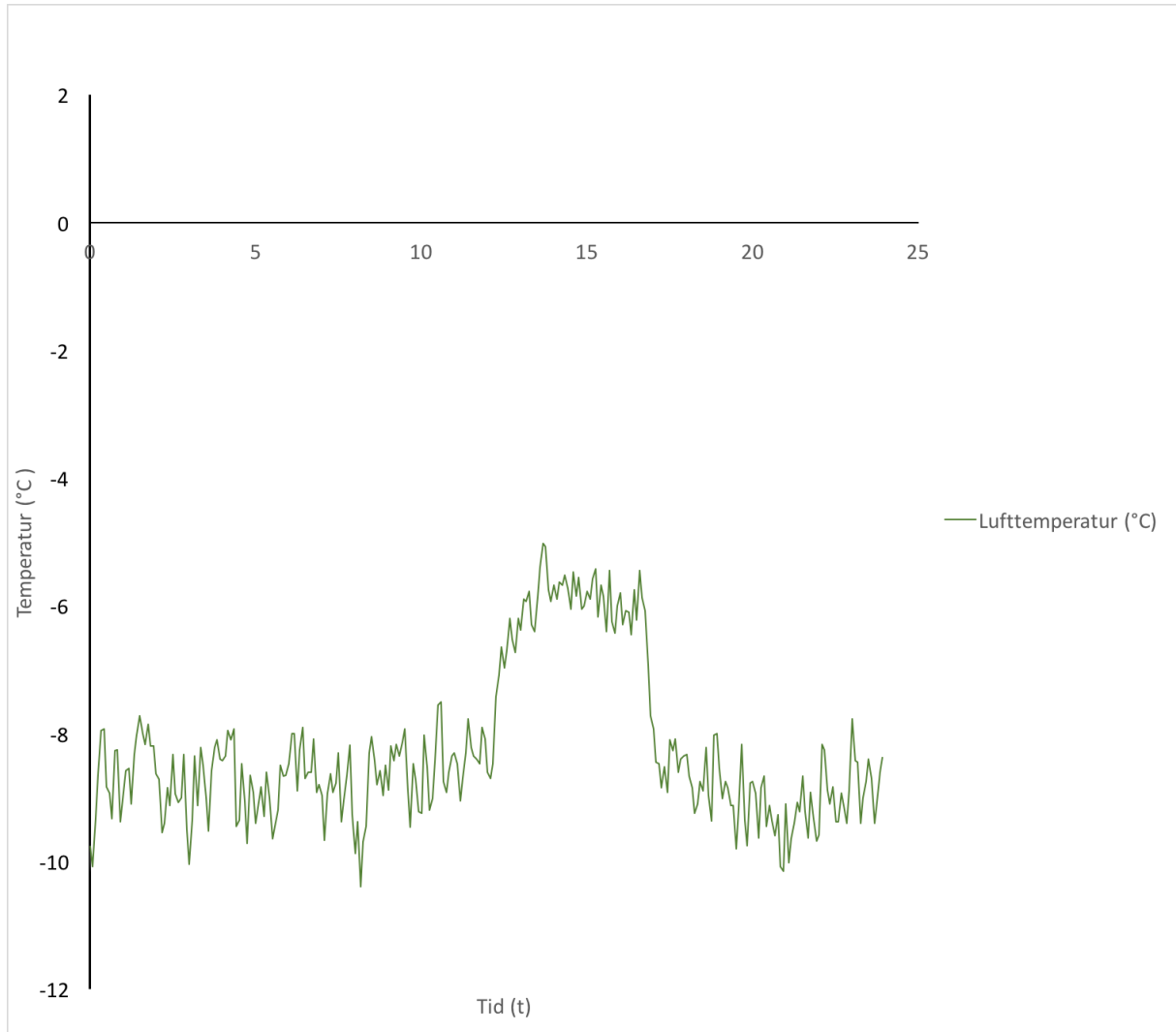
Total spenning blir:

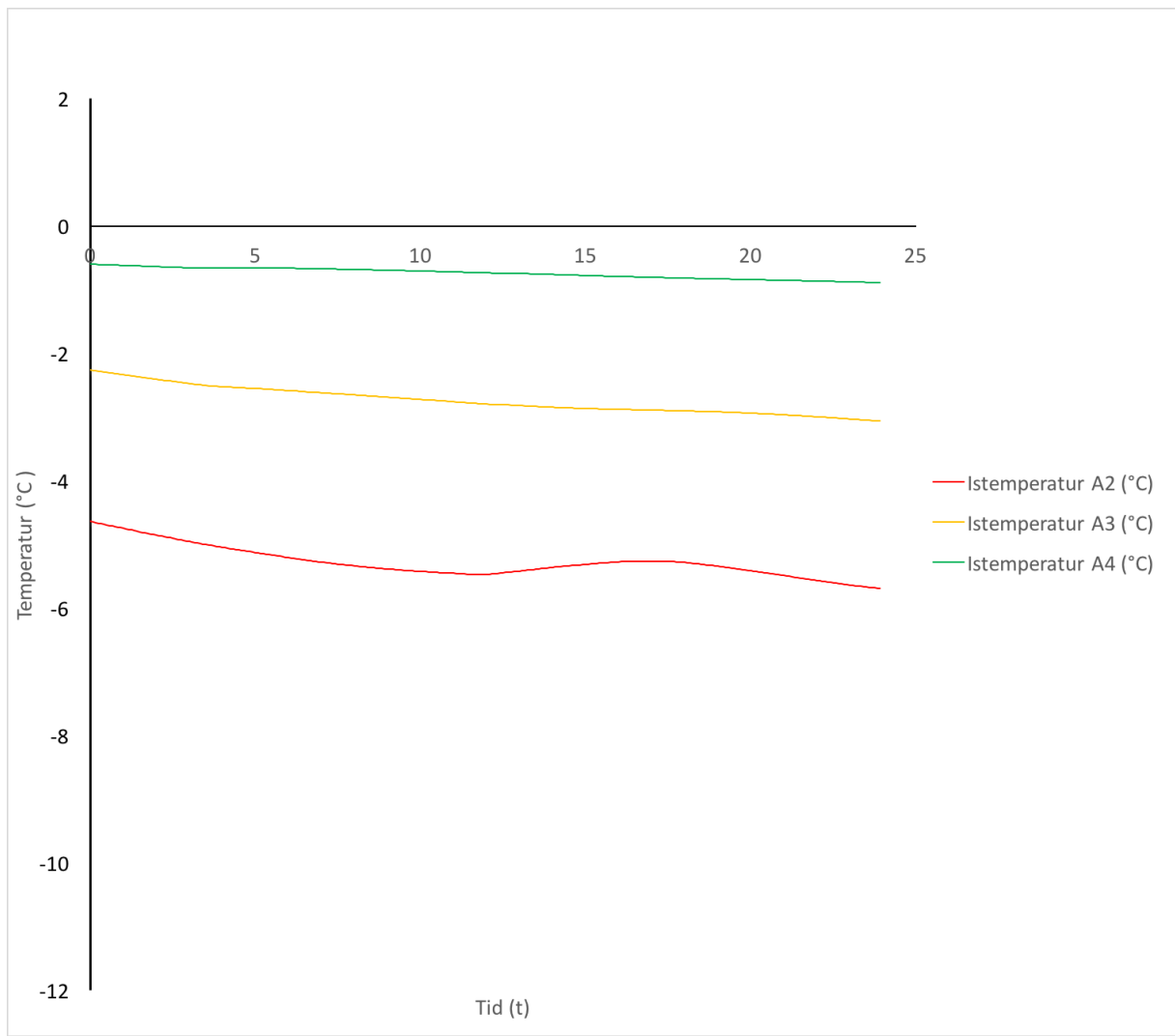
$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{109173.3 \cdot 10^3 \cdot 325}{22885416.67} + \frac{399 \cdot 10^3}{650} + \frac{65259 \cdot 10^3 \cdot 325}{22885416.67}$$

$$\sigma_{\text{tot}} = 3091 \text{ kPa}$$

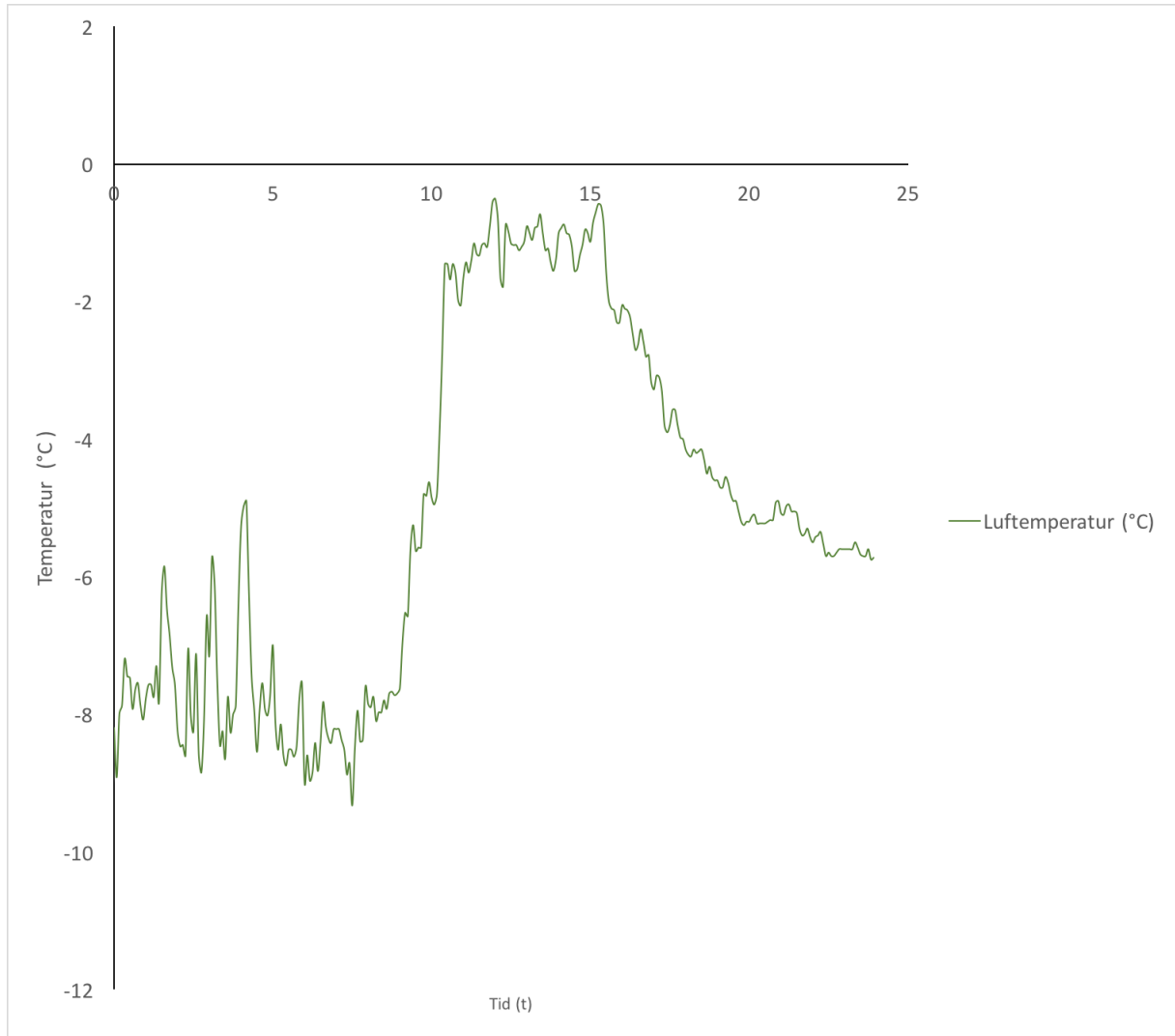
Vedlegg B: Temperaturprofil

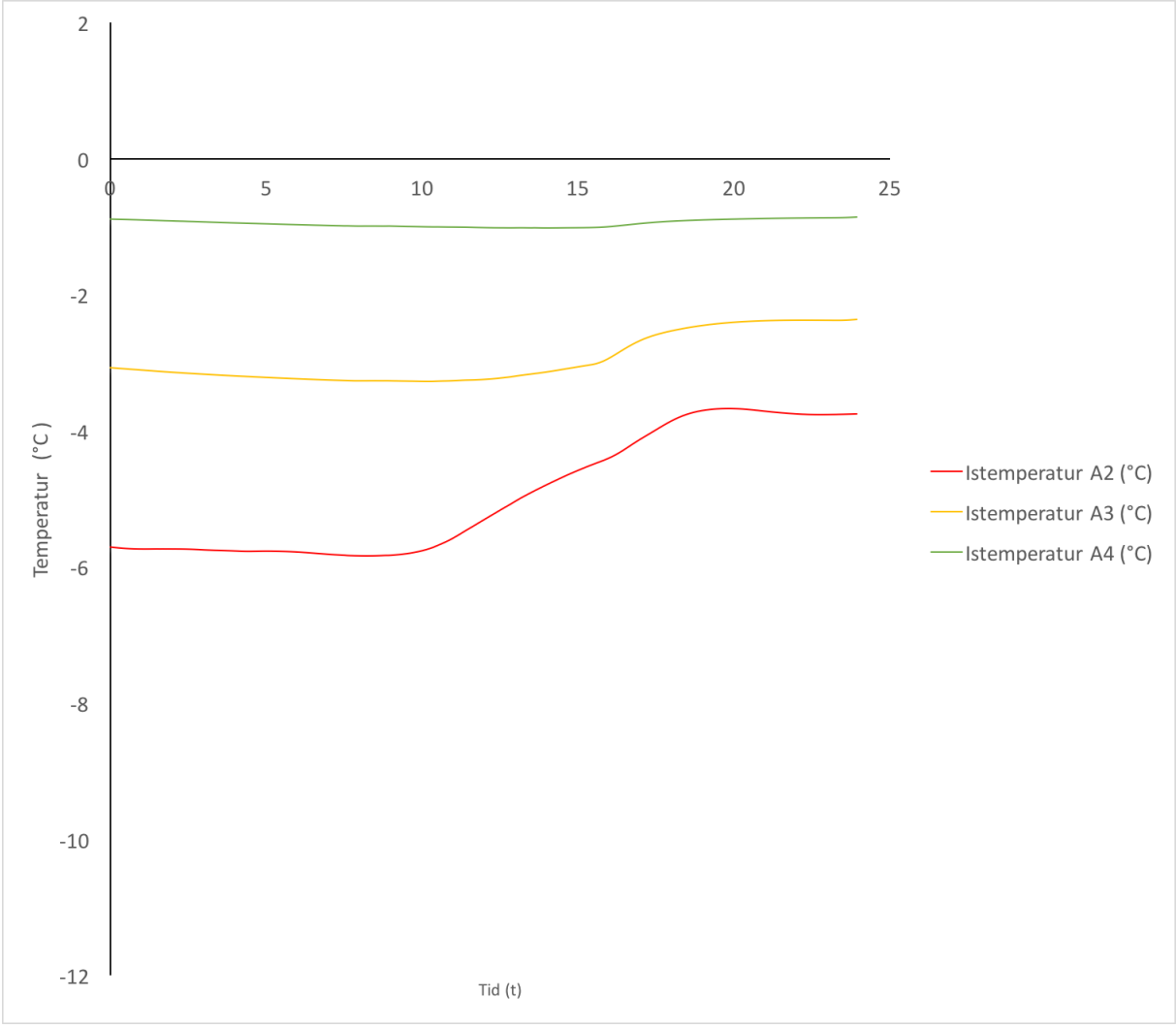
Vedlegg B1: Forsøk 1 (6 cm vannstandsvariasjon)



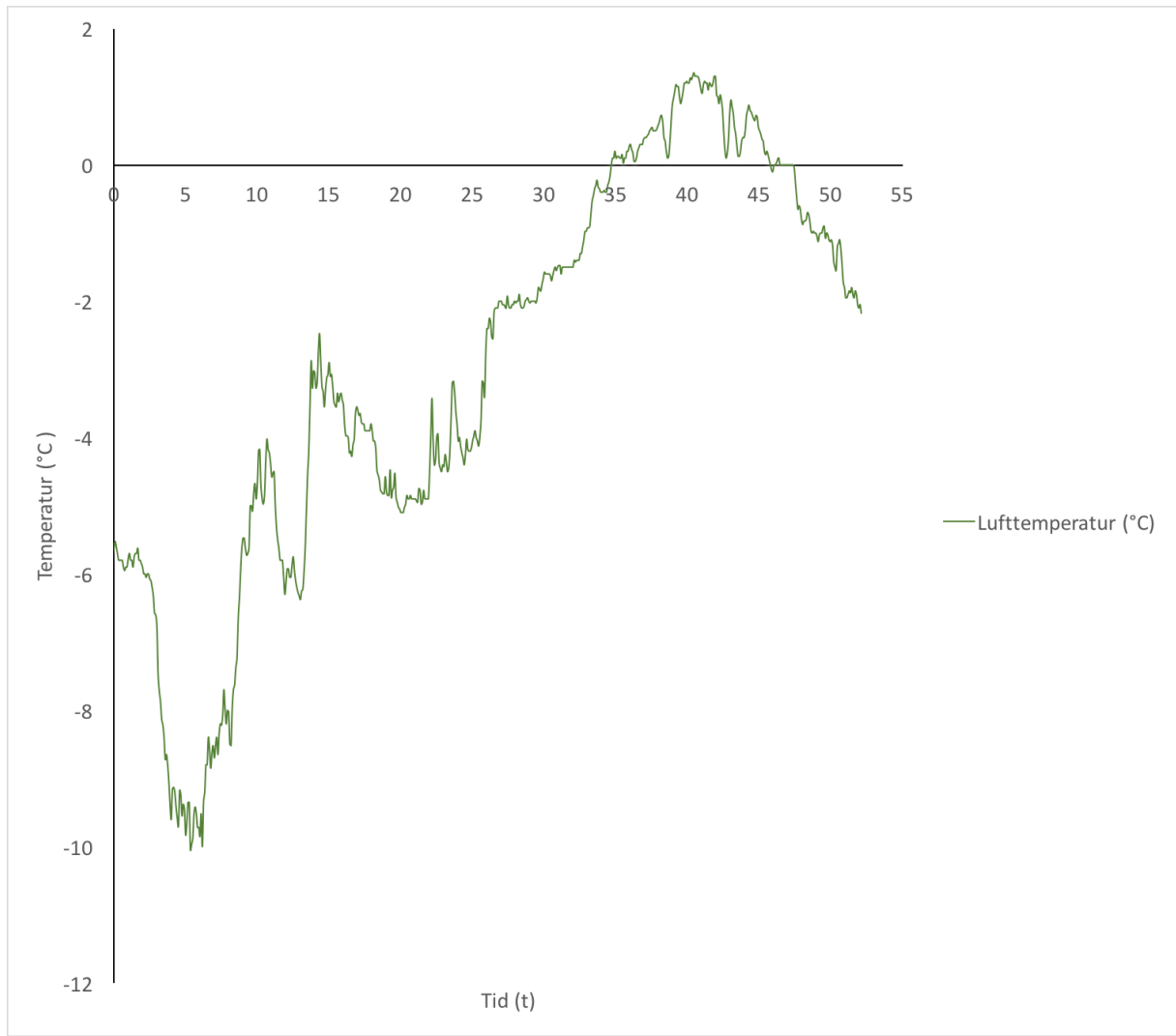


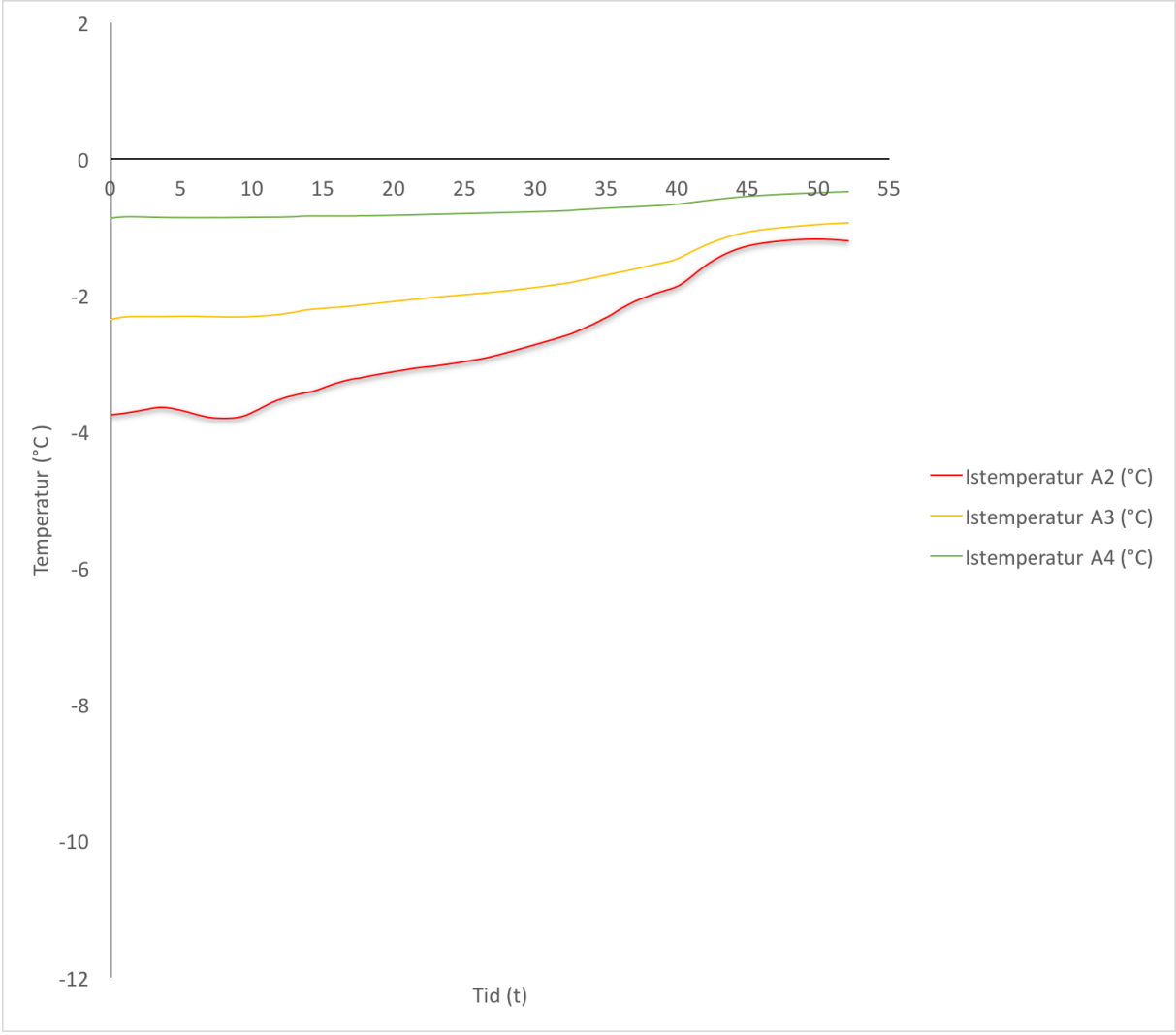
Vedlegg B2: Forsøk 2 (24 cm vannstandsvariasjon)





Vedlegg B3: Forsøk 3 (35 cm vannstandsvariasjon)





Vedlegg C: Lastforløp

