NVE

Istrykk på dammer

Måleprogram dam Silvann, vinter 98-99

Knut Aune Hoseth
Lennart Fransson

22
1999

DOKUMENT

Istrykk på dammer

Måleprogram dam Silvann, vinter 98-99

Norges vassdrags- og energidirektorat

1999

Dokument nummer 21

Istrykk på dammer

Utgitt av:	Norges vassdrags- og energidirektorat
Redaktør:	Knut Aune Hoseth
Forfatter:	Knut Aune Hoseth og Lennart Fransson

Trykk:	NVEs hustrykkeri
Opplag:	40
Forsidefoto:	Knut Aune Hoseth, oversiktsbilde
ISSN:	1501-2840

Sammendrag: Prosjektet er utført som grunnlag for å etablere måleprosedyrer og bedrede dimensjoneringskriterier for termisk istrykk på dammer.

Det er ikke tidligere foretatt måling av termiske islaster på konstruksjoner i Norge. Etter nærmere vurderinger av mulige målesteder falt valget på Dam Silvann i Håkvikdalen i Narvik kommune. Istrykk ble målt ved å fryse inn lastceller i isen foran dammen. Måleprogrammet har fungert godt, men det er behov for å foreta en del korrigeringer før iverksetting av evt oppfølgende målinger.

Målingen av termisk istrykk på dam Silvann vinteren 98-99 har dokumentert opptredende islaster som overskrider dimensjoneringskriteriet for islaster på dammer i Norge.

Vurdering av opptredende islaster mot en semi-empirisk formel utviklet av Lennart Fransson ved Luleå Tekniska Universitet gir godt samsvar med tidligere målinger av termisk istrykk i Sverige.

Emneord: Islaster, målinger, dimensjonering, dammer

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Desember 1999

Innhold

Forord 4

Sammendrag 5

1. Innledning 6

2. Islaster 7

2.1. Generelt om is 7

2.2. Termiske islaster på konstruksjoner 8

3. Måleprogram 10

3.1. Målested 10

3.2. Metodikk 12

3.3. Tidsperiode 14

4. Måleresultat 15

4.1. Istykkelse 15

4.2. Luft og istemperatur 15

4.3. Istrykk 16

5. Vurderinger 17

5.1. Måleprogram 17

5.2. Måleresultat istrykk 19

6. Konklusjon 22

7. Referanser 23

Vedlegg 24

1. Bilder 25

2. Diagram, luft- og istemperatur 30

3. Diagram, istrykk 32

4. Diagrammer, beregnet istrykk utfra istemperatur 34

Forord

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Luleå Tekniska Universitet har vinteren 98-99 gjennomført et samarbeidsprosjekt for å registrere termiske istrykk på dam Silvann i Narvik kommune. Prosjektet inngår som et delprosjekt i EFFEKT programmet som ENFO håndterer for Norges Forskningsråd. Prosjektet har også vært finansiert av den svenske bransjeorganisasjonen Elforsk.

Denne rapport beskriver metodikk og resultat fra måling av termisk istrykk mot en betongdam vinteren 98-99. Det er også utført en generell vurdering av måleprogrammet og måleresultatene som grunnlag for bla videreføring av prosjektet.

Prosjektarbeidet er i hovedsak utført av Knut Aune Hoseth, NVE og Lennart Fransson, Luleå Tekniska Universitet. Viggo Moe og Randi Pytte Asvall, NVE samt Ingvar Holm, Luleå Tekniska Universitet har også bidratt i prosjektarbeidet.

Deltakerne i prosjektets styringsgruppe har gitt konstruktive bidrag til prosjektgjennomføringen og Narvik Energi har gjennom å stille materiell tilgjengelig for prosjektet bidratt til prosjektarbeidet.

Vi ønsker å takke ovennevnte parter for positive bidrag i prosjektgjennomføringen.

Desember 1999

Are Mobæk
avdelingsdirektør

Aage Josefsen
regionsjef

Sammendrag

Prosjektet Istrykk på dammer, måleprogram dam Silvann, vinteren 1998-99 er utført som grunnlag for å etablere måleprosedyrer og bedrede dimensjoneringskriterier for termisk istrykk på dammer.

Det er ikke tidligere foretatt måling av termiske islaster på konstruksjoner i Norge og det ble derfor lagt vekt på å finne et målested hvor både forholdene lå til rette for oppbygging av betydelig istrykk, hvor det var mulig å foreta målinger over en lengre periode og hvor adkomst var enkel mht oppfølging. Etter nærmere vurderinger av mulige målesteder falt valget på Dam Silvann i Håkvikdalen i Narvik kommune. Dammen er av betong med vertikal flate på vannsiden. Den er ca 20 m. lang og med makshøyde på ca 5 meter.

Måleprogrammet startet den 19. januar og ble avsluttet den 22. april 1999. Istrykk ble målt ved å fryse inn lastceller i isen foran dammen. Parametre som har betydning for beregning av termisk istrykk ble også registrert.

Måleprogrammet har fungert godt, men det er behov for å foreta en del korrigeringer før iverksetting av evt oppfølgende målinger.

Målingen av termisk istrykk på dam Silvann vinteren 98-99 har dokumentert opptredende islaster som overskrider dimensjoneringskriteriet for islaster på dammer i Norge.

Vurdering av opptredende islaster mot en semi-empirisk formel utviklet av Lennart Fransson ved Luleå Tekniska Universitet gir godt samsvar med tidligere målinger av termisk istrykk i Sverige.

1. Innledning

Dimensjonerende islast for norske damkonstruksjoner er i "Forskrifter for dammer", del II kap 6.5.3 (ref nr 1) begrenset til termiske iskrefter og satt til en linjelast som ikke bør regnes med en mindre verdi enn 100 kN/m som angriper 250 mm under høyeste regulerte vannstand (HRV). En lastfaktor på 1,2 skal også benyttes ved beregningen. Det er i forskriftene (kap. 6.5.3) spesifisert at karakteristiske verdier for istrykk skal fastsettes etter vurdering av de klimatiske og topografiske forhold på stedet.

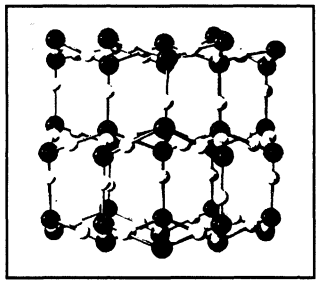
Det er ikke foretatt vurderinger av hvordan klimatiske og topografiske forhold vil innvirke på istrykket, og det knytter seg derfor usikkerhet til hvilke verdier som skal benyttes ved dimensjonering av islaster mot damkonstruksjoner. Dette gjelder i særlig grad ved kontroll og revisjon av eldre dammer der istrykk ikke var med i opprinnelig dimensjoneringsgrunnlag.

Prosjektet Istrykk på dammer, måleprogram dam Silvann, vinteren 1998-99 er utført som grunnlag for å etablere måleprosedyrer og bedrede dimensjoneringskriterier for termisk istrykk på dammer.

2. Islaster

2.1. Generelt om is

Is er et krystallinsk materiale, og iskrystallene har en heksagonal struktur. Aksen parallell med krystallene benevnes basalplanet, og krystallenes hovedsymmetriakse er vinkelrett på basalplanet, se Figur 2.1 (ref. nr 2).



Figur 2.1 Isens oppbygging

Under rolige værforhold og i ikke for sterkt strømmende vann dannes den første isen på vannoverflaten ved et horisontalt lag av isnåler som etter hvert fylles med tynne klare isskiver bestående av iskrystaller med ulik størrelse og krystallretninger. Fra den første isen (primærisen) vokser isen ved avkjøling nedover mot vannflaten. Hastigheten avhenger av krystallretningen og krystaller med gunstigst krystallretning vil kunne dominere og danne såkalt stålis (svensk, kärnis). Snøtilvekst på isoverflaten som evt presser undervann gjennom sprekker i isdekket opp til overflaten og/eller tine- fryseprosesser av snø/is på isoverflaten vil etablere et islag på toppen av det opprinnelige isdekket. Denne isen, som benevnes sørpeis (svensk, støpis), er gjerne hvit av farge og med høyere porøsitet enn stålisen. Istilveksten avhenger av avkjølningen fra luften, og isens varmeledningsevne vil redusere istilveksten ettersom istykkelsen øker.

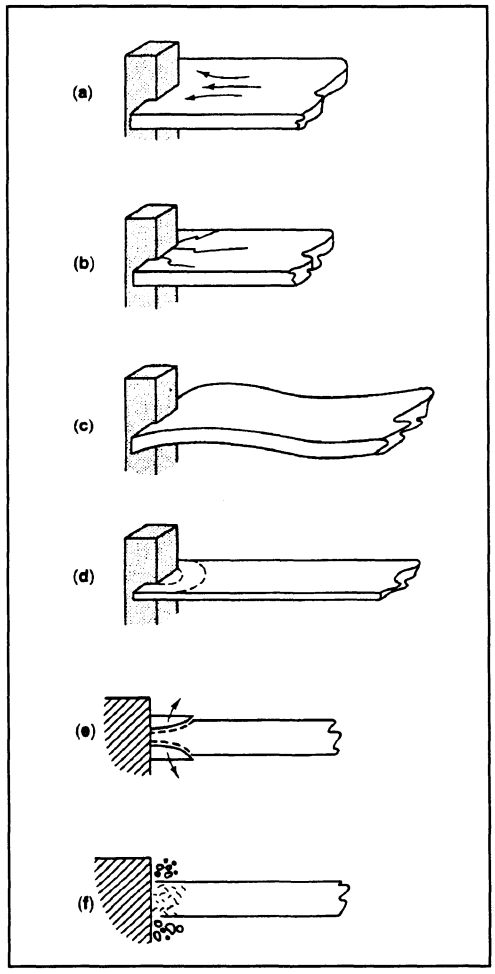
Is er et anisoptropt materiale, og isens styrke parallelt med krystallaksen kan være 10 ganger sterkere enn styrken parallelt med basalplanet. Materialet er karakterisert ved at det opptrer nært smeltepunktet, og de mekaniske egenskaper til is kan sammenlignes med egenskaper til metaller ved høye temperaturer. Om en belastning påvirker isen over lang tid kan materialet få store deformasjoner uten sprekkdannelser (duktilt/plastisk materiale), mens kald is utsatt for en rask påkjenning kan være sprøtt som glass (lineær elastisk/sprøtt materiale). Følgende parametre bestemmer isens mekaniske egenskaper:

- Temperatur
- Krystallstruktur og krystallstørrelse
- Densitet
- Luft- og saltporevolum
- Spenningssituasjon
- Belastningshastighet

Isens elastisitetsmodul (E-modul) er ca 5 Gpa, og isens typiske tøyningshastighet er ca 10^{-8}. Enaksiell trykkfasthet varierer mellom 1 og 8 Mpa, og densiteten til ren is ved null grader er 916,6 kg/m^3. Den varme som avgis når vann går over til is er 334 kJ/kg , og isens varmeutvidelseskoeffisisent er ca $50 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

2.2. Termiske islaster på konstruksjoner

Ved interaksjon mellom is og konstruksjon kan isen fremvise en rekke bruddegenskaper, se Figur 2.2 (Ref nr 2)



Figur 2.2 Bruddmekanismer

Islaster på konstruksjoner begrenses av enten iskraftens størrelse eller av den kraft som er nødvendig for at isen skal brytes sammen ved interaksjon mot konstruksjonen.

Ved betraktning av islaster begrenset av isens mekaniske egenskaper legges som regel bruddmekanismen knusing til grunn for beregningen (bruddmekanisme *f* i figur 2.2). Islast på konstruksjonen beregnes da som isens enaksielle trykkfasthet multiplisert med arealet til kontaktflaten korrigert for kontakt- og geometriforhold.

Begrensningen på størrelsen til lasten for is i bevegelse kan være strøm- og vindhastighet eller for termiske laster temperaturvariasjoner i isen.

Termiske laster oppstår som følge av utvidelse forårsaket av temperaturstigning i isen. Oppbygging av termiske istrykk vil avhenge av:

- Egenskaper og tykkelse til is
- Størrelse på temperaturspranget i isen
- Hastigheten temperaturstigningen skjer over
- Oppsprekking av isen
- Innspenningsforhold

De termiske islastene vurderes å bli størst ved istykkelser mellom 0,3m og 0,5m. Isens varmeisolerende egenskaper reduserer oppbygging av store istrykk ved større istykkelser. For små istykkelser er angrepsflaten fra isdekket liten og dermed islasten begrenset.

Størrelsen på temperaturspranget i isen og hastighet på temperaturøkningen er input til termisk trykkoppbygging i isen. Disse forhold vil variere avhengig av geografiske- og meteorologiske forhold.

Sprekker i isen vil være enten tørre (luftfylte), eller våte (vannfylte senere tilfrosne). Tørrsprekker dannes i stor grad ved krymping som følge av temperatursenkning. Deformasjonen som følge av termisk utvidelse i isen vil være liten, og tørrsprekker i isen vil kunne ta opp denne utvidelsen og dermed redusere trykkoppbyggingen. Dette er ikke tilfelle for våte tilfrosne sprekker.

Tilsvarende som for deformasjonssoner i isen vil deformasjonssoner langs randen av isen kunne ta opp deformasjoner, og dermed hindre oppbygging av istrykk. Et mye innspent isdekke vil følgelig ha et langt større potensiale for istrykksoppbygging enn et mindre innspent isdekke.

Størrelsen til islastene på en konstruksjon er også i stor grad avhengig av konstruksjonens egenskaper, både mht geometri og om konstruksjonen er fast eller ettergivende.

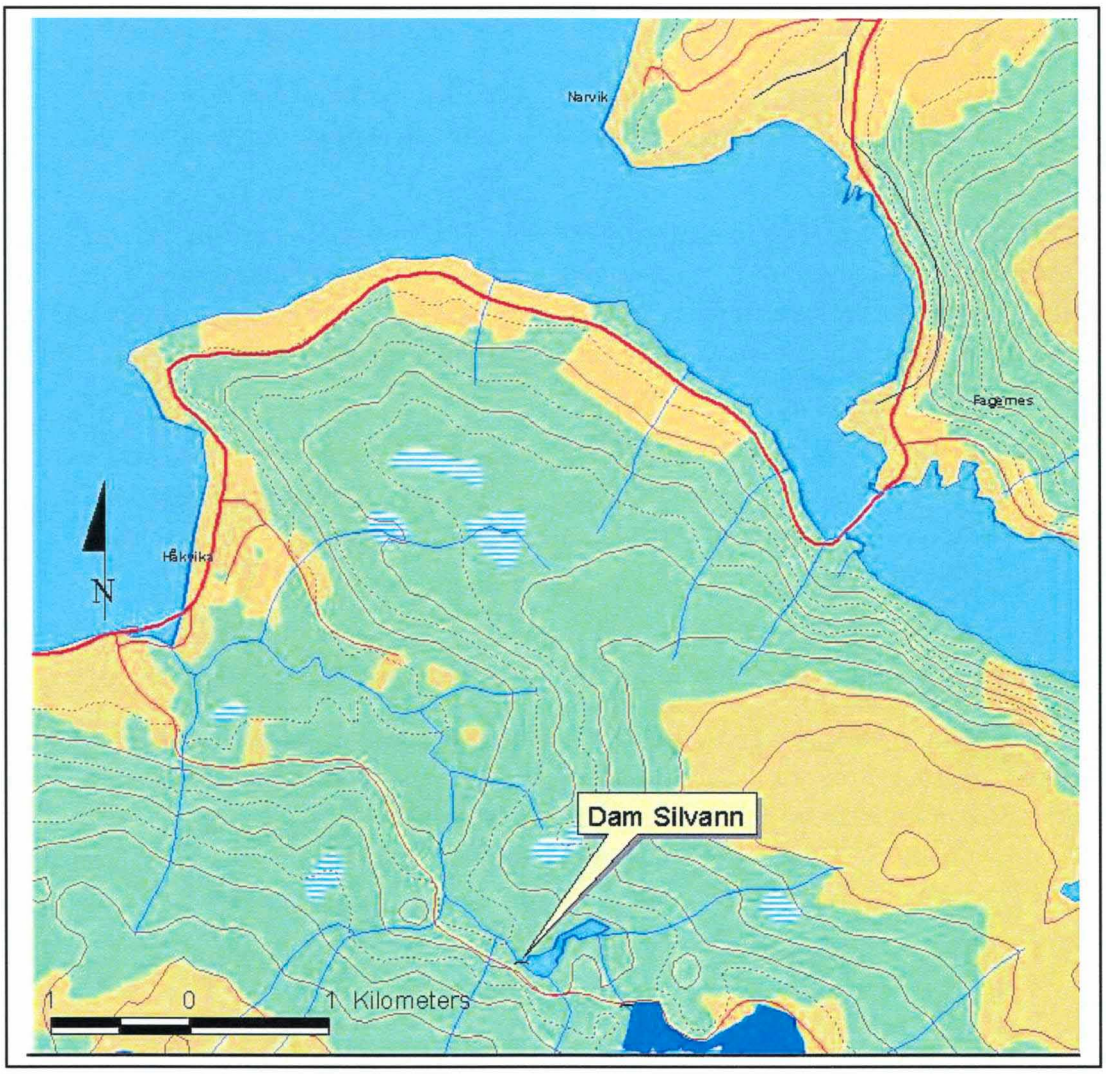
I forbindelse med kartlegging av opptredende istrykk på konstruksjoner har man også kommet frem til at konstruksjonens størrelse har avgjørende betydning for opptredende påkjenninge fra isen. Dette har i hovedsak sammenheng med at betydningen av inhomogenitet eks.vis utbredelse av deformasjonssoner i isen er større ved et stort areal enn ved et lite areal.

3. Måleprogram

3.1. Målested

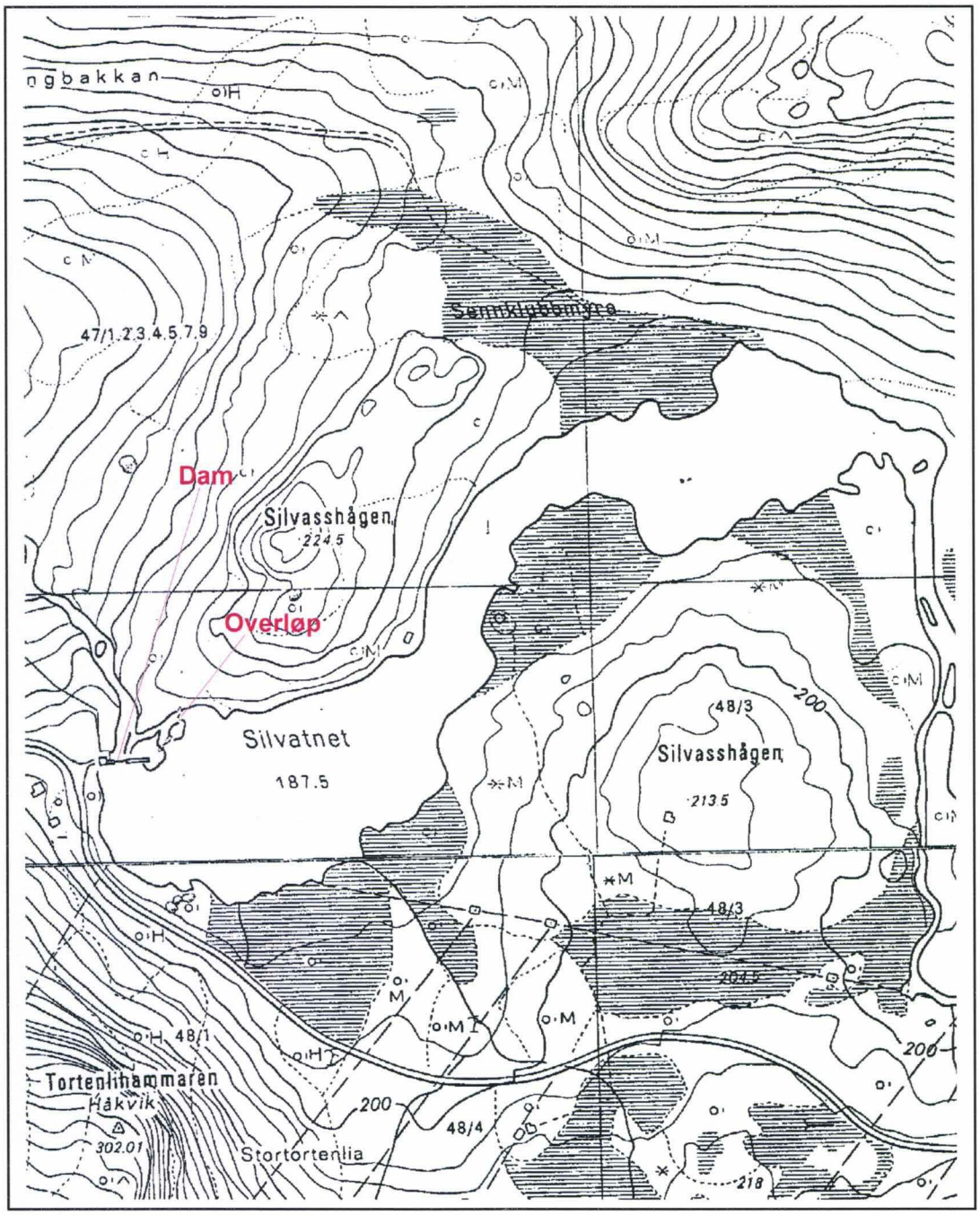
Det er ikke tidligere foretatt måling av termiske islaster på konstruksjoner i Norge og det ble derfor lagt vekt på å finne et målested hvor både forholdene lå til rette for oppbygging av betydelig istrykk, hvor det var mulig å foreta målinger over en lengre periode (i perioden januar – april) og hvor adkomst var enkel mht oppfølging.

Utgangspunktet var at måleprogrammet skulle utføres på en dam som tidligere var skadet av islaster. Det ble forsøkt å få gjennomført målinger ved Svartavanndam (Elkem Sauda) og Dam Lille Fiskeløs (Narvik Energi) uten at det lot seg gjøre noen av stedene da vannstanden i begge reguleringsmagasin ble nedtappet for tidlig i forhold til ønsket måleperiode. Etter nærmere vurderinger av mulige målesteder falt valget på Dam Silvann i Håkvikdalen i Narvik kommune, se lokalisering i Figur 3.1.



Figur 3.1 Lokalisering av målested

Silvannet er et lite vann (lengde ca 650 m og bredde 50 – 150m) beliggende på kote 187,5, se Figur 3.2. Silvannet var tidligere reguleringsmagasin til et kraftverk. Etter nedlegging av kraftverket ble det besluttet å restaurere dam Silvann for å opprettholde høy og tilnærmet konstant vannstand lik tidligere HRV. Dammen er i dag av betong med vertikal flate på vannsiden. Dammen er ca 20 m. lang og med makshøyde på ca 5 meter. Overløp fra Silvannet er etablert ved naturlig terskel i fjell ca 50 meter nordøst for dammen.



Figur 3.2 Kartutsnitt av målested, 1 : 5000

3.2. Metodikk

Måling av termiske iskrefter på konstruksjoner foretas enten ved å instrumentere konstruksjonen og måle istrykket på denne eller ved å måle trykket i isen foran konstruksjonen. Sistnevnte måleprosedyre er den enkleste og rimeligste, og dette prinsipp ble lagt til grunn for måling av termisk istrykk på dam Silvann. Bilder i vedlegg 1 illustrerer istrykkmålingene vinteren 98-99.

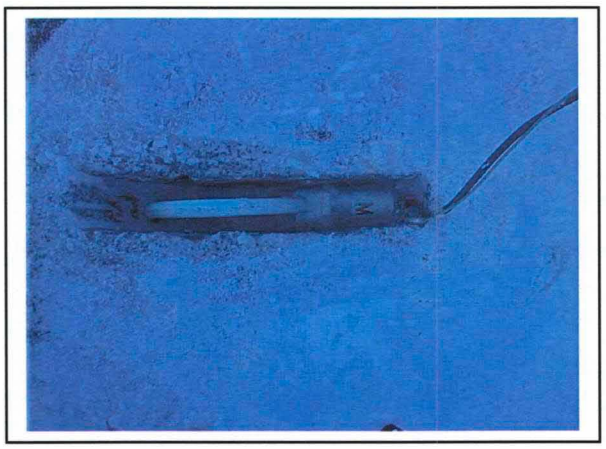
Følgende parametre ble registrert:

- Istrykk
- Luft-, is- og vanntemperatur
- Lufttemperatur og vindhastighet
- Istykkelsesutvikling

Det ble montert tre ulike automatiske måleanordninger, det ene registrerte istrykk, lufttemperatur og istemperatur, det andre temperaturprofil i is og vann og det tredje vindhastighet samt lufttemperatur.

Sensorer ble plassert i/ved isen mens registreringsutstyr, styringssystem og lagringsenheter var lokalisert i ei brakke ved dammen, se bilde i vedlegg 1. Det var ikke tilgang til strøm ved Silvannet, så alt måleutstyr ble kjørt vha interne batterier eller på 12 volts anlegg koblet til solcelleanlegg.

Istrykksmålinger ble foretatt i isen ca 5 meter fremfor dammen. Fra målestedet ble det trukket kabler til måle- og registreringsutstyr i målebrakka. Istrykket ble registrert vha lastceller illustrert i bildet nedenfor. Lastcellene som ble benyttet er opprinnelig utviklet for måling av trykk ved støping av massive betongkonstruksoner. De er ombygd til målinger av istrykk ved Luleå Tekniska Universitet.

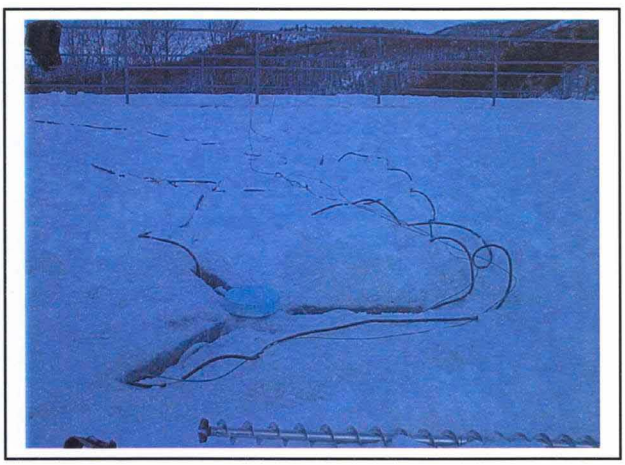


Lastcelle plassert i isdekket, sett ovenfra

Lastcellen har en diameter på 0,3 m, den er væskefylt og inneholder en trykksensor som registrerer trykkoppbygging. Før plassering i isen ble lastcellene kalibrert ved laboratoriet på Luleå Tekniska Universitet. Kalibrering mot styringssystemet ble utført under isohydratisk trykk ved nedsenking av lastcellen til ulike dyp på Narvik havn.

Det kreves en istykkelse på ca 0,4 m for å instrumentere isen med denne type lastceller. Ved instrumenteringen ble det sagd et spor i isen hvoretter lastcellen ble plassert i isen, vann etterfylt og lastcellen frosset inn i isen. Det var viktig å i minst mulig grad påvirke isen ved målestedet, og særlig forhindre at det ble sagd gjennom isdekket. Lastcellens senter var etter installering lokalisert 0,2 m under isoverflaten.

Lastcellen måler trykk i en retning parallelt med isdekket. For å registrere variasjoner i istrykket i ulike retninger ble det derfor montert 3 ulike lastceller i en tripod (120 graders vinkel mellom lastcellene) hvorav den ene lastcellen var vinkelrett på dammen, se bilde.



Plassering av lastceller i tripod foran dammen

Trykk i de tre lastcellene ble registrert hver halvtime hele måleperioden. Registrerings-enheten for istrykkmålingene var en PC-datalogger. Til denne enheten ble også enkle sensorer for registrering av lufttemperatur og istemperatur tilkoblet. Registreringene fungerte under hele perioden med unntak av et ca 4 dagers avbrudd (forårsaket av strømbrudd i slutten av måleperioden).

Måling av luft-, is- og vanntemperatur ble foretatt vha et separat system. Dette besto i en thermistorstreng frosset inne i isen tilkoblet en styrings- og registreringsenhet. Nøyaktigheten på dette system var god, men temperaturområdet til valgte thermistorer var ikke tilpasset lave lufttemperaturer (gikk bare ned til – 8 °).

Registreringsenheten for vindhastighet og lufttemperatur sluttet å fungere i måleperioden og data lagret frem til bruddet ble under denne hendelsen slettet. At disse data ikke ble lagret var imidlertid ikke kritisk da lufttemperatur også ble logget på de to øvrige systemene.

Istykkelsesutvikling ble registrert manuelt vha to ulike instrument som var frosset inn i isen. Kontrollmålinger ble utført vha boring.

3.3. Tidsperiode

Forberedelser til måleprogrammet startet høsten 1998, og innkjøp samt avsluttende kalibrering av måleutstyr ble avsluttet tidlig i januar måned 1999.

Observasjoner, senere målinger, av isforhold startet i oktober måned 1998 og ble avsluttet i mai måned 1999.

Måling av istrykk, luft-, is- og vanntemperatur startet den 19. januar og ble avsluttet den 22. april 1999. Det var automatisk innsamling av måleparametre hver halvtime, og målingene pågikk kontinuerlig i perioden med unntak av et lite brudd forårsaket av strømutfall i april måned.

4. Måleresultat

4.1. Istykkelse

I Nord Norge var vinteren 1998 – 99 meget nedbørsfattig. Det kom ikke snø før i januar måned 1999, men det var omtrent normale temperaturforhold på senhøsten og forvinteren. Dette resulterte i barfrost, mye tele og lav grunnvannstand mye svellis og bunnis i vassdrag samt etablering av tykk is. Is på vann og i vassdrag var helt til i januar måned uten et toppskikt av sørpeis (stöpis). Isens egenskaper var gode ved starten av måleperioden mht instrumentering og måling av termiske iskrefter.

Det var islegging ved Silvannet den 17. oktober 1998. Ved starten av måleprogrammet den 19. januar var istykkelsen 0,5 m, og på dette tidspunkt var det kun stålis (kärnis). Istykkelsen nådde et maksimum på 0,62 m denne vinteren bestående av 0,57 m stålis (kärnis) og 0,05 m sørpeis (stöpis). Istykkelsen var fortsatt 0,62 m da måleprogrammet ble avsluttet den 22. april.

Det var lite snø på isen i hele måleperioden. Ved starten av måleprogrammet var snøtykkelsen ca 0,05 m, og maks snøtykkelse i måleperioden var ca 0,2 m.

4.2. Luft og istemperatur

Utvikling av luft- og istemperaturer i måleperioden er illustrert i vedlegg 2. Temperaturplottet er basert på de mest unøyaktige målesensorene (nøyaktighet på ca 0,5°C). Det er tre plott for istemperatur (en måling ved senter av hver lastcelle, dvs 0,2 m under isoverflaten) og et plot for lufttemperatur.

Det var i alt 6 markerte temperaturstigninger som forårsaket oppbygging av termisk istrykk.

De to første temperaturskiftningene var de mest markerte, begge med temperaturstigning for lufttemperatur fra ca – 25°C til +3-4°C i løpet av omlag 2 døgn. Disse temperaturforløp inntraff i begynnelsen av måleperioden i månedsskiftet januar/februar og i midten av februar. Temperaturstigningen i isen var ved disse hendelser i området -8°C til -2°C respektive -4°C til -2°C

Ved de to påfølgende temperaturstigningene som inntraff i månedsskiftet februar/mars og i midten av mars var temperaturstigningen for lufttemperatur mer moderat, fra ca -15°C til +1-5°C. Temperaturstigningen i isen var ved disse hendelser i området -8°C til -4°C respektive -4°C til -1°C

De to siste temperaturstigningene inntraff i månedsskiftet mars/april og rundt 10. april. Temperaturstigningene i luft var nå fra ca -5°C til + 5-10°C. Temperaturstigningen i isen var ved disse hendelser i området -3°C til -2°C respektive -2°C til -1°C

4.3. Istrykk

Utvikling av istrykket i måleperioden er illustrert i vedlegg 3. Det er tre plott, ett for hver lastcelle, og det er lastcelle markert *A* i vedlegget som er parallell med dammen. Istrykket er oppgitt i KPa.

Den første oppbygging av istrykk gjelder det trykk som oppsto under innfrysing av lastcellene i isen. Erfaringsmessig har dette trykket kommet opp i maks 1 MPa, og under denne innfrysningen kom innfrysningstrykket opp i ca 0,8 MPa.

Etter innfrysing utjevnes trykket langsomt til trykket i isdekket. Den første og andre temperaturstigningen inntraff imidlertid før trykkutjevningen hadde inntruffet, og maks trykk blir derfor korrigert for dette. Istrykkets middelverdi ble målt 0,2 m fra isens overflate. Islasten er beregnet ut fra forutsetningen av at trykkfordelingen mellom isens over- og underkant er lineær med maksverdi på isoverflaten og med nullverdi på undersiden. Omregning fra trykk kPa (kPa=kN/m^2) til islast (kN/m) ved istykkelse h (m) blir:

$$Islast = Istrykk_{overflate} \cdot h/2$$

$$Istrykk_{overflate} = Istrykk_{senter\ lastcelle} \cdot h/(h-0,2)$$

$$Islast = h^2/(h-0,2) \cdot (Istrykk_{senter\ lastcelle})/2$$

Maks opptredende istrykk og islast ved nevnte temperaturstigninger i forrige avsnitt var:

Nr	*Periode*	*Lufttemp.(°C)*	*Istemp.(°C)*	*Istykk. (m)*	*Istrykk (kPa)*	*Islast (kN/m)*
1	januar/februar	-25 - +2	-8 - -2	0,51	320	134
2	midten februar	-27 - +3	-4 - -2	0,52	280	118
3	februar/mars	-16 - +1	-8 - -4	0,57	180	79
4	midten mars	-12 - +5	-4 - -1	0,60	300	135
5	mars/april	-5 - +5	-3 - -2	0,62	200	92
6	midten april	-3 - +10	-2 - -1	0,62	110	50

Maks opptredende islast under måleprogrammet er 135 kN/m, og dette trykk ble oppnådd både i månedsskiftet januar/februar og i midten av mars måned. Dette trykk er over dimensjoneringskriteriet for dammer i norske retningslinjer (120 kN/m inkl lastfaktor). Istrykk opp til dimensjoneringskriteriet ble også oppnådd ved et tilfelle i midten av februar måned.

Temperaturforløp fra slutten av mars måned og ut måleperioden bidrar ikke til oppbygging av store istrykk.

5. Vurderinger

5.1. Måleprogram

Målestedet ved Silvannet var godt egnet for måleprogrammet. Adkomsten var enkel, isforholdene gode og vannstanden konstant under hele måleperioden. Klimaet ved Silvannet innebar også relativt store temperaturfluktuasjoner. Vedlagte oversiktsbilde illustrerer målestedet like etter islegging.

Oversiktsbilde Silvannet

Måleresultatene viser at de største istrykk oppsto tidlig i måleperioden, og måleprogrammet kunne utfra disse forhold sannsynligvis startet tidligere. Utfra utvikling av istykkelser vinteren 98-99 kunne måleprogrammet blitt iverksatt ca 20. desember.

Det var problematisk at det ikke var strømtilførsel til målestedet. Lastceller samt styrings- og registeringsenheter krevde et betydelig strømforbruk og målebrakka måtte oppvarmes. Det var utfra dette nødvendig med lading av batterier samt oppfølging mht oppvarming ca 2 ganger i uka. Dersom det hadde vært strømtilførsel til måleområdet ville det sannsynligvis vært tilstrekkelig med oppfølging eksempelvis 1 gang per måned.

Måling av istrykk fungerte meget bra i hele perioden. Styringssystemet benyttet til lastcellene (Nobel Elektronik BKI 5) var meget stabilt, og hadde intern backup mht strømforsyning. Det samme hadde registreringsenheten type Intab PC-logger 2100. En

bærbar PC ble benyttet til tapping av data fra registreringsenheten, og dataene ble i ettertid konvertert over i Excel regneark samt til analyseprogrammet Mathlab. Dette fungerte bra.

Det var imidlertid problem med fluktuasjoner på de luft- og istemperaturer som var tilkoblet det samme registreringssystem som lastcellene. Det er usikkert hva som forårsaket disse fluktuasjoner.

Separat system for luft-, is- og vanntemperatur var av samme type som benyttes av NVE. Registreringsenheten er av fabrikat Aanderaa. Denne var mer "robust" men mindre brukervennlig enn ovennevnte system.

Værstasjonen som registrerte lufttemperatur og vindhastighet benyttet samme styrings- og lagringssystem som ovennevnte system. Etter strømutkobling ble tidligere registrerte data utilgjengelige.

5.2. Måleresultat istrykk

Man vurderer at homogen is ekspanderer lineært mot temperaturforskjeller (ved minusgrader) som andre krystalline materialer. Ved smeltepunktet gjelder ikke dette grunnet faseomvandling og krymping. I et fast innspent isdekke vil trykk bygges opp når temperaturen stiger. Tilsvarende synker trykket ved avkjøling. Da isens underside hele tiden har en konstant temperatur skjer det også en bøyning etter at sprekker etableres gjennom 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 væromslag 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.

Istrykket avhenger imidlertid i stor grad av isens kvalitet samt hvilke spenningsomlagringer som kan skje når den ekspanderte isen deformeres. Denne prosess er i høyeste grad følsom for trykknivå, tid og temperatur. I de fleste tilfeller kan man regne med et biaksielt trykk med omtrent samme horisontale trykk uavhengig av retning. Det vertikale trykket er ubetydelig. I visse tilfeller, for eksempel nært konstruksjoner kan trykket få en forhøyd verdi i en retning.

Ved å tilpasse beregnede trykkurver til målt istrykk kan man få en vurdering av den naturlige isens temperaturavhengige egenskaper. Lennart Fransson har utviklet en semi-empirisk modell som tar hensyn til isens virkelige inspenningsforhold samt evne til å omlagre og redusere oppbygde trykk. En sammenligning med rent teoretiske resultat kan også utføres som sammenlignigsgrunnlag.

En idealisert modell for termisk istrykk relatert til temperatur bygger på følgende forutsetninger:

1. Temperaturen på isoverflaten øker lineært fra en stasjonært tilstand.

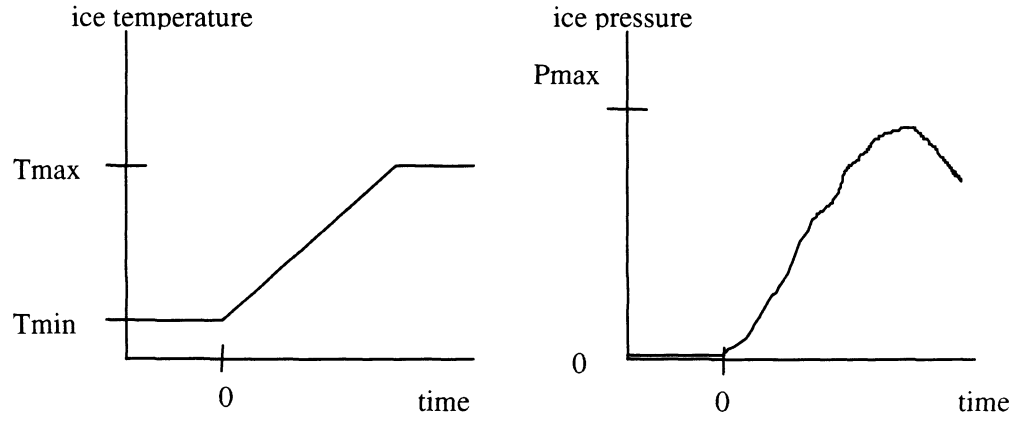
2. Temperaturen varierer bare med dybde. (1-dimensinellt varmestrømning)

3. Isen er homogen (sprekkfri) og fast innspent mot ikke ettergivende konstruksjon/flate.

4. Ekspansjon skjer ved lineær lengdeutvidelse.

6. Tidsavhengige deformasjoner i isen reduserer spenningene.

Denne modellen er illustrert øverst på neste side.



$$dP(T,t) = \alpha E \cdot dT - B \cdot dt \cdot P^n$$

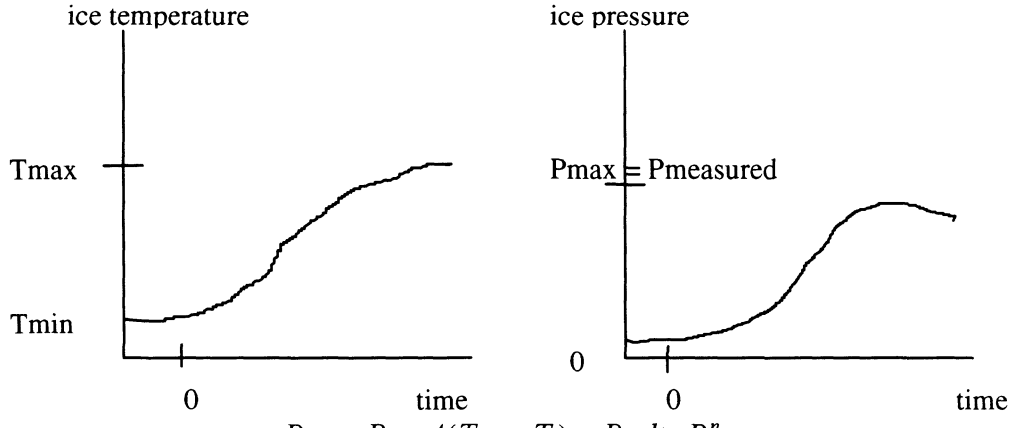
där α, E, B och n är isens materialkonstanter.

Den semi-empiriske modell som er utviklet av Lennart Fransson bygger på følgende forutsetninger:

1. Isens oppmålte temperatur (på samma dybde som istrykket virker) styrer ekspansjonen.

2. Tidsavhengige deformasjoner i isens svake soner forsinker trykkoppbyggingen og reduserer spenningene.

Denne modellen illustreres som følger:



$$P_{i+1} = P_i + A(T_{i+1} - T_i) - B \cdot dt \cdot P_i^n$$

A , B och n är empiriska konstanter.

Ved den semi-empiriske modellen vil det beregnede trykket for en viss temperaturøkning som regel bli lavere enn ved den idealiserte modellen da man tar hensyn til den forsinkede starten av istrykksøkningen. Man kan oversette denne forsinking til den temperaturøkning som kreves for å ekspandere isen så mye at spekker trykkes sammen.

Resultat fra innsetting av temperaturforløp i den semi-empiriske formelen er gjengitt i vedlegg 4. Grunnet fluktuasjoner i oppmålte istemperaturer var det kun mulig å foreta beregninger for de tre første trykkoppbyggingene. For disse forløp gir følgende verdier på materialkonstantene best samsvar mellom formelen og målte verdier:

Trykkoppb. Nr.	***A***	***B***	***n (C i diagram)***
1	100	1	1,8
2	200	1	1,8
3	50	1	2,0

Det er godt samsvar mellom disse verdier og de verdier som er beregnet med utgangspunkt i målinger av termisk istrykk i Sverige.

6. Konklusjon

Valgt målested for måling av termisk istrykk vinteren 98-99 har kombineret med opptredende is- og temperaturforhold under måleperioden gitt grunnlag for oppbygging av relativt store islaster.

Måleprogrammet har fungert godt, men det er behov for å foreta en del korrigeringer før iverksetting av evt oppfølgende målinger.

Målingen av termisk istrykk på dam Silvann vinteren 98-99 har dokumentert opptredende islaster som overskrider dimensjoneringskriteriet for islaster på dammer i Norge.

Vurdering av opptredende islaster mot en semi-empirisk formel utviklet av Lennart Fransson gir godt samsvar med tidligere målinger av termisk istrykk i Sverige.

Som grunnlag for utvikling av bedrede dimensjoneringskriterier mht islaster på dammer i Norge foreslås følgende:

- Nye målinger av termisk istrykk på dammer anbefales. Det anses fordelaktig med minst en til måling på samme målested for å optimalisere måleprosedyrer. I ettertid anses det fordelaktig å foreta målinger på andre konstruksjoner og under andre klimatiske forhold.
- For å dokumentere tidligere opptredende islaster anbefales det å etterregne optredende islaster på skadde dammer.
- Det anses fordelaktig å samle inn oversikt over gjeldende dimensjoneringskriterier og registrerte islaster på damkonstruksjoner i utlandet.

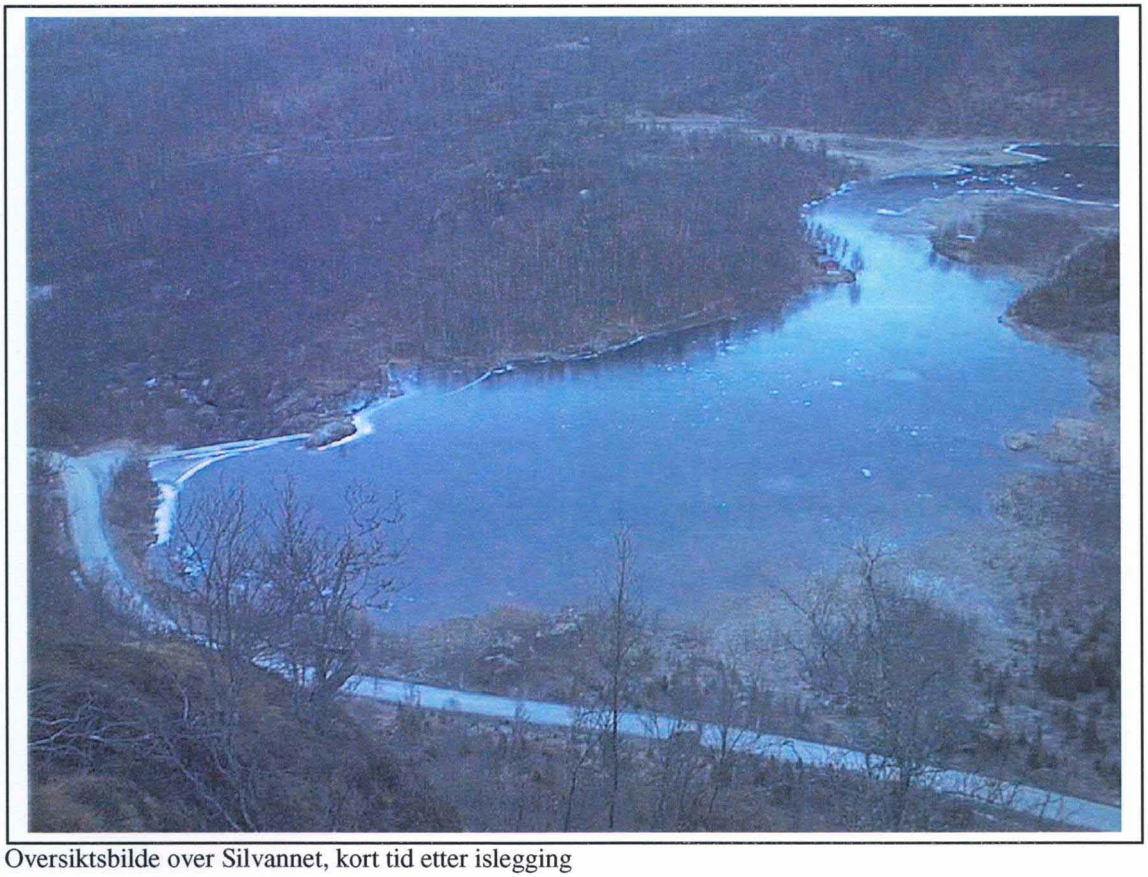
7. Referanser

1. NVE, Forskrifter for dammer, Universitetsforlaget, ISBN 82-00-28105-1, 1982

2. Sanderson, T, Ice Mechanics – Risks to Offshore Structures, Grahamand Trotman Limited, London, ISBN 0 86010 785 X, 1988.

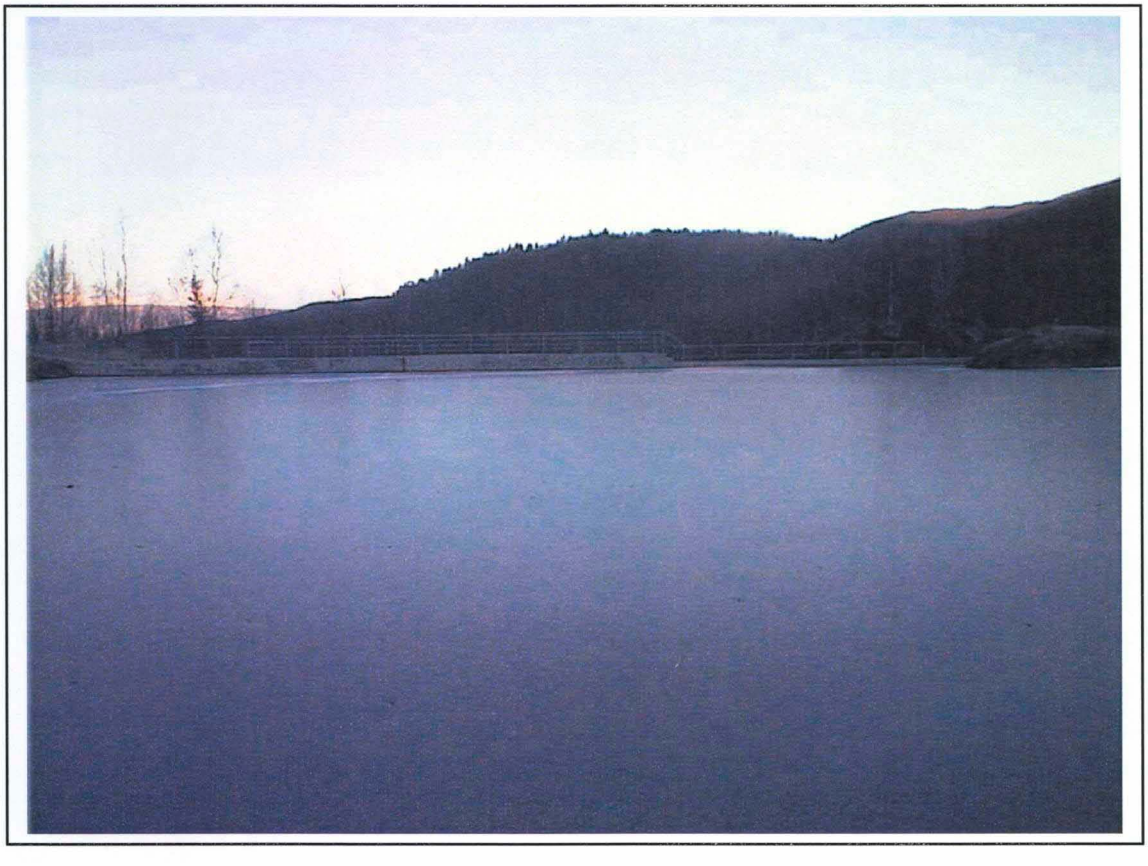
Vedlegg

Vedlegg 1 **BILDER**



Oversiktsbilde over Silvannet, kort tid etter islegging

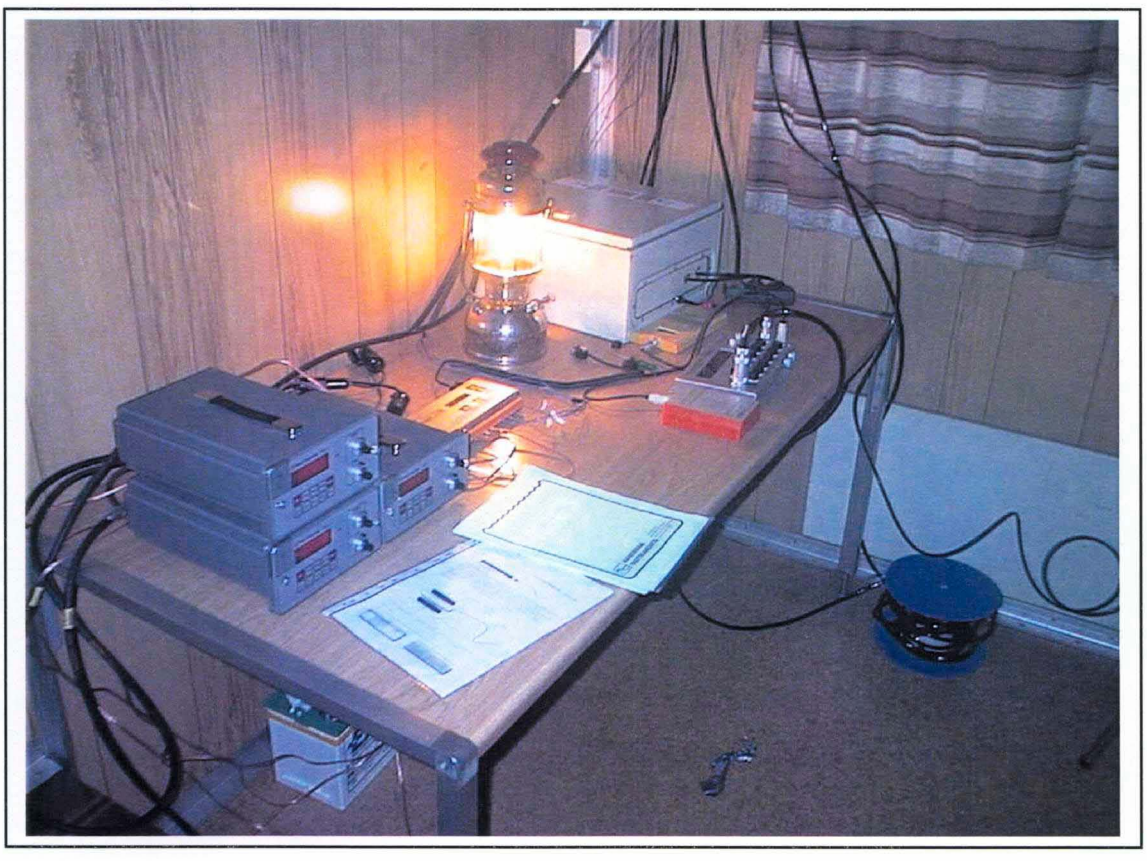
Mot dammen, kort tid etter islegging

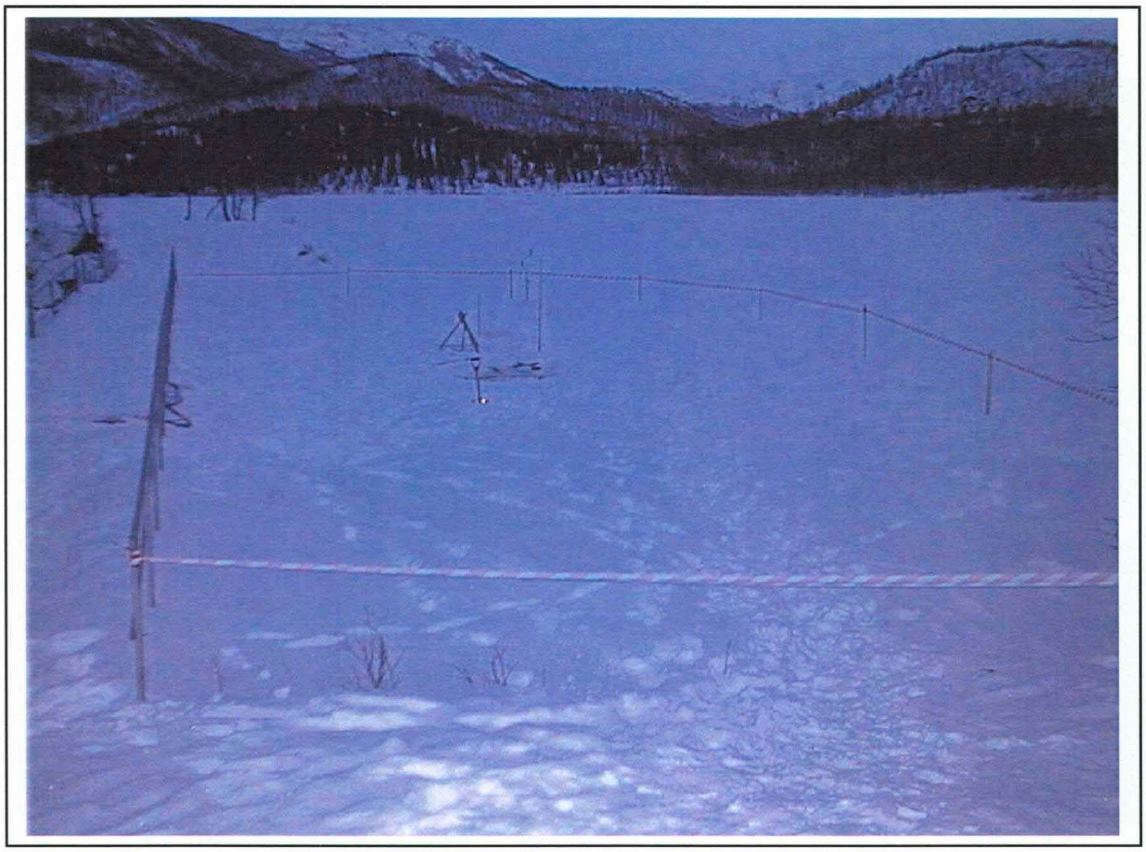


Dam Silvann etter første snøfall

Lastceller og istykkelsesmåler er instalert, målebrakke i bakgrunnen.

Instrumentering i målebrakke

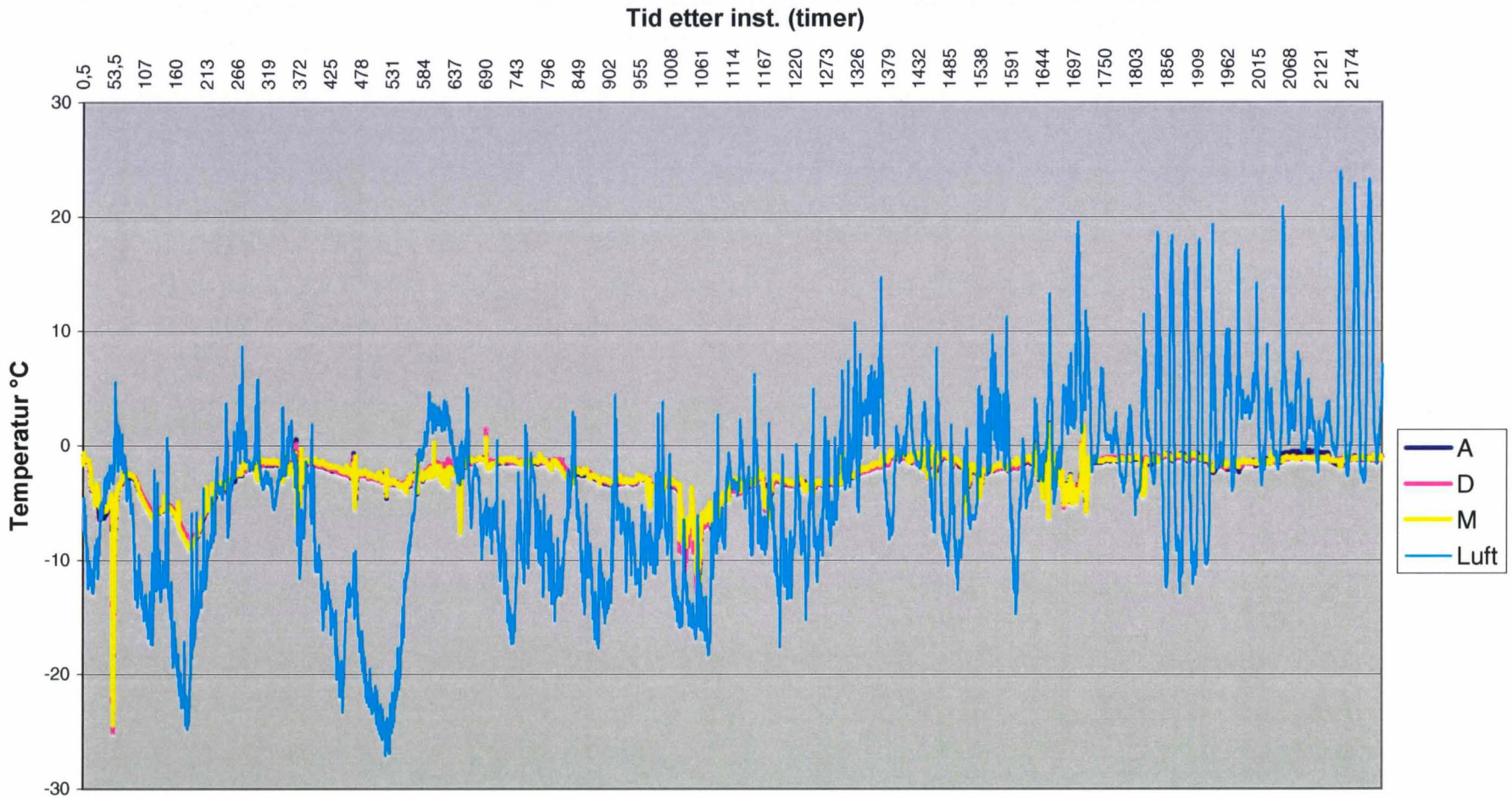




Utstyret er installert og måleprogrammet starter

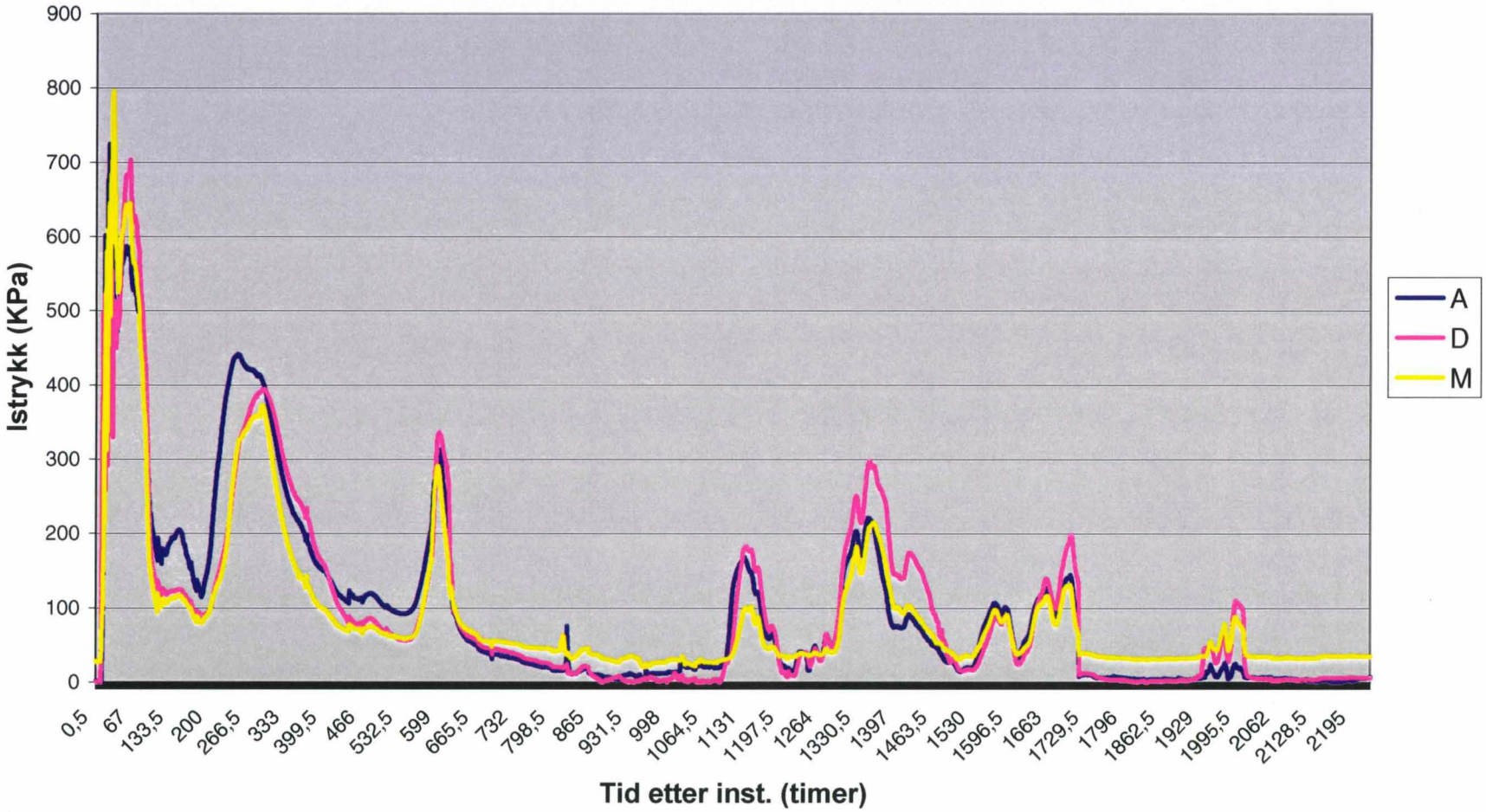
2. Diagram, luft- og istemperatur

Temperatur dam Silvann



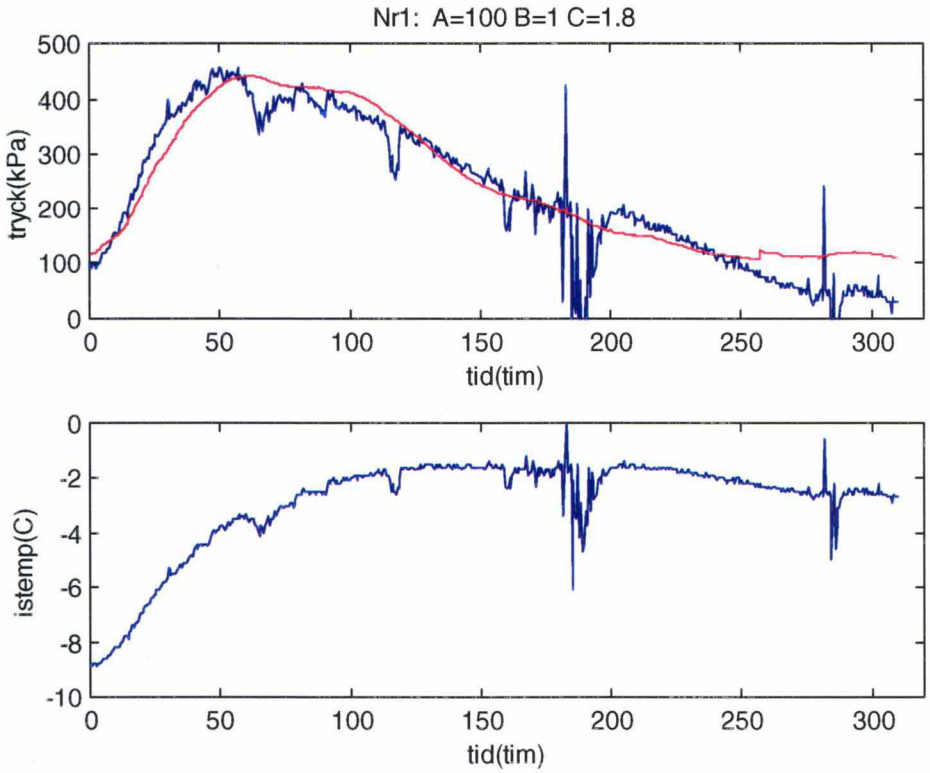
3. Diagram, istrykk

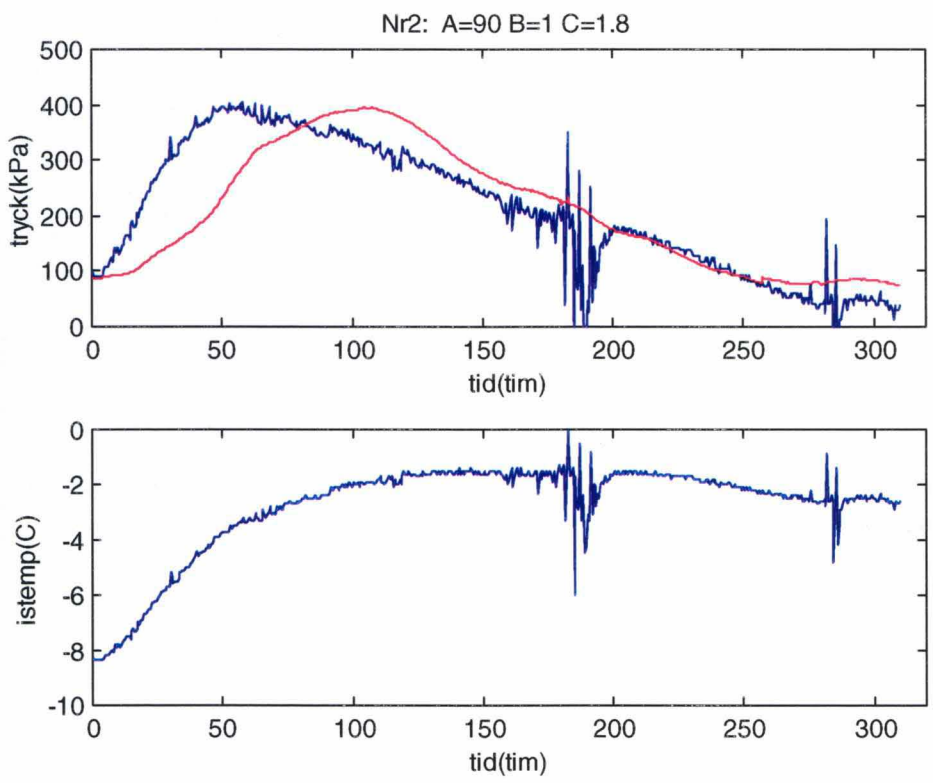
Istrykk dam Silvann

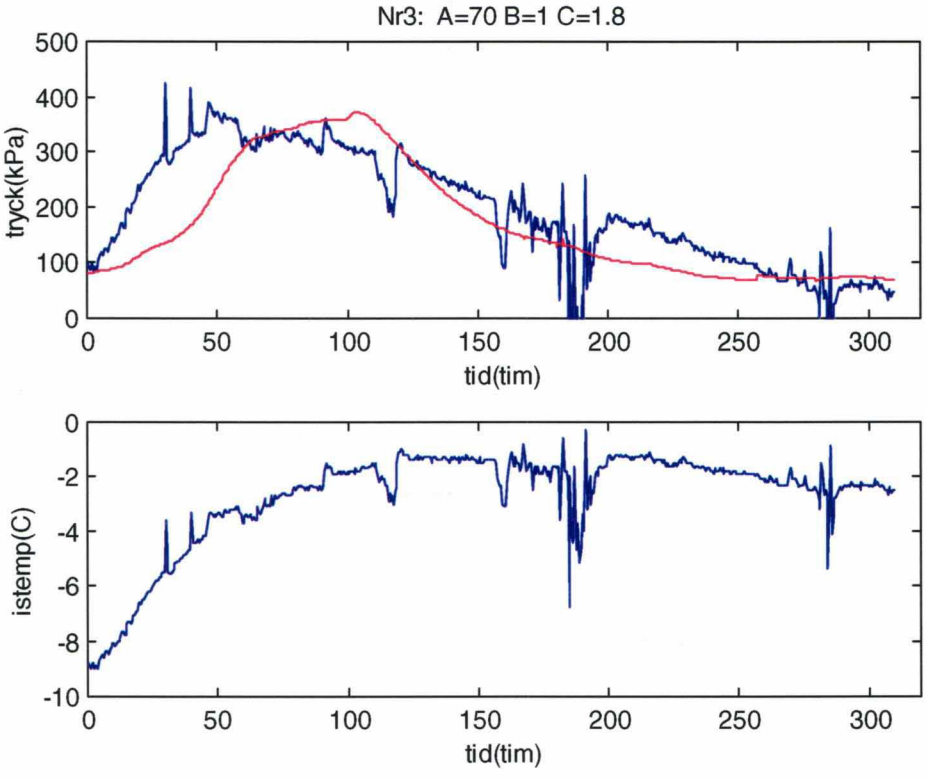


4. Diagrammer, beregnet istrykk utfra istemperatur

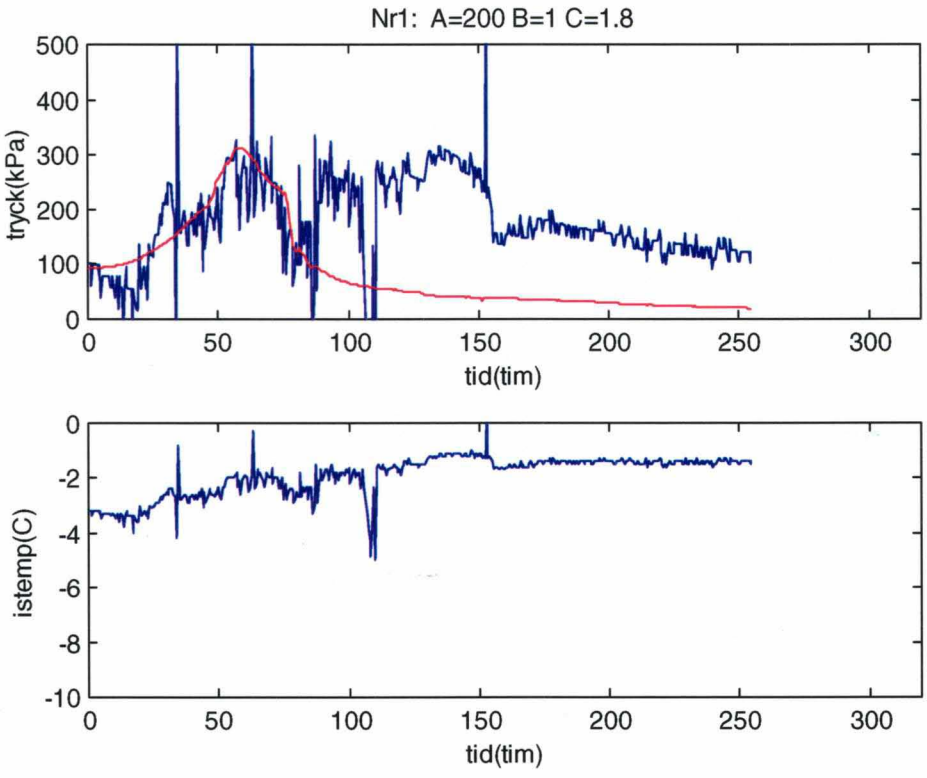
Silvann, beräknade istryck., första tryckhöjningen, 380-1000

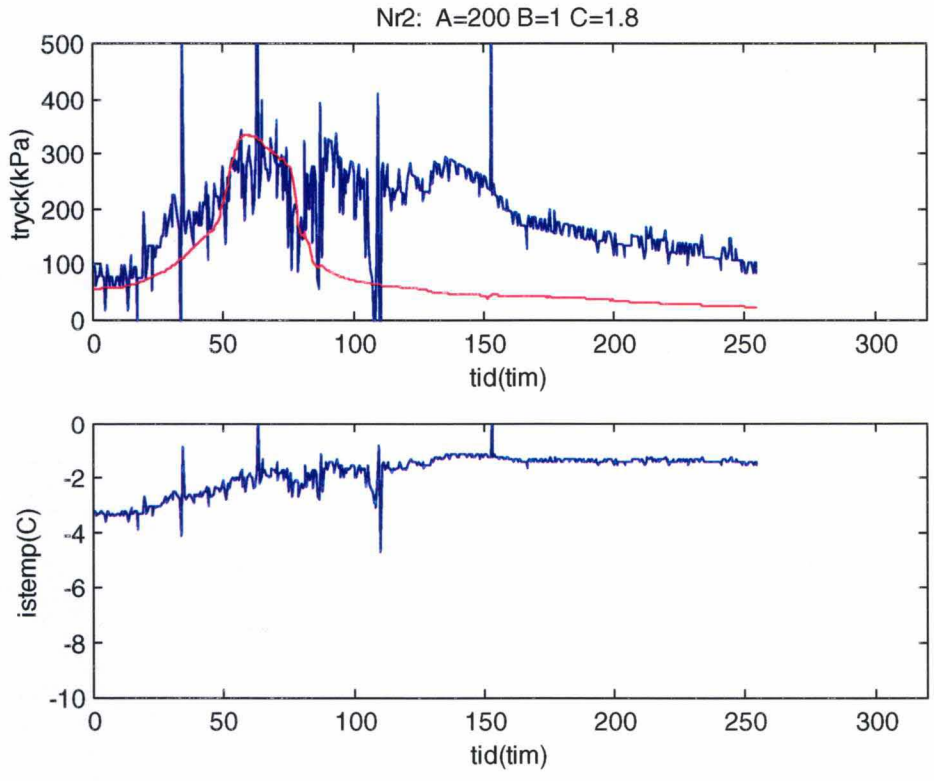


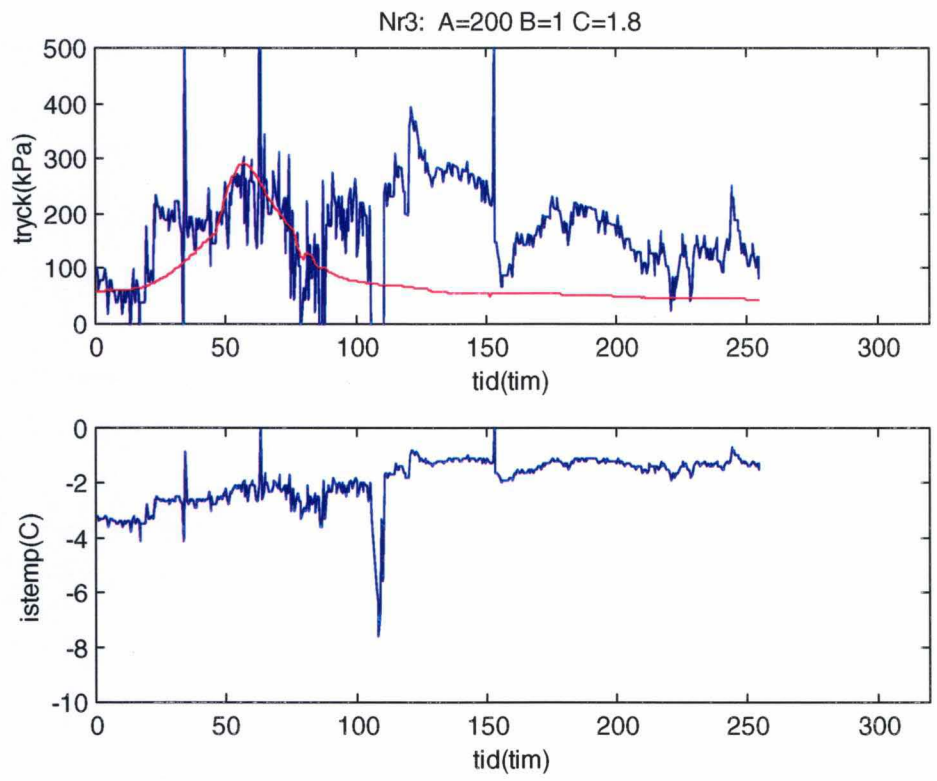




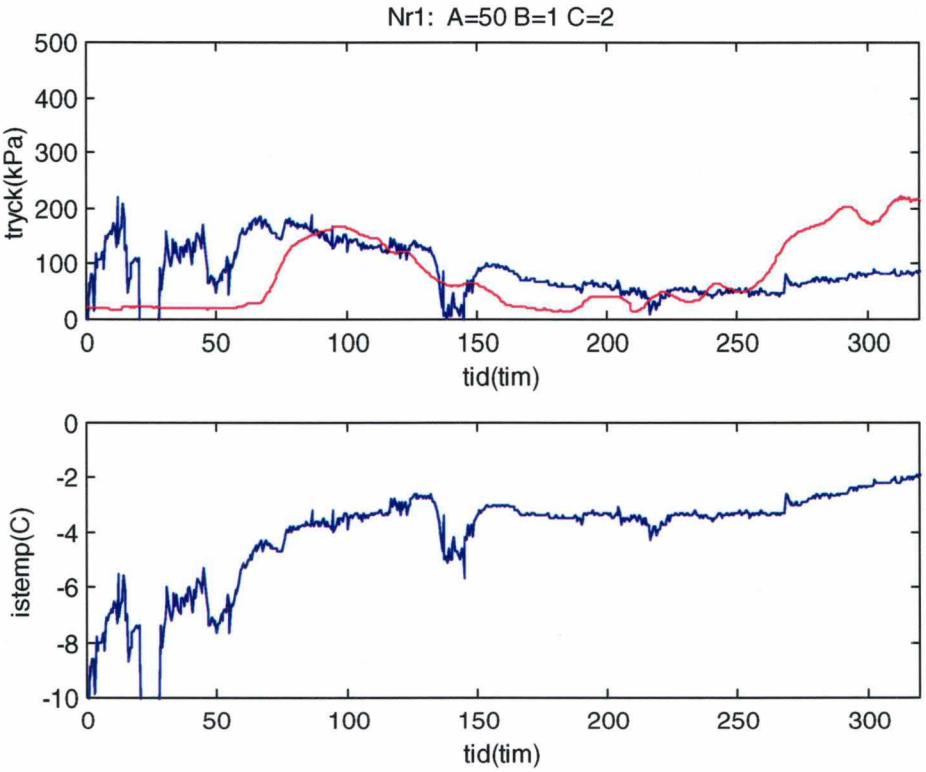
Silvann, beräknade istryck., andra tryckhöjning

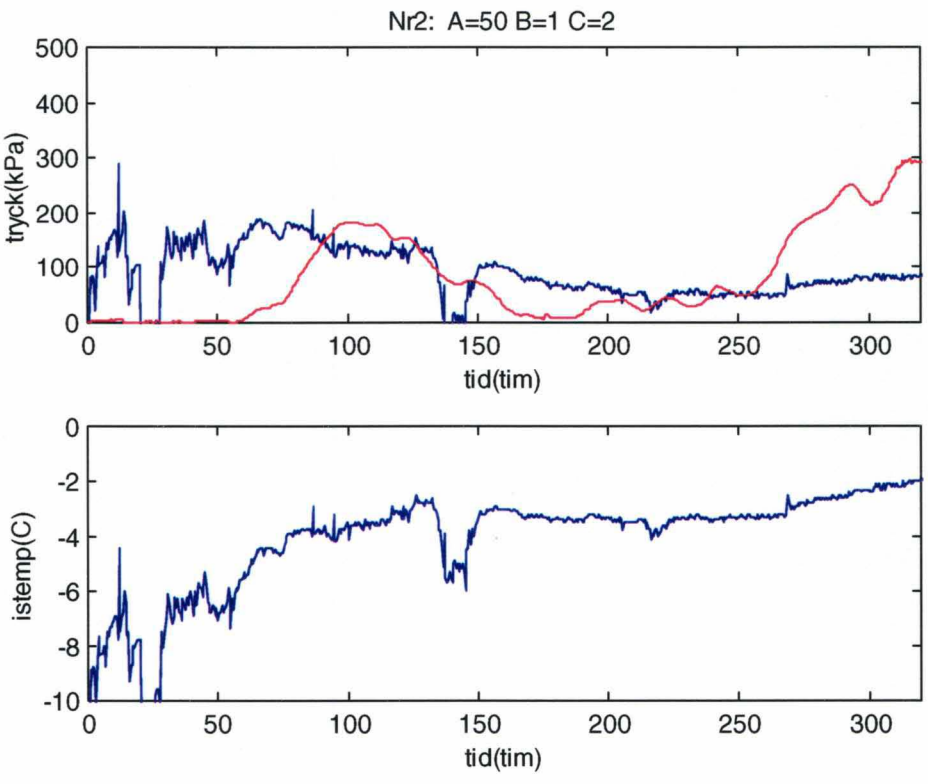


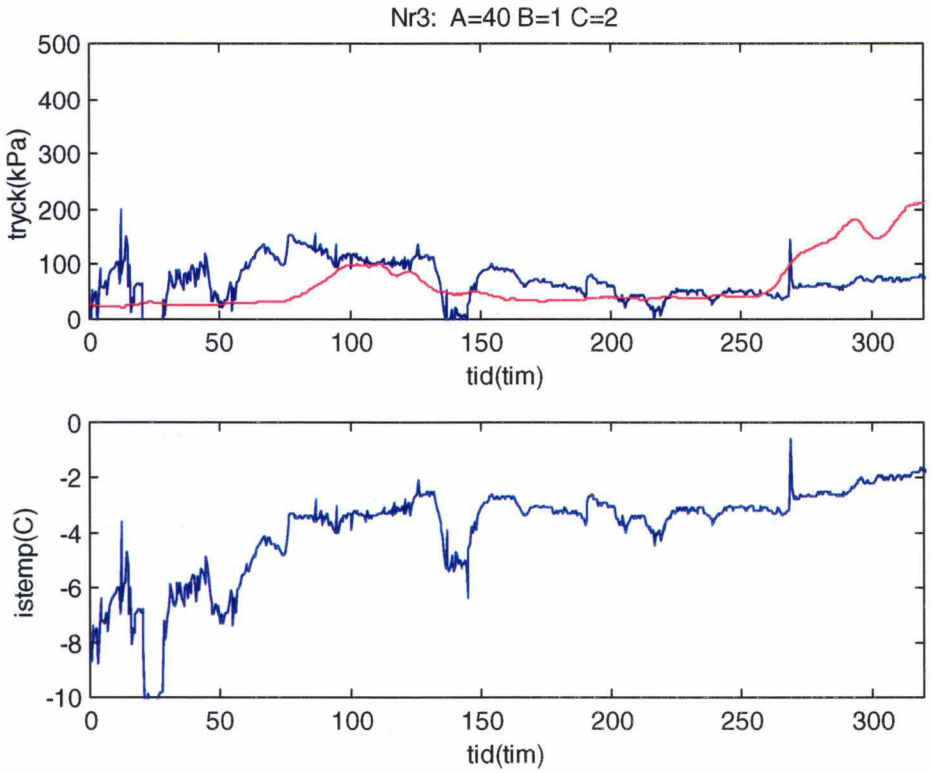

Nr2: A=200 B=1 C=1.8
tryck(kPa)
tid(tim)
istemp(C)
tid(tim)


Nr3: A=200 B=1 C=1.8
tryck(kPa)
tid(tim)
istemp(C)
tid(tim)

Tredje tryckhöjningen 2076-3800






Nr3: A=40 B=1 C=2
tryck(kPa)
500
400
300
200
100
0
0
50
100
150
200
250
300
tid(tim)
istemp(C)
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
50
100
150
200
250
300
tid(tim)

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Publikasjoner i Dokumentserien i1999

Nr. 1 Halfdan Benjaminsen: Georadarundersøkelser på Sundreøya, Ål kommune, Hallingdal

Nr. 2 Bjarne Kjøllmoen: Breundersøkelser på Langfjordjøkelen1998 (24 s.)

Nr. 3 Inger Sætrang (red.): Statistikk over overføringstariffer (nettleie) i Regional- og distribusjonsnettet 1999 (64 s.)

Nr. 4 Eyri Hillgaar Svelland: Nøkkeltall for nettvirksomheten 1994-1997 (29 s.)

Nr. 5 Liss M Andreassen, Gunnar Østrem (red.): Storbresymposiet -50 år med massebalansemålinger (30 s.)

Nr. 6 Kai Fjelstad, Erik Traae: Vannlinjeberegninger for Fjellhamarelva (15 s.)

Nr. 7 Heidi Kannick (red.): Gaulavassdraget. -Forskningsaktiviteter (88 s.)

Nr. 8 Inger Sætrang: Oversikt over vedtak i tvistesaker. Andre halvår 1998. Tariffer og vilkår for overføring av kraft (11 s.)

Nr. 9 Eyri Hillgaar Svelland: Avkastning i nettvirksomheten i 1997 (15 s.)

Nr. 10 Øyvind Armand Høydal, Frode Sandersen: Metoder for å utarbeide faresoner i flomutsatte områder (53 s.)

Nr. 11 Jim Bogen, Truls Erik Bønsnes: Suspensjonstransporten ved målestasjonene i Endalselva og utløpet av Isdammen. Sammensetning, volum og sesongmessige variasjoner (33 s.).

Nr. 12 Lars-Evan Pettersson: Flomberegning for Driva (109.Z) (17 s.)

Nr. 13 Arve M. Tvede: Isforholdene i Eidfjorden etter igangkjøringen av Myster kraftverk (16 s.)

Nr. 14 Thorgeir Holm: Energi frå grunnvatn i berg (21 s.)

Nr. 15 Thomas Skaugen: Analyse av ekstrem arealnedbør for ti prognosefelt (43 s.)

Nr. 16 Roger Sværd: Vannlinjeberegninger for Tønsvikelv (24 s.)

Nr. 17 Ånund Sigurd Kvambekk: Isforhold, temperatur- og saltmålinger i Holandsfjorden og Glomfjorden. Etter åpningen av Svartisen kraftverk (1993-1998) (176 s.)

Nr. 18 Beate Sæther: Vannlinjeberegninger og vurdering av sikringstiltak. Oppdragsrapport.

Nr. 19 Turid-Anne Drageset: Flomberegning for Sokna. Oppdragsrapport (16 s.)

Nr. 20 Eirik Traae: Naturtriangelen. Vannlinjeberegning Sirdalsvatn - Lundevatn. Oppdragsrapport (20 s.)

Nr. 21 Eli K. Øydvin (red.): Revitalisering av NVEs system av høydefastmerker og vannlinjer (51 s.)

Nr 22 Knut Aune Hoseth og Lennart Fransson: Istrykk på dammer. Måleprogram dam Silvann, vinter 98-99 (34 s.)

Norges vassdrags- og energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no