



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Isbanksystem med pulserende og fleksibel varmeveksler (IPFLEX)

- Slutrapport for ELFORSK projekt:
348-043



Titel:

Isbanksystem med pulserende og fleksibel varmeveksler (IPFLEX)

Projektnummer: 348-043.

Udarbejdet for:

Projekt konsortium

Primo Danmark
RØ-KA Industri A/S
Alfa Laval
Teknologisk Institut (projektleder)

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 2
2630 Taastrup
Køle- og Varmepumpeteknik

Marts 2017

Forfattere:

Teknologisk Institut:

Lars Olsen (projektleder)
Claus Madsen (projektleder)
Rasmus Borup

Forsidebilleder.

Øverst: Testopstilling med tvungen konvektion langs testemne.

Nederst: Test af rimdannelse på testemne i luft.

Indholdsfortegnelse

Forord	5
Projektdetaljer	6
Kort beskrivelse af formål og resultater	6
Projektkonklusion og perspektivering	7
1. Introduktion	9
2. Test	13
2.1. Testopstilling.....	13
2.1.1. Princip	14
2.1.2. Brine-anlæg	14
2.1.3. Bassin	14
2.1.4. Afkøling	14
2.1.5. Vandkvalitet	14
2.1.6. Temperaturer	15
2.1.7. Tryk	15
2.2. Testemner	15
3. Testresultater	17
3.1. Forsøg 1 - Frigørelse af is ved ekspansion af testemne 2 og 3	17
3.2. Forsøg 2 – Korte og lange intervaller mellem trykforøgelserne	18
3.3. Forsøg 3 - Isdannelse på testemne 3 og galvaniseret stålrør	20
3.4. Forsøg 4 – Udvidelse af testemner som funktion af trykket	22
3.5. Forsøg 5 - Brudtryk.....	23
3.6. Forsøg 6 - Frigørelse af rimdannelse ved eksponering for luft.....	23
3.7. Forsøg 7 – Frigørelse af is med sukkerholdigt vand	25
3.8. Forsøg 8 - Frigørelse af is med saltholdigt vand	27
3.9. Forsøg 9 – Isopbygning med tvungen/naturlig konvektion i vand.....	28
3.10. Forsøg 10 – Temperaturmåling i iskappe	32
4. Teoretisk vurdering.....	36
4.1. Beregningsmæssige forudsætninger.....	36
5. Konklusion.....	44
6. Referencer.....	46
Bilag 1	47



Forord

Denne rapport er slutrapport for projektet Isbanksystem med pulserende og fleksibel varmeveksler (engelsk titel: **I**ce bank system with **p**ulsating and **f**lexible heat **ex**-changer) (IPFLEX). Målet for projektet er at udvikle et nyt isbanksystem, hvor isdannelsen sker ved hjælp af pulserende, fleksible varmeslanger. Systemet vil både kunne forbedre effektiviteten af isdannelsen, reducere omkostningerne og øge fleksibiliteten af det islager, der dannes i isbanken.

Projektet tager udgangspunkt i anvendelse til mælkekøling, men konceptet vil kunne videreudvikles i andre sammenhænge.

Forskningsprojektet er støttet af ELFORSK under Dansk Energi.
Projektnummeret er 348-043.

Projektet er udført i samarbejde med følgende virksomheder: Primo Danmark, RØ-KA Industri A/S og Alfa Laval.

Følgende personer har deltaget i projektet:

Rolf Christensen, Alfa Laval

Jesper Helveg Thomsen, Primo Danmark

Niels Erik Rudebeck, RØ-KA Industri A/S

Claus Madsen, Teknologisk Institut

Lars Olsen, Teknologisk Institut

Rasmus Borup, Teknologisk Institut

Jóhannes Kristófersson, Teknologisk Institut

René Christiansen, Teknologisk Institut

Karsten Jørgensen Bang, Teknologisk Institut

Projektteamet vil også gerne benytte lejligheden til at takke Jørn Borup, ELFORSK, for værdifuld inspiration.

Projektdetaljer

Projekttitel	Isbanksystem med pulserende og fleksibel varmeveksler. (IPFLEX).
Projektnummer	ELFORSK projektnummer: 348-043.
Indsatsområde	Industriens processer - køling
Projektleder	Teknologisk Institut, Gregersensvej 1, 2630 Taastrup
Projektpartnere	Primo Danmark RØ-KA Industri A/S Alfa Laval
CVR (central business register)	56976116

Kort beskrivelse af formål og resultater

Dansk udgave

I projektet er der udviklet et nyt isbankkoncept. I stedet for et ofte anvendt system, hvor der dannes en iskappe omkring rør, er systemet udviklet således, at isdannelsen sker udvendigt på fleksible slanger. Brinen i disse slanger udsættes for et pulserende tryk, der giver en ekspansion af slangernes overflader, som derved medfører, at isen frigøres fra overfladen og stiger opad i isbanken. Systemets funktion er primært udviklet i forbindelse med mælkekøling, men vil også være velegnet i andre sammenhænge.

Konceptet har en række fordele, og sammenlignes systemet med traditionelle kølebank-systemer, vil effektiviteten kunne forøges, hvis der kan opereres med en højere gennemsnitlig fordampningstemperatur, idet der ikke dannes en tyk iskappe på slangerne. Alternativt vil længden af slanger eller rør kunne reduceres. Omkostningerne vil også kunne reduceres, da der kan anvendes billigere materialer med færre samlinger.

Systemet kan opbygges således, at islagerdelen er uafhængig af selve isproduktionen. Herved kan islageret gøres større, og der kan produceres is i længere tid. Det betyder, at lageret kan indgå i en smart grid sammenhæng eller der kan anvendes en mindre varmepumpe, end hvis isen er fastsiddende på kobberrør som i traditionelle isbank-systemer.

Det forventes, at varmepumpens effektivitet vil kunne forbedres med 5-10 % afhængigt af udformningen. Alternativt vil det være muligt at reducere produktionsomkostningerne på grund af billigere materialer og færre arbejdskrævende samlinger.

Ydeevnen og funktionen ved isdannelse og isafgivelse er hovedsageligt belyst i projektet gennem eksperimentel forskning.

English version

The project has developed a new ice bank concept. Instead of a frequently used system, which forms the ice around the pipes, this system is designed so that the ice formation occurs on the outside of flexible tubes. The brine in these tubes is subjected to a pulsating pressure, which results in an expansion of the surface of the tubes, which leads to a release of the ice from the surface, which then rises in the ice bank. The operation of the system is primarily designed for milk cooling, but it can also be useful in other contexts.

The concept has several advantages, and compared with traditional ice bank systems the cooling efficiency will be increased as the ice bank may be operated with a higher average evaporating temperature than if a thick ice sheet is formed on the pipes. Alternatively, the length of the tubes may be reduced. Moreover, the costs may be lower, since cheaper materials with fewer joints can be applied. The ice storage is operated independently of the ice production, whereby the storage capacity can be made larger, and the ice can be produced for a long period of time so that the storage can be a part of a smart grid solution or used with a smaller heat pump than if the ice is generated and stored on copper pipes.

It is expected that the heat pump efficiency might be improved by 5-10 % due to higher evaporation temperatures in dependence of the design. Production costs are likely to be halved due to cheaper materials and less labour-intensive joints.

The project investigates the performance and function of the ice generation and the ice dissipation is mainly investigated in terms of experimental research.

Projektkonklusion og perspektivering

Konceptet er blevet testet og fundet anvendeligt. En række mulige forbedringer af konceptet er fremkommet under arbejdet, som vil kunne forbedre både funktionen af islageret og de mulige anvendelser.

Den vigtigste konklusion er, at en fleksibel og bevægelig overflade kan generere is uden, at der sker en vedhæftning af isen til overfladen. Ved at tilpasse størrelsen af og intervallerne mellem bevægelserne af overfladen, hvorpå der dannes is, vil det være muligt at designe is med forskellige strukturer og egenskaber.

Resultaterne viser, at når fleksible slanger, der kan frigøre isen ved relativt små istykkelser, sammenlignes med de isbanksystemer, som anvendes i dag, og som opererer med væsentlige permanente istykkelser på rørene, så opnås der så stor en effektivitetsmæssig fordel, at der ved samme rørdimensioner enten kan anvendes mindre rørlængder eller højere temperaturer i rørene. Det skyldes, at den termiske isolans, der er i de fleksible slanger, vil være væsentlig mindre end isolansen af isen, når isopbygningen er sket over et vist antal timer.

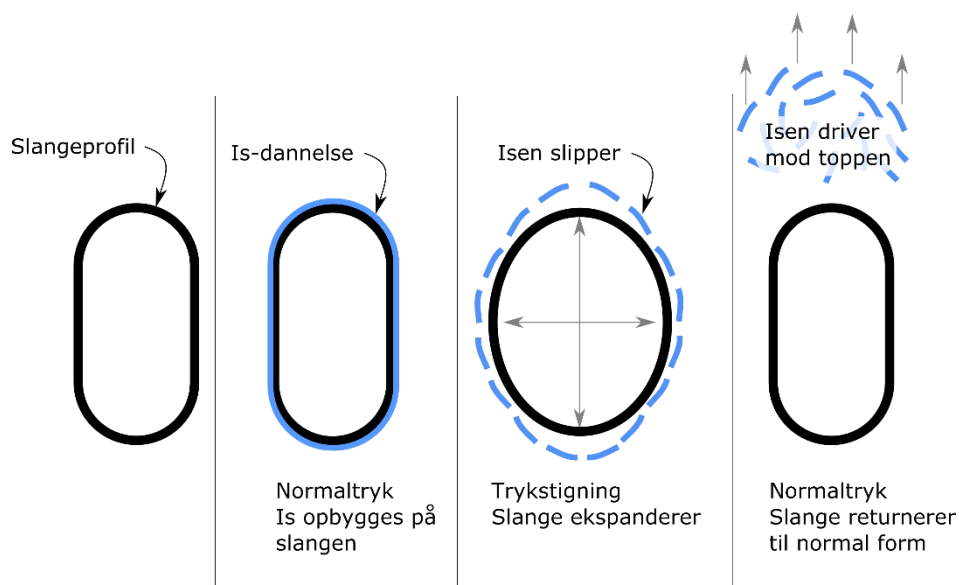
Dette viser, at det i princippet vil være muligt at opbygge isbanksystemer med fleksible slanger til lavere omkostninger, end hvis det opbygges med metalrør. Dette forudsætter dog, at der kan opnås en tilstrækkelig lang levetid af de fleksible slanger, da det kan forventes, at materiale- og lønomkostninger vil være lavere end ved anvendelse af metalrør.

Projektets resultater viser også, at der vil være behov for forskning, udvikling og afklaring af en række problemstillinger vedrørende materialer, udformning og drift af konceptet for at opnå en vellykket introduktion af teknologien på markedet. De udfordringer, der er opstået i løbet af projektet, vil være et solidt udgangspunkt for videre forskning og udvikling af konceptet.

1. Introduktion

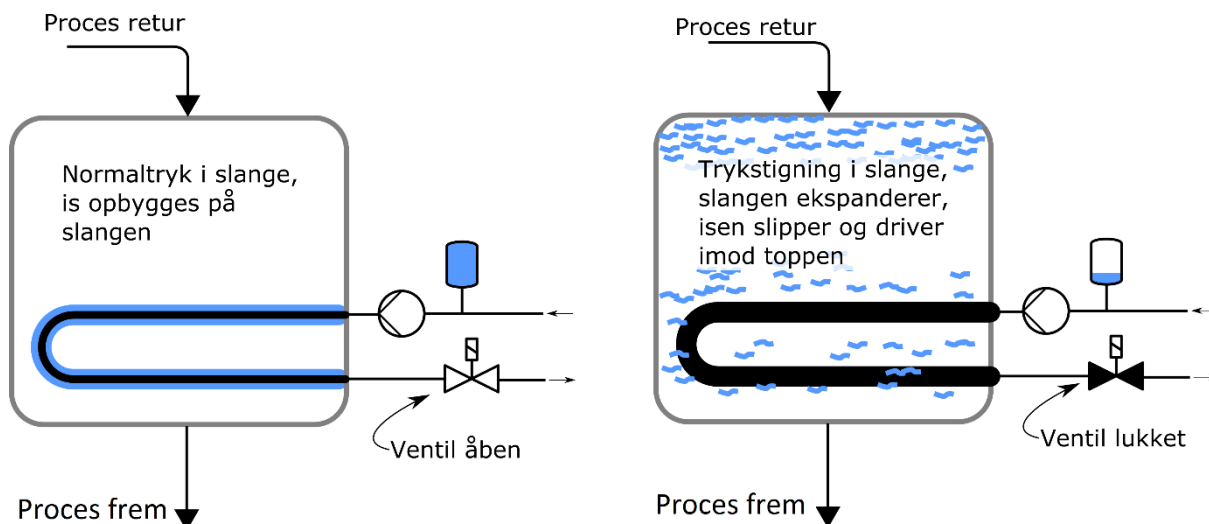
Traditionelle isbanksystemer består af en beholder, som er monteret med et stort antal rør indvendigt. Beholderen er fyldt med vand, og i rørene strømmer kølemiddel, hvormed rørene fungerer som fordamper for køleanlægget. Når isbanken oplades, indfryses vandet i beholderen ved, at der dannes en iskappe omkring rørene. I opladet tilstand er der dels vand ved 0 °C i beholderen og dels is, som sidder på rørene. Ved afladning aftappes vand til proceskøl, og der tilføres varmere (f.eks. 10 °C) returvand, således at isen gradvist smelter. I det foreslåede system er der benyttet fleksible slanger i stedet for metalrør. I slangerne strømmer en brine, som afkøles af køleanlæggets fordamper i form af en separat pladevarmeveksler. En fleksibel slange kan ekspandere ved en trykstigning. Dette tænkes udnyttet til løbende at frigøre isen fra slangerne. Når isen frigøres, flyder den op i toppen af beholderen, som dermed gradvist fyldes op med grødis. Trykstigningen i slangerne kan for eksempel opnås ved at placere en fastindstillet flowventil ved slangernes udløb. Cirkulationspumpens volumenstrøm øges periodisk, og trykket stiger, da ventilen ikke tillader, at et højere flow forlader slangerne. Slangerne ekspanderer pulserende, så isen derved slipper overfladen. Det samme kan opnås med konstant indstilling på cirkulationspumpen og en magnetventil i stedet for en fastindstillet flowventil.

Figur 1 viser en skitse af de fleksible slanger, som illustrerer ovennævnte forløb. Slangernes tværsnitsprofil er en af de parametre, der har betydning for, hvor nemt isen frigives fra slangen. Skitsen viser en oval geometri, men andre geometrier vil være mulige.



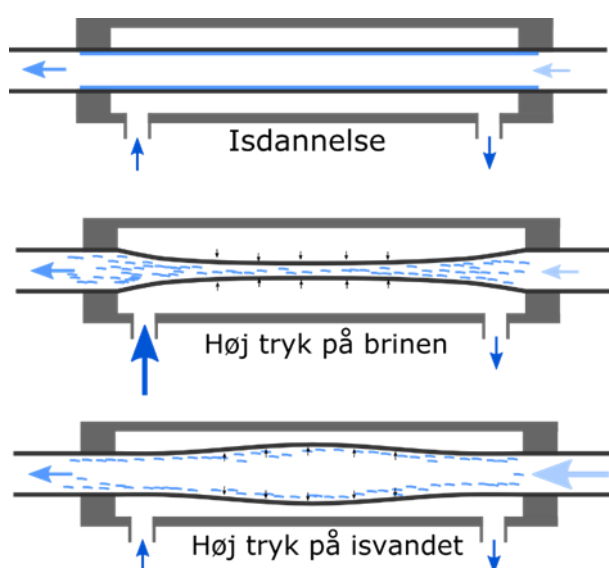
Figur 1: Skitse af fleksible slanger under isdannelse og isfrigørelse.

Processen, som isbanken med de fleksible slanger indgår i, er illustreret i Figur 2. Det varme procesvand tilføres i toppen, og det kolde procesvand aftappes i bunden. Figuren illustrerer også, at isen søger mod toppen af beholderen, og hvorledes det er muligt at pulsere trykket i de fleksible slanger.



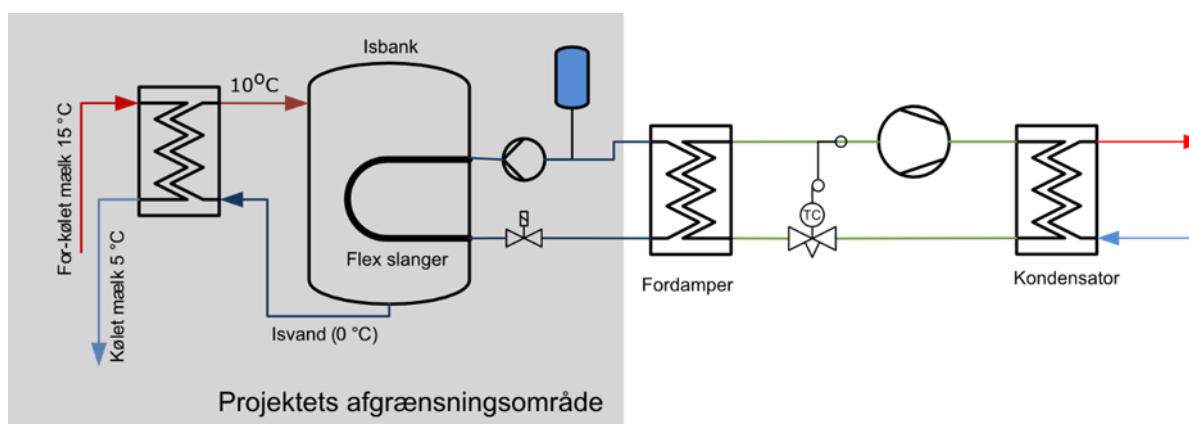
Figur 2: Isdannelses- (tv.) og isfrigørelsesprocessen (th.) vist for isbanksystemet. Køleanlægget er ikke vist på figuren.

Figur 3 viser et alternativ til dannelse af isen uden på slangerne ved hjælp af opdrift, som illustreret i Figur 1. Figur 3 viser et forceret flow til hurtigt at fjerne den is, der er frigjort fra overfladen, samtidig med at trykket i den fleksible slange og eventuelt brinen varierer. I dette tilfælde skal slangerne være koaksiale med brine på ydersiden og vand på indersiden.



Figur 3: Isdannelse i koaksial-slange. Vand fra isbanken pumpes gennem den inderste slange, og brinen løber på ydersiden. Isdannelsen sker således på indersiden af den inderste slange. Hvis brinetrykket hæves, komprimeres den inderste slange, og isen slipper. Alternativt kan vandtrykket hæves, så slangen ekspanderer.

Figur 4 viser, hvordan isbanken kan indpasses i et mælkekøleanlæg. Mælken fra køerne forkøles til 15 °C, hvorefter den bliver yderligere kølet til 5 °C, således at returvandet fra denne køling har en temperatur på 10 °C. Figur 4 viser, at det vand, der tilføres isbanken, derefter nedkøles fra 10 °C til 0 °C.



Figur 4: Isbanken indpasset i et mælkekøleanlæg med forkøling af returvand inden tanken. Projektets afgrænsningsområde er vist i det grå felt.

Det foreslåede system har en række fordele både med hensyn til effektivitet, økonomi og ressourcer. Effektiviteten vil kunne blive høj, da kølekredsens fordampertemperatur kan blive højere end i det traditionelle system. Dette skyldes bl.a. en effektiv pladevarmeveksler mellem kølekreds og brinekreds, og at istykkelsen uden på de fleksible slanger vil være minimal samt at der vil være et relativt stort overfladeareal af de fleksible slanger. Istykkelsen på de fleksible slanger vil variere mellem 0 og en relativt lille istykkelse, mens der i traditionelle isbanksystemer normalt vil være en vis tykkelse af isen, før der foretages en ny genopbygning af isen. I det traditionelle system har anvendelsen af rør og loddearbejdet medført, at det udvendige overfladeareal af rørene har været begrænset.

Materialevalget med fleksible slanger i stedet for rør, som skal loddes, medfører, at produktionsomkostningerne kan forventes reduceret på grund af de billigere materialer og de færre samlinger.

Designet og den større effektivitet medfører også, at lagringsvolumenet vil kunne være mindre. Dette skyldes, at grødis har et markant større overfladeareal end ved traditionelle iskapper på rør. Dette medfører, at isen kan smeltes hurtigere, og dermed kan det nødvendige vandvolumen reduceres i forhold til isvolumenet. Det reducerede volumen har også betydning for produktionsomkostningerne og vægten, hvilket kan have betydning f.eks. ved maritimt brug.

Det foreslåede koncept medfører også, at chilleren vil have en betydelig mindre fyldning af kølemiddel end i det traditionelle system, hvor der anvendes direkte ekspansion i rørene. Afhængigt af valg af kølemiddel vil en mindre fyldning have væsentlig betydning for både miljøet og økonomien.

Der er flere anvendelsesmuligheder for systemet, f.eks. isproduktion i forbindelse med fiskeri og lignende, men i første omgang fokuseres der på mælkekølesystemer hos den enkelte landmand.

Det vil også være muligt at anvende systemet i forbindelse med smart grid. Hvis isbanken er designet til en døgncyklus, vil der være en stor fleksibilitet med hensyn til, hvornår isen produceres, og dermed også hvornår elforbruget sker.

Udvikling af det foreslåede system kræver inddragelse af en række teknisk videnskabelige discipliner:

- Der er behov for at tage hensyn til overfladen på de fleksible slanger.
- Der skal defineres krav og vælges en overflade og et materiale, der er velegnet.
- Der kan være behov for at udvikle en speciel geometri for at opnå god fleksibilitet. Denne kan gøres mere eller mindre avanceret afhængigt af bl.a. funktionsegenskaber, holdbarhed og produktionsomkostninger.

Varmeoverføringen vil være kompleks, da der vil være en tofasen isdannelseproces, og den dannede is skal frigøres og strømme opad. Der vil strømme nyt vand til der, hvor isen er blevet frigjort. Denne proces er vanskelig at regne på, og det er derfor vigtigt også at teste denne proces eksperimentelt.

I projektet har det været ønsket at starte på afklaringen af en række vigtige spørgsmål for at kunne udvikle og designe en isbank med fleksible slanger:

- Hvilke temperaturforhold kan processen arbejde under?
- Hvordan er samspillet mellem vedhæftning af is til slanger?
- Hvor stor bevægelse af slangerne er nødvendig for at få isen til at slippe?
- Hvilken hastighed af pulsationerne er mest hensigtsmæssig?
- Hvilken varmeovergang kan der opnås ved processen?
- Hvor effektivt vil isbanken dermed være?
- Hvor stor en andel af beholderen kan fyldes med is, uden at det giver problemer med tilstopning?

2. Test

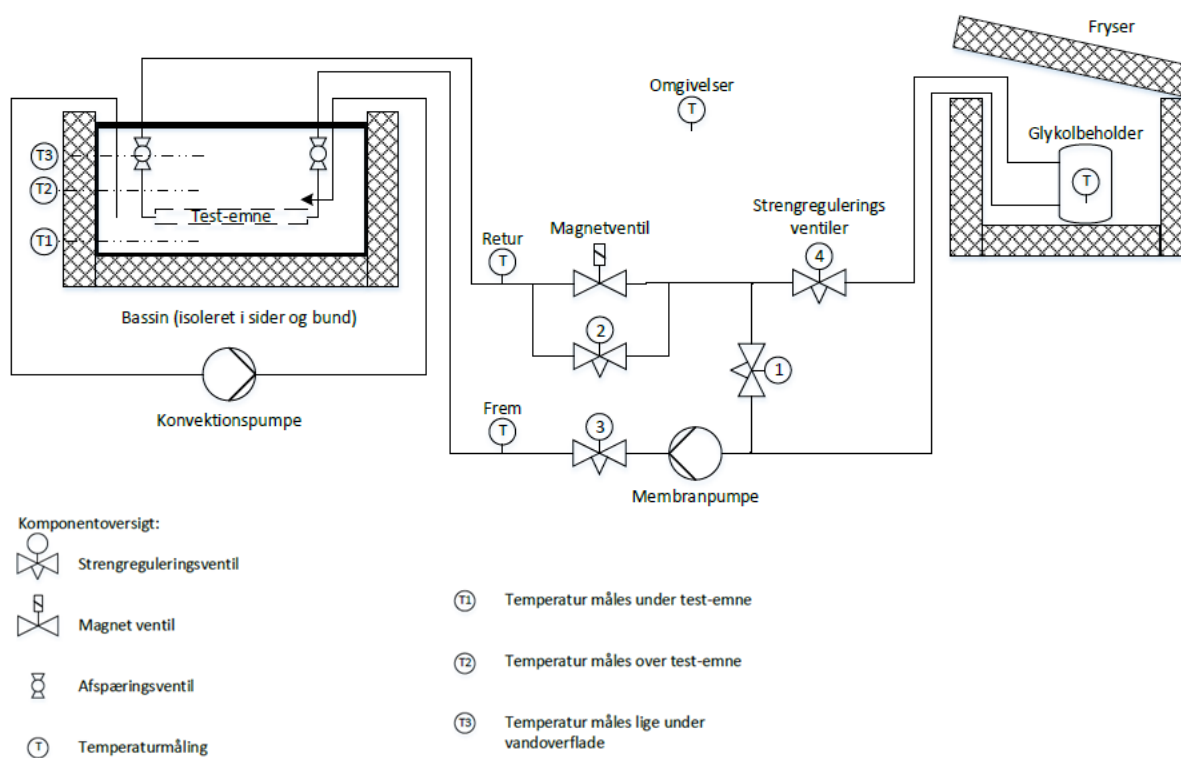
Studier har vist, at vedhæftningen mellem is og den overflade, hvorpå isen opbygges, er kraftig i forhold til isens opdrift. Der er også en afhængighed af overfladens overfladespænding, idet der ved nogle plastoverflader er en meget mindre vedhæftning end ved metaloverflader. /1/. Det er også set, at vedhæftningen af is til en overflade er stort set lineær afhængig af istemperaturen, hvor denne er under 0 °C. /2/.

For at undersøge muligheden for at frigøre is fra overflader, bygges der en opstilling med det formål at undersøge om den opbyggede is på forskellige testemner kan frigøres ved at øge trykket og dermed ekspandere testemnet som vist i figur 1. Ydermere er der følgende delformål med opstillingen:

- Undersøge isopbygningen og isdannelsen ved at ændre forskellige forhold som:
 - Varmeovergang (ved hjælp af konvektion) i vand.
 - Tilførsel af sukker til omkringliggende vand.
 - Tilførsel af salt til omkringliggende vand.
 - Danne is (rim) på overflader ved hjælp af fugt fra luften i stedet for neddykning i vand.

2.1. Testopstilling

Figur 5 viser testopstillingen.



Figur 5: Oversigt over testopstilling.

2.1.1. Princip

Et testemne med en overflade, der skal testes, nedsænkes i et bassin med vand ved frysepunktet, se Figur 5: Oversigt over testopstilling. I testemnet cirkulerer en brine ved temperaturer væsentlig lavere end vands frysepunkt. Når isen er opbygget, bevæges overfladen, og isafgivelsen observeres. Testemnet er formet som en slange, hvori brinen cirkulerer. Anlægget, der driver brinen, er konstrueret således, at trykket kan øges i testemnet, og det vil derfor ekspandere. Testemnet monteres i en manifold, der ud over testemnet også har et galvaniseret stålrør påmonteret. Dette muliggør sammenligning af isopbygningen på stål kontra plast/gummi materialer, der anvendes som testemnerne.

2.1.2. Brine-anlæg

Anlægget i Figur 5: Oversigt over testopstilling er et halvåbent system, som virker ved, at membranpumpen pumper det nedkølede glykol rundt i systemet. Strengreguleringsventil 1 bruges til at styre fremløbstemperaturen til testemnet. Når magnetventilen lukkes, vil trykket bygges op i testemnet, indtil modtrykket fra elasticiteten i testemnet er stor nok til at presse flowet igennem strengreguleringsventil 2. Det er muligt at styre lukningen af magnetventilen ved hjælp af en programmérbar styring og en aktuator på ventilen. Strengreguleringsventil 3 bruges til at styre flowet i testemnet.

2.1.3. Bassin

Isdannelsen foregår i et vandfyldt bassin (akvarie) på 54 liter, som er placeret nede i en plastbeholder. Der er isoleret med mineraluld (80 mm) mellem akvarie og plastbeholder for at mindske varmetilførslen til akvariet. Isdannelsen kan iagttages fra toppen af akvariet. Temperaturen i bassinet holdes tæt på 0 °C, således at der kan dannes is på overflader med en lavere temperatur. Temperaturen i vandet holdes nede ved hjælp af fryselegemer, der placeres i kanten af bassinet. Fryselegemerne opbevares i fryseren om natten for at opnå en lav starttemperatur. Dimensionen af bassinet er ca. 50 x 30 x 30 cm. Der fyldes som regel 30 liter vand i bassinet.

2.1.4. Afkøling

Som kuldager er der anvendt 70 liter brine (ethylene-glykolblanding 40 % glykol & 60 % vand), som er anbragt i en beholder. Beholderen er forbundet med rørstudser på siden, én tæt ved bunden og én tæt på toppen. Beholderen er anbragt i en dybfryser, der nedkøles til ca. -25/-30 °C. Ved test tappes der glykol fra bunden, og der returneres glykol til toppen af beholderen.

2.1.5. Vandkvalitet

Ved test er der primært anvendt *brugsvand* (drikkevand) fra HTK Forsyning A/S. Vandet er på hjemmesiden /3/ opgivet til at have en hårdhed på mellem 19 og 22 °dH, hvilket svarer til hårdt vand. Ifølge SBI-anvisning 236 /4/ svarer 1 °dH til et indhold på 10 mg/liter CaO (kalciumoxid) eller 7,2 mg/liter MgO (magnesiumoxid).

2.1.6. Temperaturer

Vandets temperaturer i bassinet måles over og under testemnet, uden at følerne er placeret direkte over testemnet. Temperaturen måles ligeledes ca. 1 cm under vandoverfladen, hvorved det vil være muligt at bestemme den lodrette temperaturgradient i vandet.

Herudover måles fremløbs- og returtemperaturen for brinen. Middelttemperaturen benyttes til at bestemme brine temperaturen i testemnet, og samtidig måles temperaturen i brinebeholderen for derved at kunne iagttage, om der er tilstrækkelig kulde i beholderen til at udføre tests.

2.1.7. Tryk

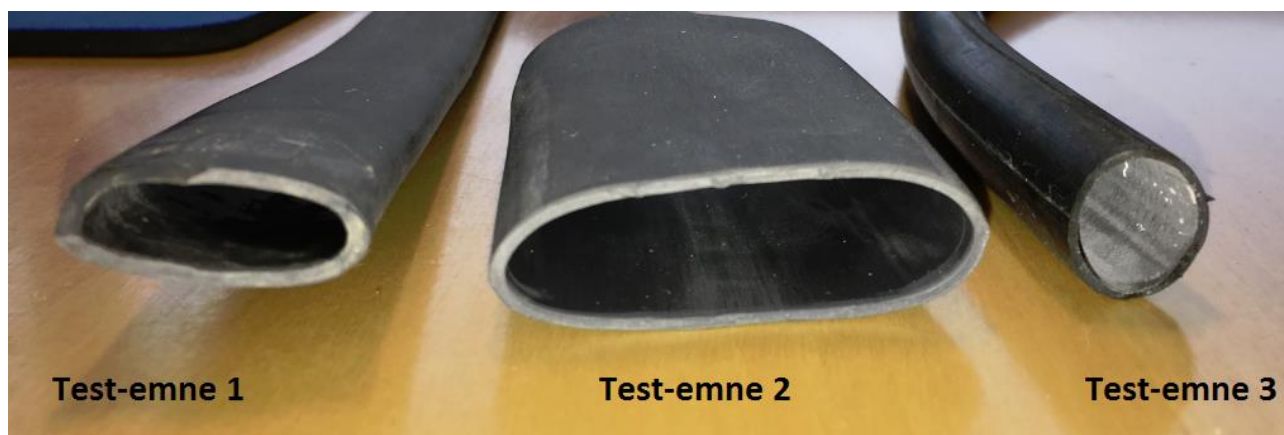
Der er monteret manometre til indikativ måling af, hvor stort et tryk der er i testemnet. Det permanente tryk benyttes til at styre tilførsel og fjernelse af brine til flexslangen. Det er vigtigt at kunne aflæse det maksimale tryk, når gennemstrømningen af brine i slangen stoppes, og trykket opbygges. Opstår der for store tryk, vil det kunne give anledning til permanente plastiske deformationer af slangen og i værste fald brud på slangen. Trykstigningerne i testemnerne ved isafgivelse er normalt i størrelsesordenen 1-2 bar. Membranpumpen kan dog levere et tryk svarende til 10 bar.

2.2. Testemner

Der er udvalgt tre testemner/flexslanger, som kunne tænkes at være anvendelige til at frigøre is fra, idet de har en fleksibel karakteristisk. De parametre, som der er taget hensyn til ved udvælgelsen, er: tykkelse af materialet, forventet varmeledningsevne, fleksibilitet, elasticitet og bearbejdelse. Fra litteraturen ses der, at vedhæftningen mellem is og overflade kan være meget forskellig. Det er valgt at starte med overflader, der i denne henseende ikke har en speciel lille vedhæftning for at kunne se, om denne effekt har en væsentlig betydning.

Slangelængden er 25 cm. Slangen monteres stramt i fastholdte nippel-ender i 1/2" galvaniseret vandrør. Tætheden sikres ved spændebånd mellem slange og nippelrør. Ved en trykforøgelse i slangen opstår der både en forøgelse af diameteren og af slangens længde.

De tre testemner/flexslanger ses i Figur 6: Tværsnit af de tre testemner, og deres karakteristika er beskrevet efterfølgende.



Figur 6: Tværsnit af de tre testemner.

Testemne 1

Dimensioner: 26,6 mm x 11,6 mm x 1,6 mm (højde x bredde x materialetykkelse)

Karakteristika: Forholdsvist stift materiale. Bevæger sig i høj grad tilbage til oprindelig tværsnitsgeometri ved påvirkning. Det er kun lige akkurat muligt ved håndkraft at trække slangen lidt længere.

Materialeinfo: Der henvises til PRIMO DANMARK A/S Tegning no. 8355 – Projekt: 71112211

Testemne 2

Dimensioner: 51 mm x 16,6 mm x 1,6 mm (højde x bredde x materialetykkelse)

Karakteristika: Ligeså stift som testemne 1 i længderetningen, dog er det lettere at påvirke tværsnitsgeometrien grundet det større forhold mellem diameter og godstykkelser.

Materialeinfo: Der henvises til PRIMO DANMARK A/S Tegning no. 8356 – Projekt: 71112212

Testemne 3 (Flexslange)

Dimensioner: 15 mm x 1 mm (diameter x materialetykkelse).

Karakteristika: Elastisk sort materiale af butyl gummi med lange støbekanter. Let at udvide ved håndkraft.

Stålrør

Dimensioner: 21,3 mm x 2,6 mm (diameter x materialetykkelse).

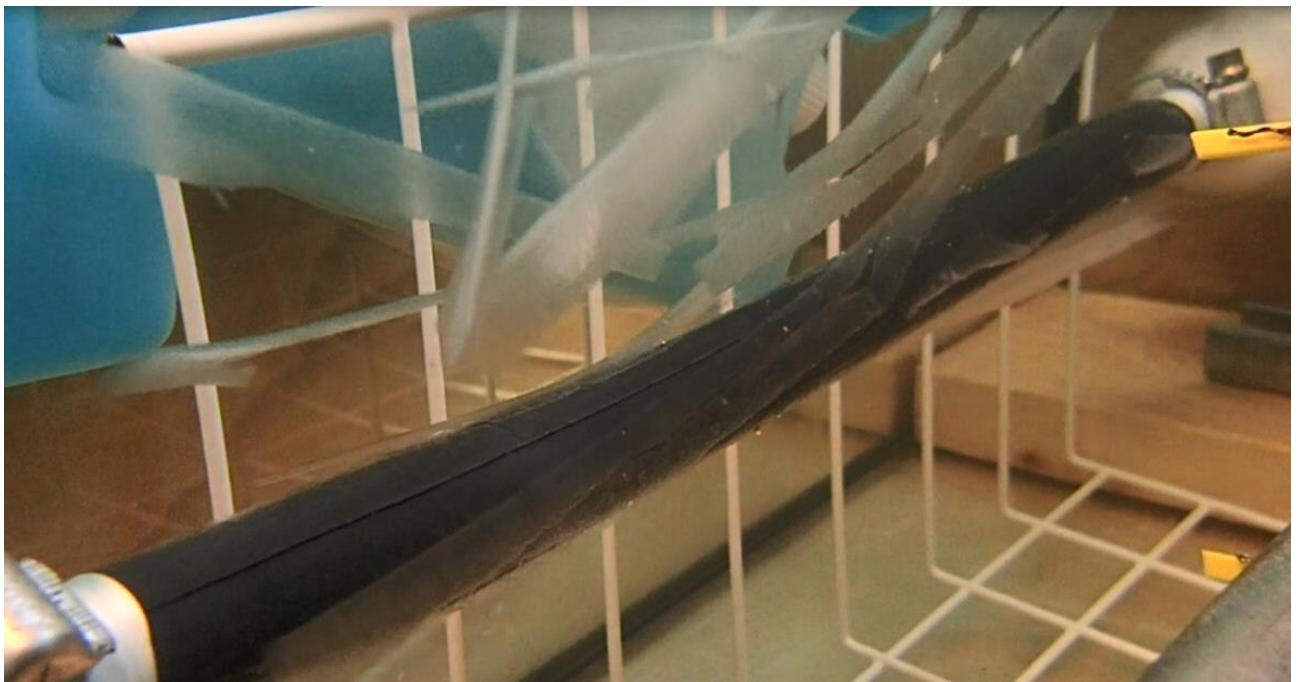
Karakteristika: ½" galvaniseret stålrør.

3. Testresultater

3.1. Forsøg 1 - Frigørelse af is ved ekspansion af testemne 2 og 3

Der blev udført to undersøgelser med henholdsvis testemne 2 og testemne 3. Undersøgelsens resultat er vist på billederne af de to forløb (Figur 7 og 8).

Testemne 3



Figur 7: Afgivelse af is fra testemne 3.

Det ses, at isen har sluppet slangen og er ved at flyde op til overfladen. Istykkelsen er omkring 1 mm, og fremløbstemperaturen i brinen er -17°C .

Testemne 1 har også været monteret på forsøgsopstillingen, og konklusionen var her den samme som ved testemne 2 (se nedenfor). Udvidelsen af testemne 1 og 2 er ikke stor nok til, at isen rives løs og flyder op til overfladen. Resten af forsøgene er derfor udført med testemne 3, som viste de bedste egenskaber til at frigøre isen ved hjælp af en ekspansion.

Testemne 2



Billede taget inden trykket øges. Det bemærkes, at der dannes en lidt anden type is end på testemne 3. Det ser ud til, at iskrystallerne er større, og isen er mere porøs. Ligeledes ses det, at modtrykket, der opstår i det relativ korte rørstykke efter testemnet, er tilstrækkeligt til at danne mere eller mindre cirkulært tværsnit i testemne 2.

Billede, hvor ekspansionen af testemne 2 er maksimal. Det ses, at isen ikke bliver frigjort af udvidelsen, men der dannes dog en revne i isen, indikeret til højre på billedet (rød pil).

Figur 8: Afgivelse af is fra testemne 2.

3.2. Forsøg 2 – Korte og lange intervaller mellem trykforøgelserne

For at øge trykket i testemnerne lukkes der for flowet ved hjælp af en magnetventil. Magnetventilen aktiveres af en spole, som er styret af en såkaldt Arduino PLC. Derved kan magnetventilen styres ved at programmere Arduinoen, så der fremkommer forskellige intervallængder mellem start og stop af flowet. Et interval kunne være tre minutter, hvor ventilen er åben (isen bygges op på testemnet), og to sekunder, hvor ventilen er lukket (trykket bygges op i testemnet, som ekspanderer, og isen skydes af). Herefter gentages sekvensen.

Der er foretaget forsøg med forskellige tidsintervaller for isopbygning. De korte intervaller er på 15 sekunder, og de lange intervaller er på tre minutter. For både de korte og de lange intervaller lukkes magnetventilen i to sekunder. Resultatet for de korte intervaller ses i Figur 9, og Figur 10 viser resultatet fra de lange intervaller.



Figur 9: Billede med korte isopbygningsintervaller (15 sekunder).

Testopstillingen i Figur 9 har kørt i 35 minutter med korte isopbygningsintervaller med en fremløbstemperatur, som daler jævnt fra -17 °C til -14 °C . Vandtemperaturen i bassinet er 1 °C . Det ses, at isen har karakter af grødis, altså en løst sammenhængende is med meget vand imellem. I højre side løsnes isen fra slangen og stiger op til overfladen, mens den bliver siddende i venstre side.

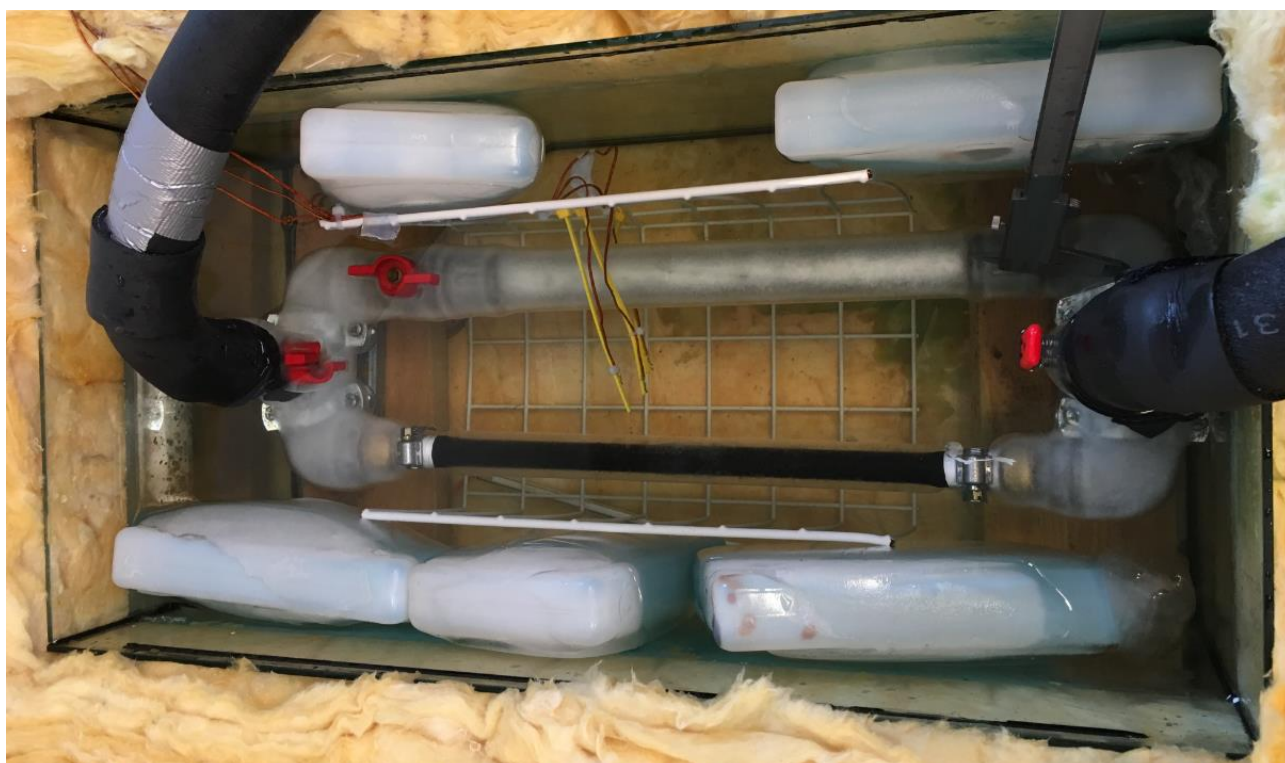


Figur 10: Billede med lange isopbygningsintervaller (tre minutter).

Testopstillingen i Figur 10 har kørt i fem minutter med lange intervaller. Fremløbstemperaturen er -14 °C , og vandtemperaturen i bassinet er 1 °C . Det ses, at isen slipper slangen bedre end ved de korte intervaller, og isen har mere karakter af isflager end grødis.

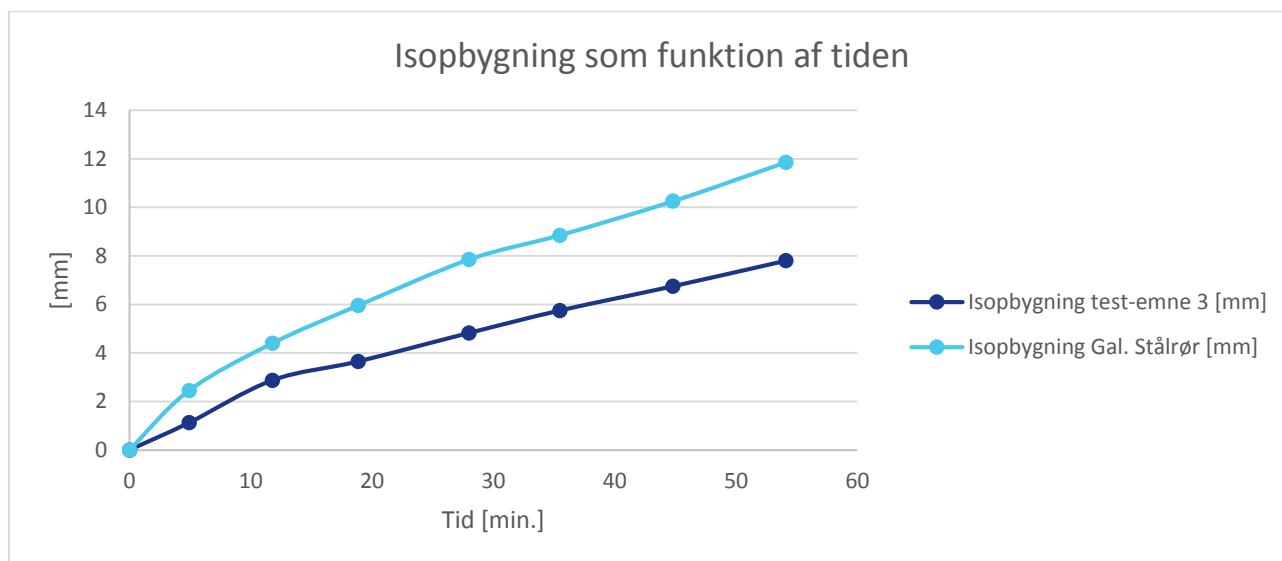
3.3. Forsøg 3 - Isdannelse på testemne 3 og galvaniseret stålrør

Varmegennemgangen i testemnerne er mindre end i eksempelvis kobber og stålrør. For at få et overblik over, om den gevinst, der opnås ved at kunne skyde isen af testemnet, helt forsvinder på grund af den termiske isolans i testemnerne, blev isdannelsen som funktion af tiden undersøgt. Undersøgelsen omfattede testemne 3 og et ½" galvaniseret stålrør, se Figur 11: Billede af testopstilling med testemne 3 og galvaniseret stålrør.



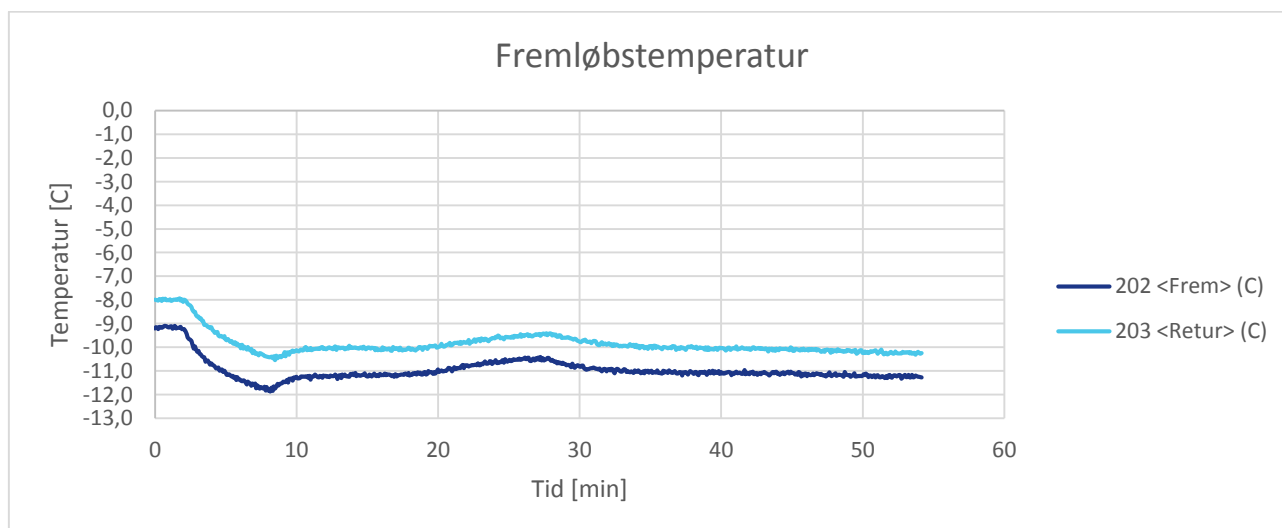
Figur 11: Billede af testopstilling med testemne 3 og galvaniseret stålrør.

Metoden til at måle istykkelsen bestod i at bestemme diameteren midt på røret/testemnet med en skydelære. Først blev testemnet målt, så det galvaniserede stålrør, og derefter testemnet igen. Gennemsnit af de to målinger fra testemnet blev herefter beregnet, og tidspunktet noteret. Denne metode blev valgt for at kompensere for den kontinuerlige isopbygning, som fandt sted, mens målingerne blev foretaget. Istykkelsen er sat til 0 mm ved den første måling ved tiden 0. Resultatet af denne undersøgelse ses i Figur 12.



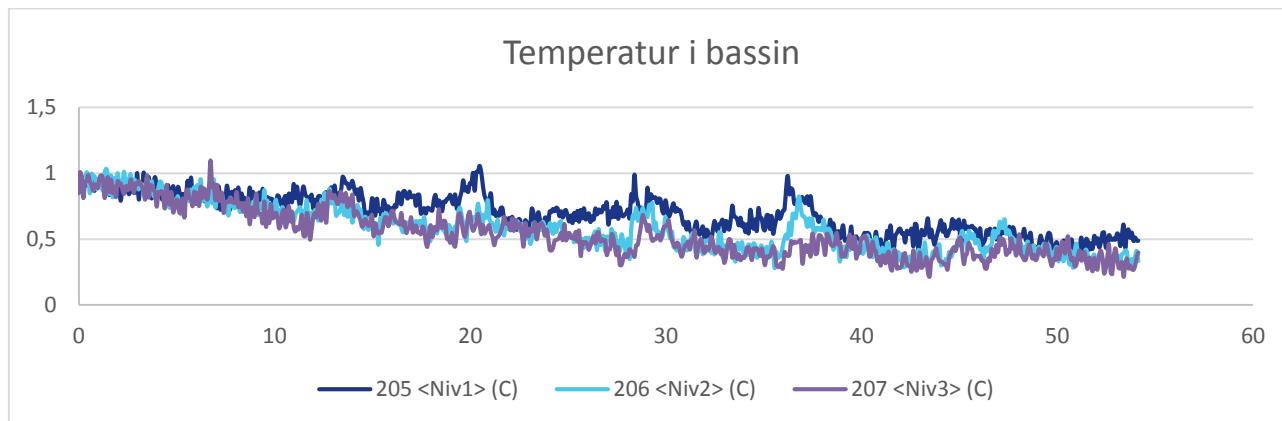
Figur 12: Udvikling af istykkelsen på testemne 3 og galvaniseret stålrør.

Det ses, hvordan hældningen i starten af begge kurver er størst, hvorefter hældningen gradvist falder, og efterhånden bliver konstant. Dette betyder, at isopbygningshastigheden ikke sænkes af isens isoleringsevne for den tidsperiode, der er målt over. Det ses også, at afstanden mellem de to kurver øges. Dette skyldes den større termiske modstand i testemnet end i det galvaniserede stålrør. I afsnit 5 er disse data benyttet som udgangspunkt til teoretisk at kunne bestemme isopbygningen. Fremløbstemperaturen i forsøg 3 ses i Figur 13.



Figur 13: Fremløbs- og returtemperatur i brinen ved forsøg 3.

Grundet systemets opbygning er det svært at få temperaturforholdene helt stationære. Temperaturerne i vandet omkring de to rør ses i Figur 14.



Figur 14: Temperatur i vandet hhv. under og over testemnet samt 1 cm under vandoverfladen ved forsøg 3.

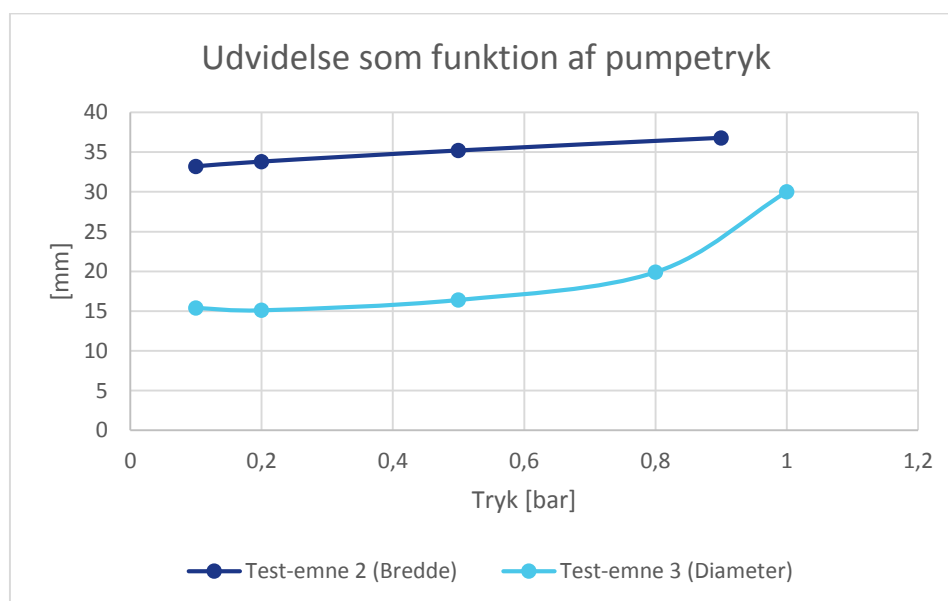
Niveau 1 er niveauet 2-3 cm under testemnet og det galvaniserede stålør.

Niveau 2 er 2-3 cm over testemnet og det galvaniserede stålør.

Niveau 3 er 1 cm under vandoverfladen.

3.4. Forsøg 4 – Udvidelse af testemner som funktion af trykket

For at kunne skyde is af testemnerne er det vigtigt, at de har den rette elasticitet. Elasticiteten af testemne 2 og 3 er undersøgt. Metoden var aflæsning af trykket og notering af diameter for testemne 3 samt bredde (mindste dimension - lilleaksen) for det ovale testemne 2. Resultatet ses i Figur 15.

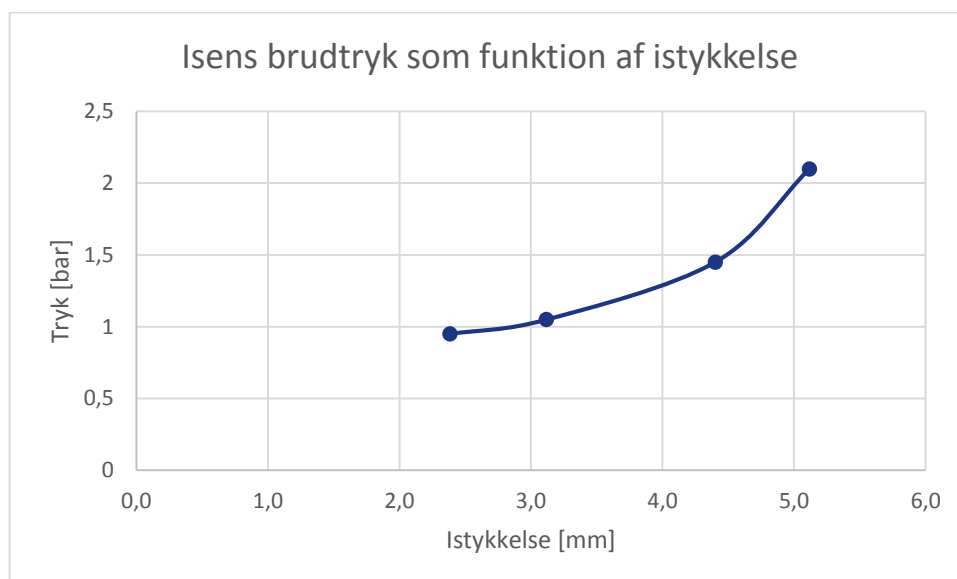


Figur 15: Udvidelse af testemne 2 og 3 som funktion af trykket.

Figuren viser, hvordan testemne 3's diameter udvides, når trykket stiger. Testemne 2 er derimod mere stift og udvides ikke på samme måde, når trykket stiger.

3.5. Forsøg 5 - Brudtryk

For at skyde isen af den fleksible slange skal der opbygges et tryk. For at undersøge, hvor stort et pumpearbejde der skal til for at skyde isen af, er isens brudtryk undersøgt. Ved at lade isen bygge op i forskellige tykkelser, og derefter aflæse det tryk, der skal til at flække isen, har det været muligt at frembringe kurven, som ses i Figur 16. Under forsøget er testemne 3 monteret i forsøgsopstillingen.



Figur 16: Isens brudtryk som funktion af istykkelsen for testemne 3.

Det ses, at sammenhængen mellem det tryk, der skal til for at bryde isen, og istykkelsen ikke har en lineær sammenhæng. Derimod er trykket eksponentielt voksende. Det er derfor vigtigt at finde det rette interval mellem fjernelse af is fra den fleksible slange. Bliver isen for tyk, koster det mere pumpearbejde. Forklaringer på, hvorfor sammenhængen ikke er lineær, kan skyldes uensartede istykkelser ved små istykkelser, og ved store istykkelser er istykkelsen stor i forhold til slangens diameter, hvilket kan give en anden spændingsfordeling.

3.6. Forsøg 6 - Frigørelse af rimdannelse ved eksponering for luft

For at undersøge potentialet for affugtning ved at danne rim på en overflade blev der også udført forsøg uden vand i bassinet. I stedet blev en lille ultralydsbefugter placeret nede i bassinet, hvorefter der blev lagt et låg henover. Befugteren afgav 26 g vand pr. time, og forsøget forløb i 122 minutter inden udvidelsen fandt sted. Dette svarer til, at luftfugtigheden vil være 100 % indenfor få minutter i det 54 liter store akvarie med låg på. Forløbet med at få rimen på slangen til at falde af ses i Figur 17. Det ses, at isen relativt nemt frigøres fra overfladen ved ekspansion af slangen.

Inden første ekspansion:



Første ekspansion i gang:



Efter første ekspansion:

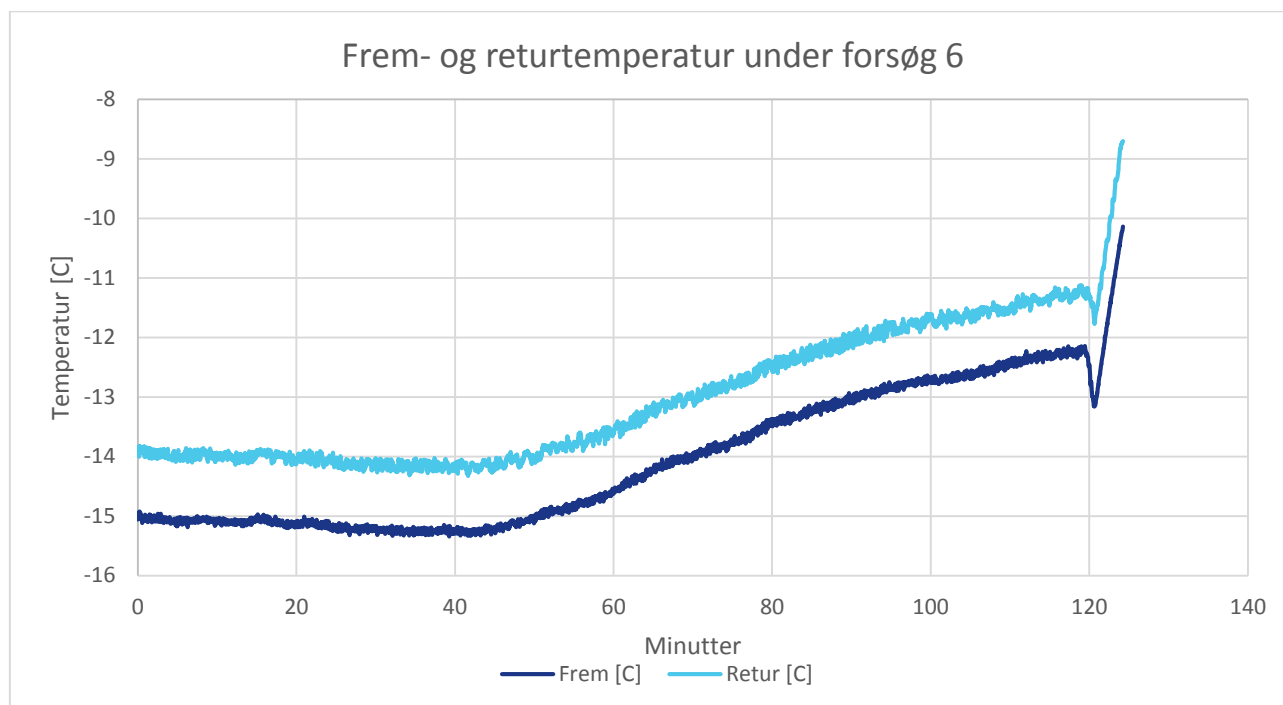


Efter anden ekspansion:



Figur 17: Frigørelse af rim ved testemne eksponeret for fugtig luft.

Fremløbstemperaturen under dette forsøg ses i Figur 18.



Figur 18: Fremløbs- og returtemperatur i brinen ved forsøg 6.

Det ses, at temperaturen har været forholdsvis stabil under forløbet med opbygning af rim. Temperaturen begynder at stige efter 40 minutter, hvilket er forårsaget af forholdene i glykolbeholderen. Som det ses af Figur 18, falder temperaturen efter 120 minutter. Dette skyldes, at når trykket hæves i testemnet, ændres dynamikken i blandesøjfen, som derved vil suge mere koldt glykol ned til pumpen og videre ud til testemnet. Temperaturstigningen efter det korte temperaturfald skyldes, at forsøget stoppes og pumpen slukkes.

3.7. Forsøg 7 – Frigørelse af is med sukkerholdigt vand

Der er også foretaget test med sukkerholdigt vand for at undersøge forholdene ved forskellige typer væske. Der anvendes 900 g sukker opløst i vand, hvilket giver en koncentration af sukkeret på 2,84 vægt %. Forsøget blev foretaget med et tidsinterval på 10 minutter til isopbygningen efterfulgt af én ekspansion.

Figur 19 viser, hvordan det også er muligt at frigøre is, som er dannet i sukkerholdigt vand. Der dannes sammenhængende isflager, som ses i væskeoverfladen på de sidste to billeder.

Inden ekspansion:



Ekspansionen er i gang:



Ekspansionen er i gang:



Efter ekspansionen:



Efter ekspansionen:



Figur 19: Frigørelse af is med sukkerholdigt vand ved forsøg 7.

3.8. Forsøg 8 - Frigørelse af is med saltholdigt vand

Der er ligeledes testet med saltholdigt vand (3,5 vægt % salt). Ca. 1 kg filtersalt er opløst i vandet, og mængden af vand er 28,5 liter. Forsøget blev foretaget med et tidsinterval på fem minutter til isopbygningen efterfulgt af to ekspansioner, som varede to sekunder adskilt af en pause på et sekund. Resultatet ses i Figur 20.

Inden første ekspansion:



Første ekspansion i gang:



Efter første ekspansion:



Efter anden ekspansion:



Efter anden ekspansion:



Figur 20: Frigørelse af is ved forsøg 8 med saltholdigt vand.

Også med saltholdigt vand er det muligt at frigøre isen fra slangen. Det ses også, hvordan ekspansionen får slangen til at krumme, fordi længden af slangen øges på grund af ekspansionen.

3.9. Forsøg 9 – Isopbygning med tvungen/naturlig konvektion i vand

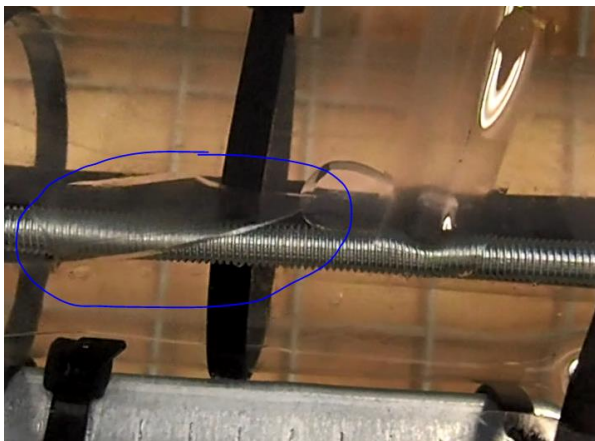
Tvungen konvektion giver en større varmeovergang end naturlig konvektion. Det var derfor ønsket at kunne sammenligne istykkelse og -struktur med tvungen kontra naturlig konvektion ved isoverfladen. Testopstillingen blev derfor bygget om således, at det var muligt ved hjælp af et flow at skabe tvungen konvektion. For at guide dette flow og for at kunne observere isdannelsen blev et gennemsigtigt plastikrør monteret rundt om testemne 3, se Figur 21.

Det guidede flow er skabt af en cirkulationspumpe. Pumpens afgangsrør ses til højre på billedet i Figur 21. Under test blev der kørt med systemet i 10 minutter med tvungen konvektion (cirkulationspumpe tændt), hvorefter isen blev skudt af. Herefter blev der kørt 10 minutter med naturlig konvektion (cirkulationspumpe slukket), hvorefter isen blev skudt af.

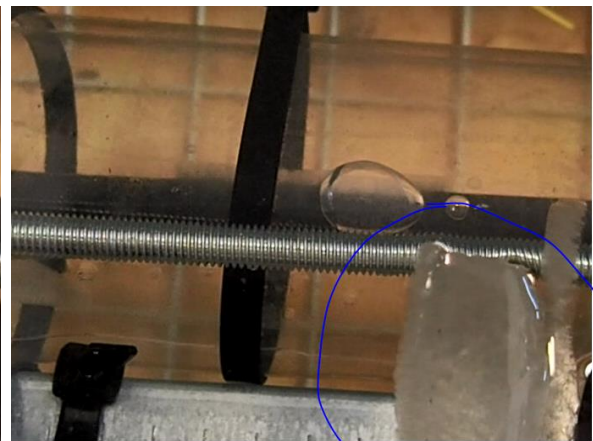


Figur 21: Billede af gennemsigtigt plastikrør monteret til at guide flow forbi testemnet for at skabe tvungen konvektion.

Figur 22 og Figur 23 viser resultatet af forsøget, lige efter at isen er "skudt" af. Under begge forsøg var temperaturen i vandet målt til ca. $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Årsagen til en temperatur på under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan skyldes usikkerhed på målingerne. Fremløbstemperaturen var $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 22: Isflage "skudt" af testemne 3 efter 10 minutter med tvungen konvektion.

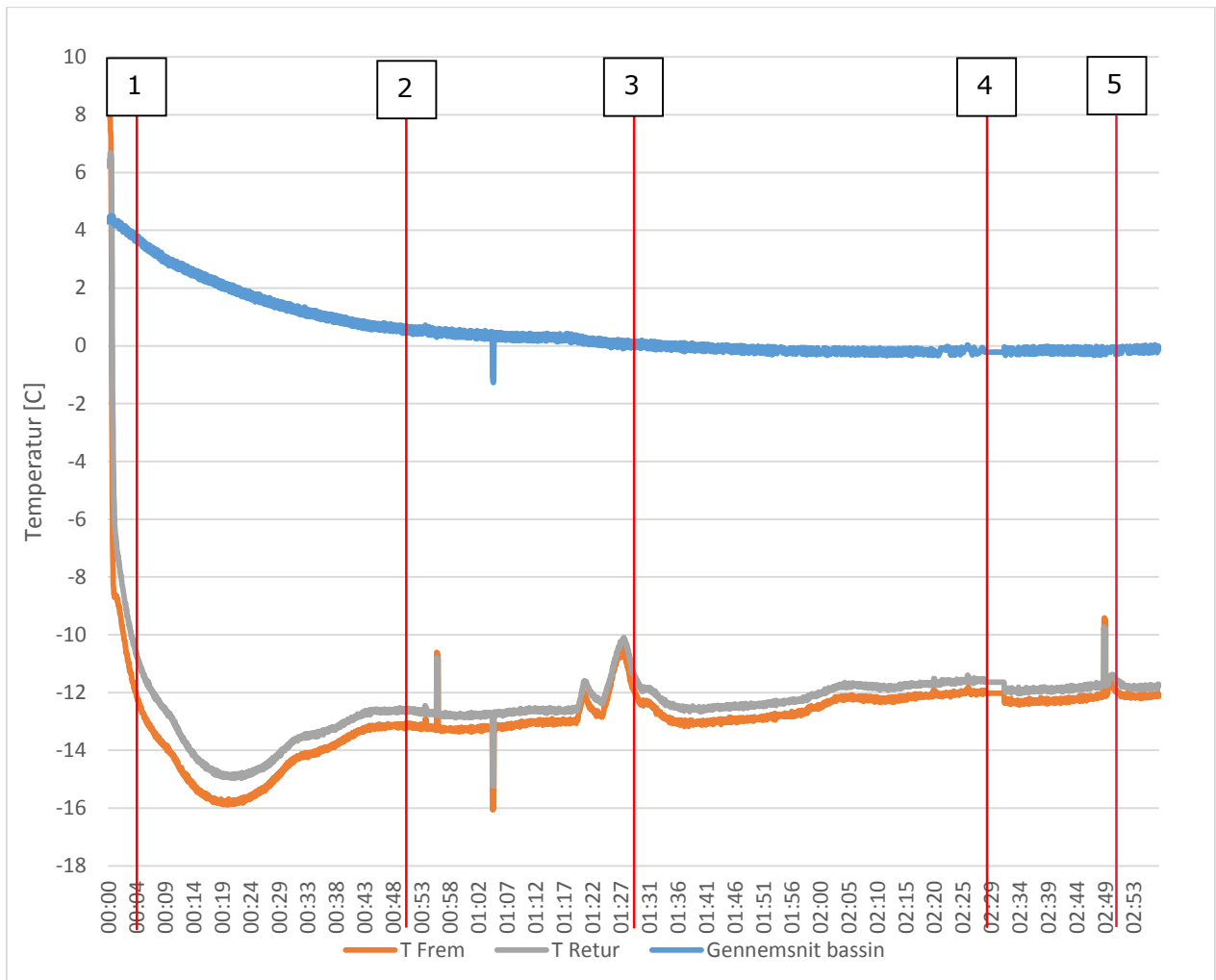


Figur 23: Isflage "skudt" af testemne 3 efter 10 minutter med naturlig konvektion.

Der kunne ikke måles forskel i istykkelsen med henholdsvis tvungen og naturlig konvektion. For begge forsøg var isen omkring tre millimeter tyk. Til gengæld blev der observeret en tydelig ændret struktur i isen. I Figur 22 og Figur 23 er der udvalgt en isflage, som er markeret med en blå cirkel. Det ses, at isflagen, som er fremkommet med tvungen konvektion (Figur 22), er mere glasagtig og helt gennemsigtig. Derimod minder isflagen skabt ved naturlig konvektion (Figur 23) mere om matteret glas.

I dette forsøg har den tvungne konvektion ikke resulteret i en tykkere is, men en is, som har ændret struktur, og som måske har en lidt højere densitet og dermed lidt mere oplagret kølekapacitet pr. volumen. Dog kunne man forestille sig, at isen fra forsøget med tvungen konvektion kræver et højere tryk for at blive "skudt" af, fordi den er mere homogen. Alt dette bør undersøges nærmere ved yderligere forsøg. Det kan også tænkes, at varmeledningsevnen af isen er forskellig, afhængigt af om der er tvungen- eller naturlig konvektion omkring isen.

Den tvungne konvektion øger varmeovergangen både til testemnet, men også mellem vandet i bassinet og de fryseelementer, som blev lagt i vandet inden hvert forsøg. For at få en indikation om, hvordan de ændrede varmeovergange påvirker hele testopstillingen, er temperaturforløbet inden forsøget med tvungen/naturlig konvektion blevet plottet og ses i Figur 24, hvor events er markeret med nummererede røde linjer. Hver event er beskrevet under Figur 24. Event 5 markerer starten på forsøget med tvungen konvektion. Desværre er data gået tabt for perioden med den sidste del af forsøget med tvungen konvektion og den efterfølgende periode med naturlig konvektion. Dette er derfor ikke vist i Figur 24. Perioden på 10 minutter med naturlig konvektion forventes dog at have temperaturer, som stort set svarer til forholdene på den sidste del af kurven.



Figur 24: Temperaturforløb i vand i bassin samt i brine ved start af forsøg 9 med tvungen konvektion.

Event 1: Cirkulationspumpen tændes og indstilles til at give maksimalt flow.

Event 2: Cirkulationspumpen indstilles til at give minimalt flow.

Event 3: Is observeres på testemnet.

Event 4: Kortvarig afbrydelse af datalogningen.

Event 5: Start på 10 minutters isopbygningsperiode med tvungen konvektion.

Det ses, at isdannelsen først starter, når målinger af vandtemperaturen viser værdier under 0°C , hvilket måske kan tilskrives den større omrøring ved dette forsøg. En mulighed forklaring på de lave målte vandtemperaturer kan være usikkerhed på målingerne. På bassintemperaturkurven, mellem event 1 og 2, ses, at når cirkulationspumpen er på maksimal ydelse, er der tendens til størst temperaturændring i bassintemperaturen. Peakene på frem- og returtemperaturen skyldes muligvis, at membranpumpen har været stoppet kortvarigt.

3.10. Forsøg 10 – Temperaturmåling i iskappe

Grundet den uændrede isopbygningshastighed vist i Figur 12 blev det besluttet at undersøge temperaturerne inde i iskappen - for på den måde at få et større indblik i varme-strømmen igennem isen. Tre termoelementer blev derfor flyttet hen på det galvaniserede stålrør. Et på overfladen af stålrøret, et 9 mm fra stålrøret og et 17,4 mm fra stålrøret. Figur 25 viser et billede af opstillingen (de to sidstnævnte termoelementer er indikeret med blå cirkel, overfladeføleren er placeret under røret og kan ikke ses).

Herefter blev brinepumpen tændt, og isopbygningen begyndte. Forsøget kørte over en periode på 141 minutter, hvor isen blev opbygget. Figur 26 viser en billedserie af forløbet.



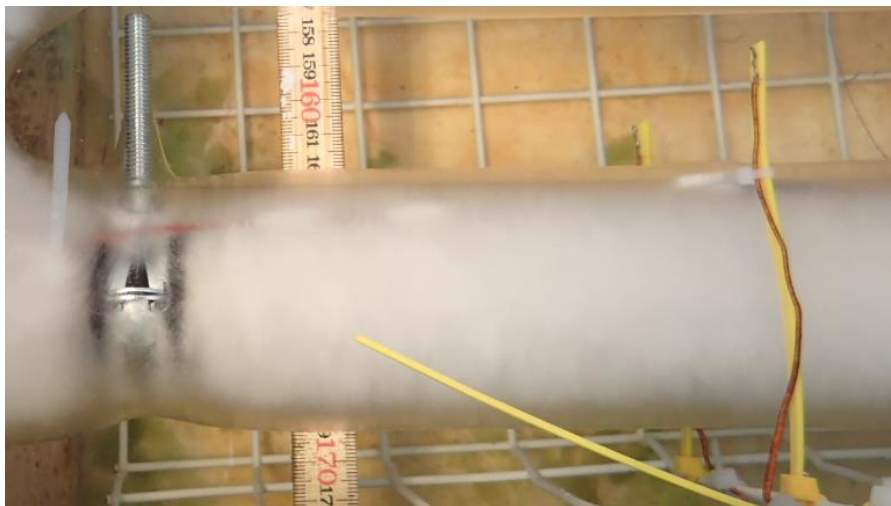
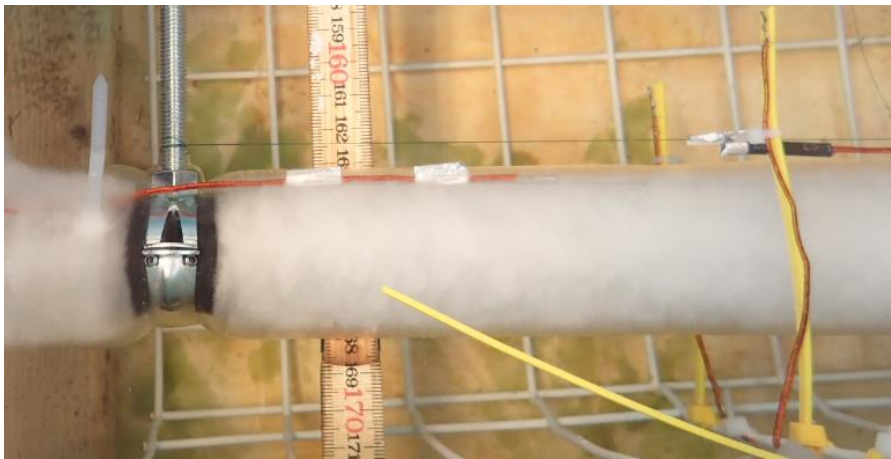
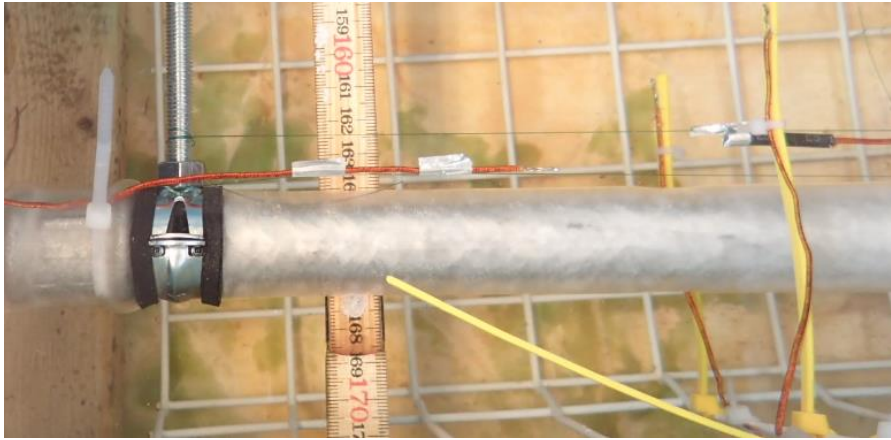
Figur 25: Billede af termoelementernes placering ved forsøg 10.

På de 141 minutter bliver der opbygget ca. 25 mm is på det galvaniserede stålrør. Forløbet med temperaturer ses i Figur 27. De røde streger markerer "events" under forsøget.

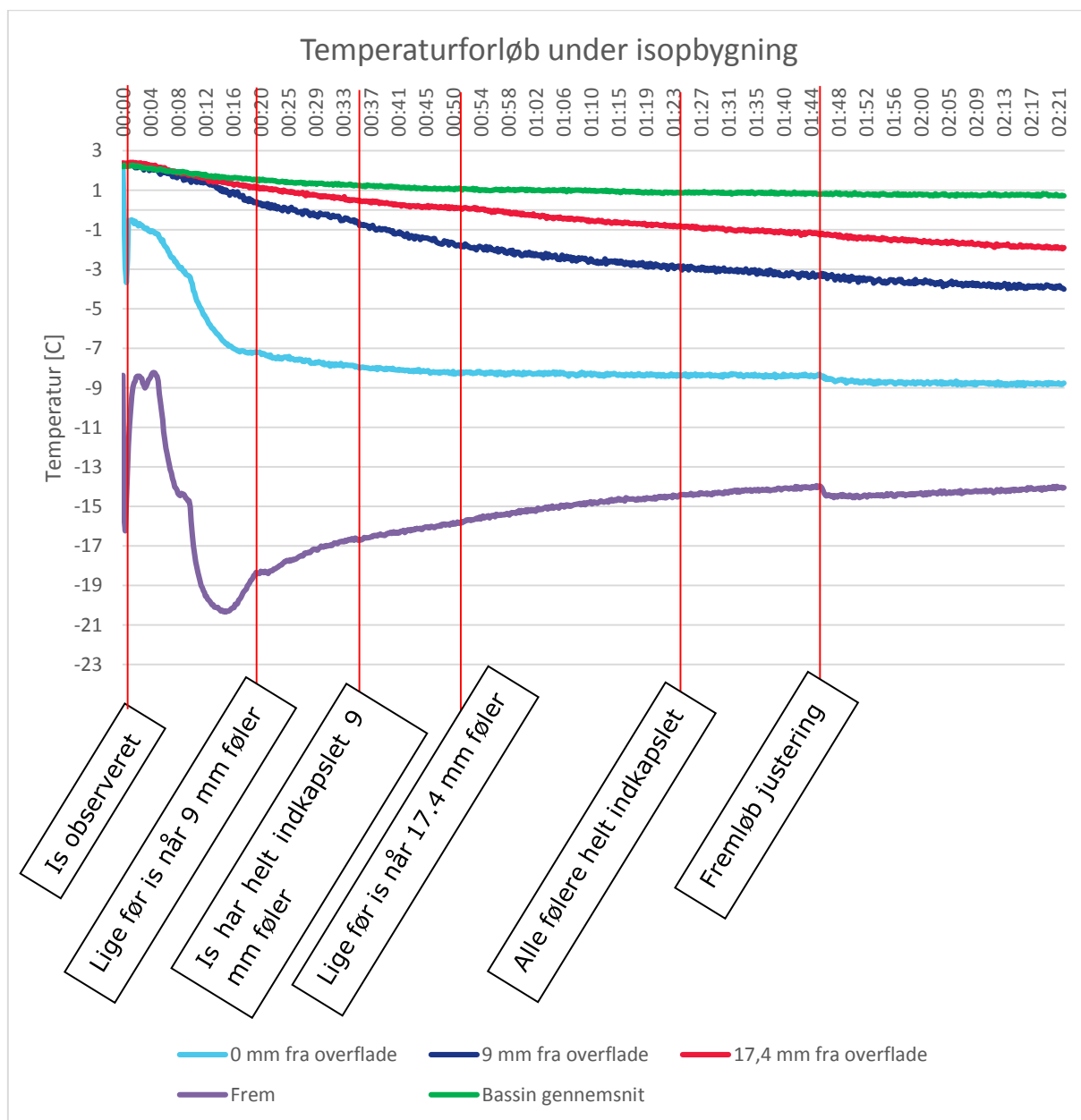
Fra start er temperaturen i bassinet ca. 2 °C, og den falder langsomt til lidt under 1 °C ved forsøgets slutning. Brinetemperaturen i slangen varierer mellem ca. -9 °C i starten og -20 °C efter 15 minutter, hvorefter temperaturen langsomt stiger til -14 °C ved forsøgets slutning.

Overfladetemperaturen på stålrøret er i starten ca. 0 °C, og den falder derefter i løbet af 15-20 minutter til ca. -7 °C for derefter langsomt at falde til -9 °C ved forsøgets slutning.

Temperaturerne i afstandene henholdsvis 9 og 17,4 mm fra røret starter ved henholdsvis ca. 0 °C til 1 °C og falder derefter langsomt til -2 °C og -4 °C ved forsøgets slutning. Temperaturen i disse to følere følger et logisk forløb med hensyn til temperaturniveau, idet der som forventet er en vis temperaturforskelle mellem de to følere, og at temperaturen i en afstand på 9 mm fra overfladen hele tiden ligger lavere end i afstanden 17,4 mm.



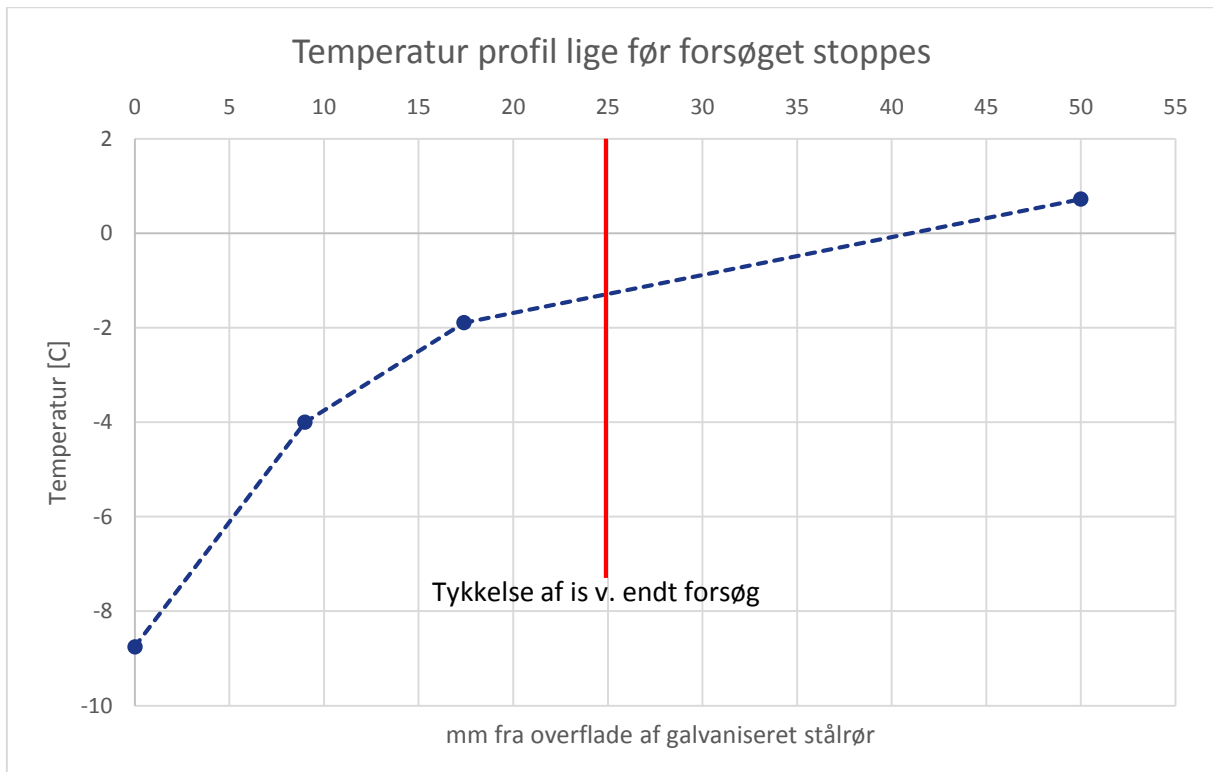
Figur 26: Isopbygning på stålrør ved forsøg 10.



Figur 27: Temperaturforløb ved isopbygning på stålrør ved forsøg 10.

Figur 28 viser temperaturprofilen i de sidste minutter inden forsøget blev stoppet.

Det ses, at temperaturgradienten er størst i isen, der er tættest på røret. Det betyder, at isen har en større isolans tæt på røret, jf. Figur 28. Længere væk fra røret er der en mindre isolans.



Figur 28: Temperturprofil i isen og i vandet ved afslutning af forsøg 10.

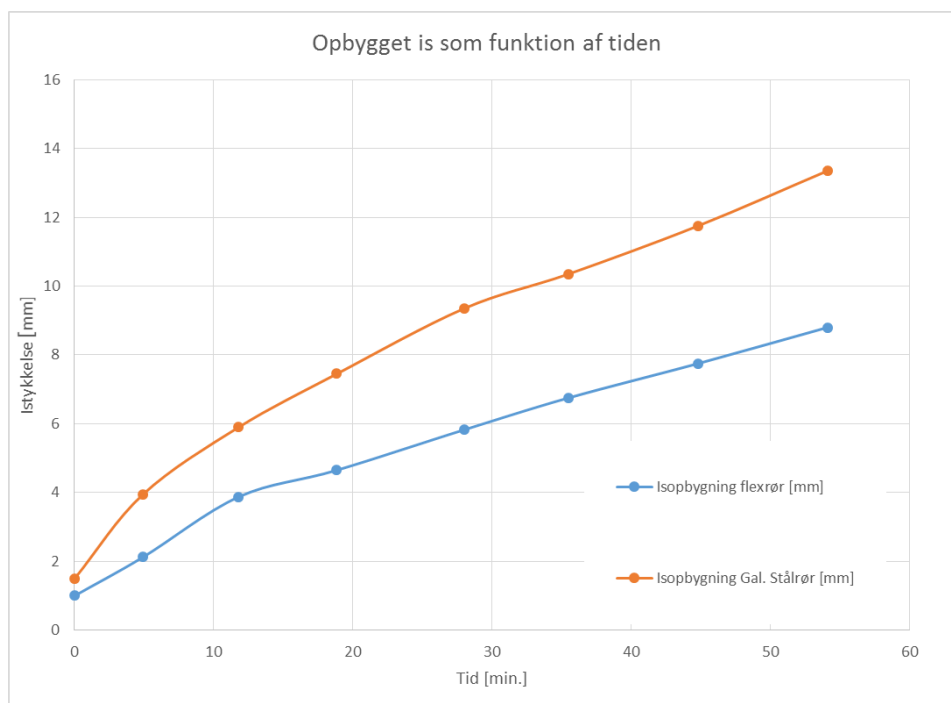
4. Teoretisk vurdering

For at give mulighed for at forudsige isdannelsen ved fleksible slanger er det teoretisk søgt at beregne isdannelsen og sammenligne denne med de målte istykkelser. Denne teori er benyttet til at beregne isdannelsen under andre forhold og derved søge at sammenligne isdannelsen ved fleksible slanger med isdannelsen på et metalrør.

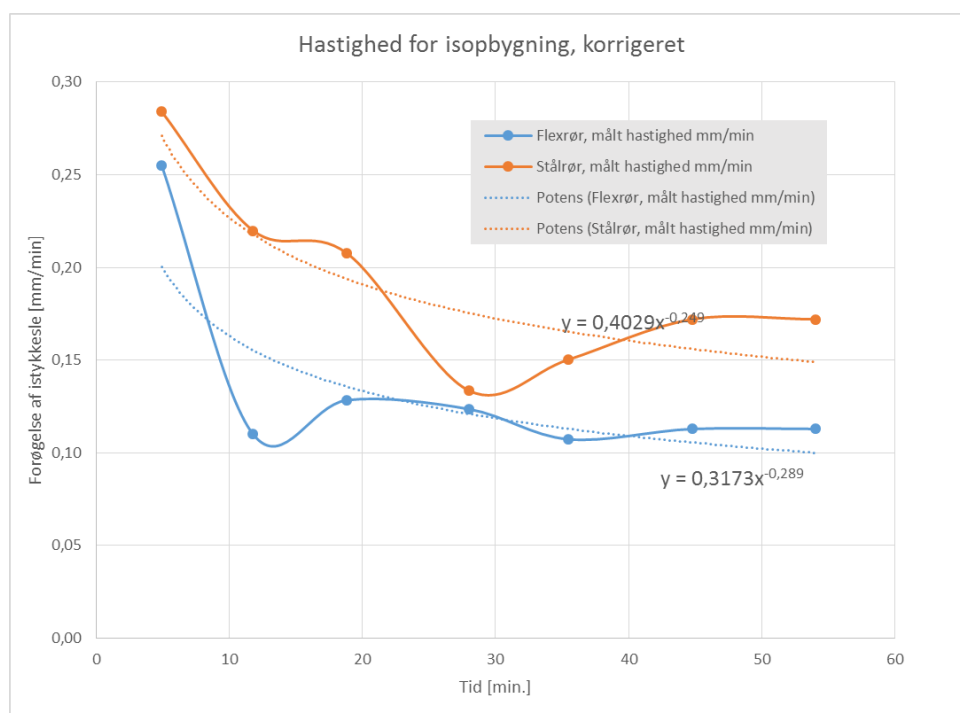
4.1. Beregningsmæssige forudsætninger

Det er ønsket at opstille en teori for den varmetransmission, der sker i forbindelse med isdannelsen. Der benyttes resultater fra forsøg 3, beskrevet i afsnit 3.3. Dataene, der er vist i Figur 12, er benyttet til at beregne isopbygningshastigheden. Disse data er korrigeret med hensyn til istykkelsen ved starttidspunktet af målingerne. Der er skønnet en istykkelse på henholdsvis 1 og 1,5 mm for henholdsvis flexrøret og stålrøret, som det fremgår af Figur 29.

På grundlag af denne kurve er isopbygningshastigheden bestemt, se Figur 30. Det ses, at hastigheden varierer bølgeformet. Disse bølgeformede variationer skyldes usikkerheden ved tykkelsesmålingerne. Der er lavet et kurvefit, som tilnærmer hastigheden til en potensfunktion.



Figur 29. Udvikling af istykkelse på flexrør (testemne 3) og stålrør.



Figur 30. Hastighed for isopbygning på flexrør (testemne 3) og stålrør.

Den første parameter, der ses på, er varmeledningsevnen af de enkelte materialer. Varmeledningsevnen af is er givet i forskellige referencer. I /6/ er varmeledningsevnen bestemt til 2,2 W/mK og densiteten til 900 kg/m³ ved 0 °C og 2,3 W/mK og densiteten til 920 kg/m³ ved -10 °C. I reference /5/ uden temperaturangivelse er varmeledningsevnen ved densiteten til 910 kg/m³ givet til 2,1 W/mK. I beregningerne benyttes en varmeledningsevne på 2,2 W/mK.

Til de fleste test er der benyttet butyl gummi (polyisobutylene). Det er målt, at densiteten er større end 1 g/cm³. Det har været vanskeligt at finde én tabelværdi for varmeledningsevnen. I reference /6/ er der for polyisobutylene givet en varmeledningsevne på 0,20 W/mK ved en densitet på 930 kg/m³. I reference /7/ er det vist, at varmeledningsevnen kan stige ved anvendelsen af forskellige tilsætningsstoffer. Der er derfor usikkerhed omkring varmeledningsevnen af det anvendte materiale. Der er undersøgt, hvor godt det passer med anvendelsen af forskellige varmeledningsevner, når der i det følgende er foretaget sammenligning mellem målinger og beregninger. Det kan nævnes, at for syntetisk gummi med en densitet på 1200 kg/m³ er der i reference /8/ givet en varmeledningsevne på 0,24 W/mK. Denne værdi er benyttet i beregningerne.

Der anvendes et galvaniseret stålrør. Ifølge reference /6/ er varmeledningsevnen 50 W/mK ved en densitet på 7800 kg/m³. Der benyttes følgende geometri (indvendig og udvendig diameter) for slange og rør i modellen:

Flexrør, di	13,9 mm
Flexrør, de	15,9 mm
Stålrør, di	16,1 mm
Stålrør, de	21,3 mm

Der benyttes følgende termiske data:

Smeltevarmen for is er sat til 332 kJ/kg eller 299 MJ/m³. Varmeoverføringen mellem brine og rørvæg er sat til 670 W/m²K og mellem isoverflade og vand til 100 W/m²K.

For de elementer, som ikke er afhængige af istykkelsen, er der beregnet følgende isolanser pr. m:

Indvendigt, flexrør: 0,034 mK/W

Indvendigt, stålrør: 0,030 mK/W

Flexrør: 0,089 mK/W

Stålrør: 0,001 mK/W.

Der er forudsat følgende temperaturer:

Brine: -11 °C

Overflade is: -1,3 °C

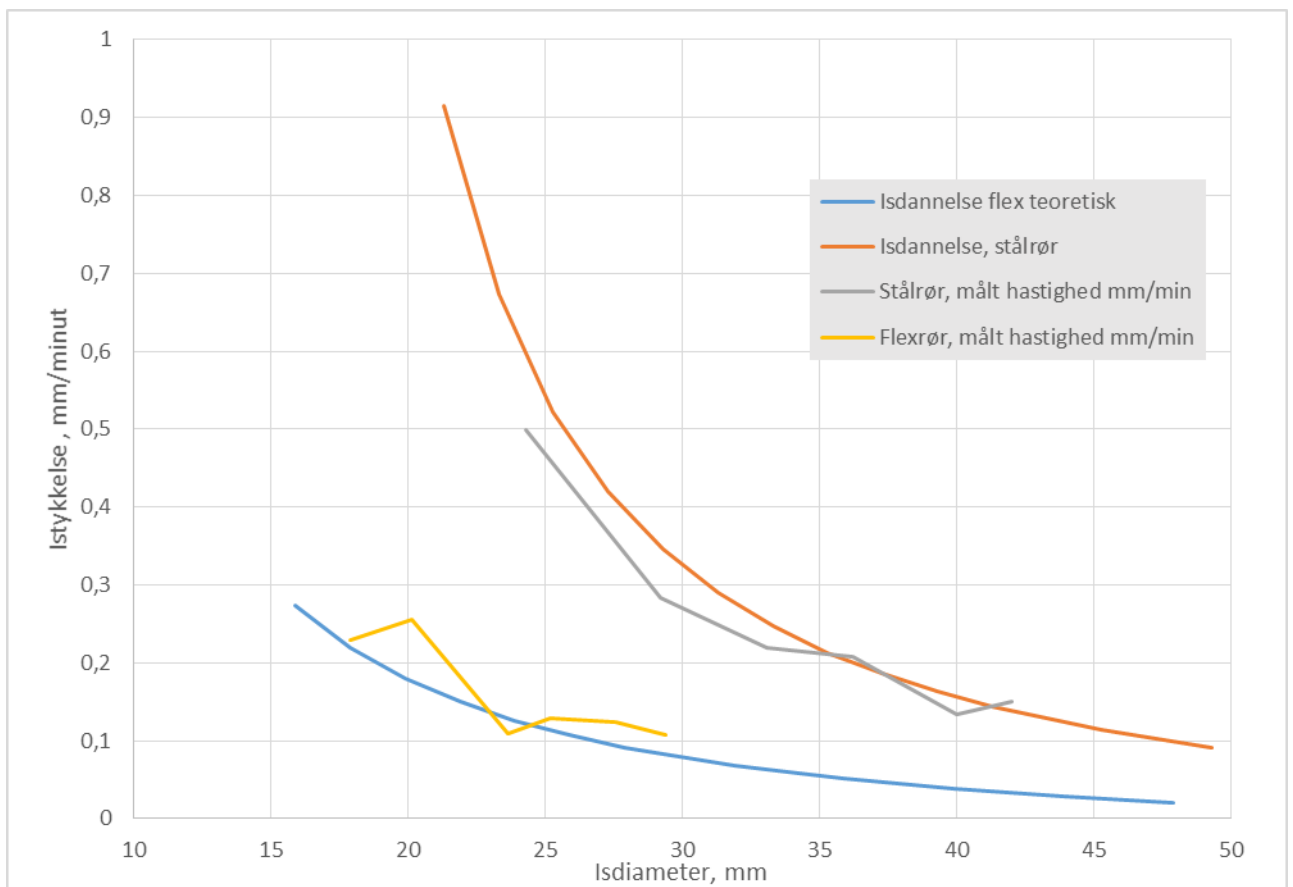
Vand: 0,8 °C

Med disse forudsætninger opstilles en varmebalance mellem brinen og vandet i bassinet.

Delelementer, som indgår i varmebalancen, er:

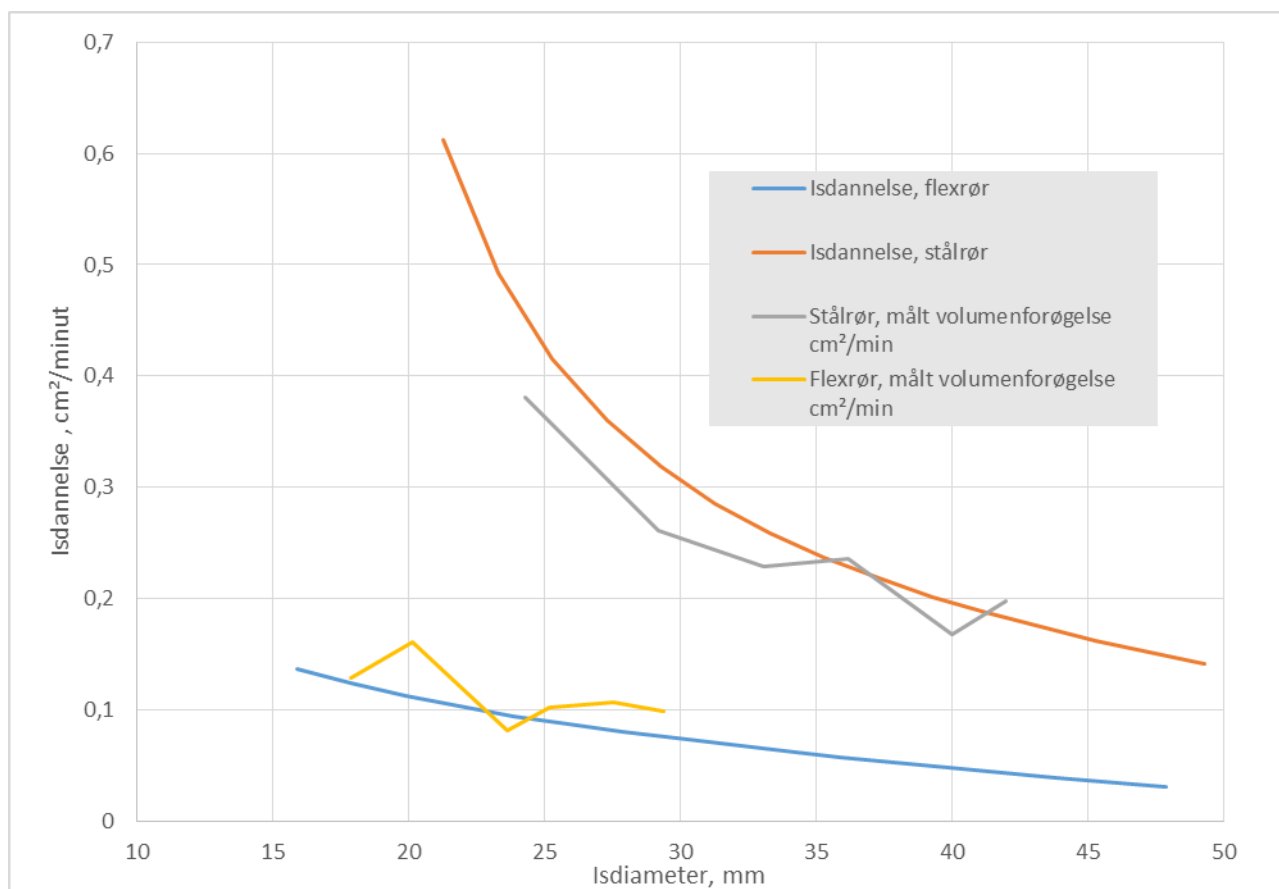
- Isolans indvendigt i rør mellem brine og røroverflade
- Isolans af rør
- Isolans af is
- Isolans mellem isoverflade og vand
- Energi til dannelse af is

Resultatet af beregningerne er vist i Figur 31. Figuren viser isdannelsen i form af tilvækst i istykkelsen i millimeter per minut på flexrør og stålrør, både målt og beregnet. Når der tages hensyn til usikkerheden både ved målinger og ved fastlæggelse af input til beregninger, må forskellen mellem de målte og beregnede værdier betegnes som værende acceptabel.



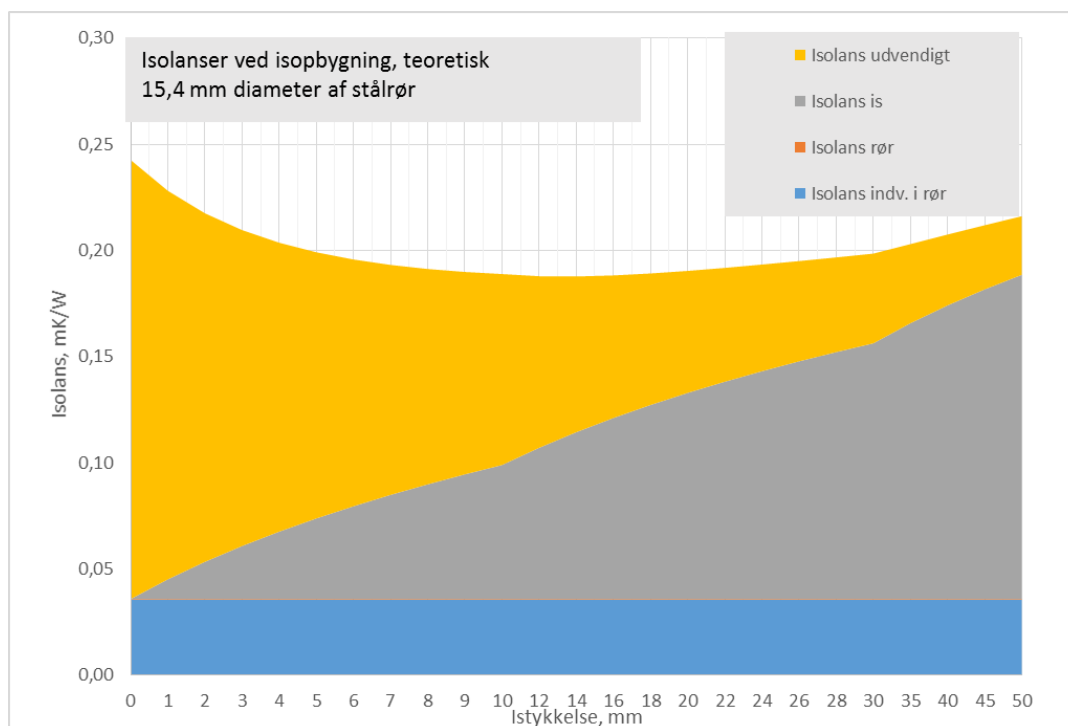
Figur 31. Tilvækst i istykkelse på flexrør og stålør, målt og teoretisk bestemt i enheden millimeter per minut.

Tilvæksten i istykkelse er omregnet til tilvækst i volumen. Da rørens længder antages konstant, beregnes tilvæksten af tværsnitsarealerne af isen i stedet. Resultatet ses i Figur 32. Det ses, at der stadig er en acceptabel forskel mellem de teoretisk bestemte og de målte istykkelser.

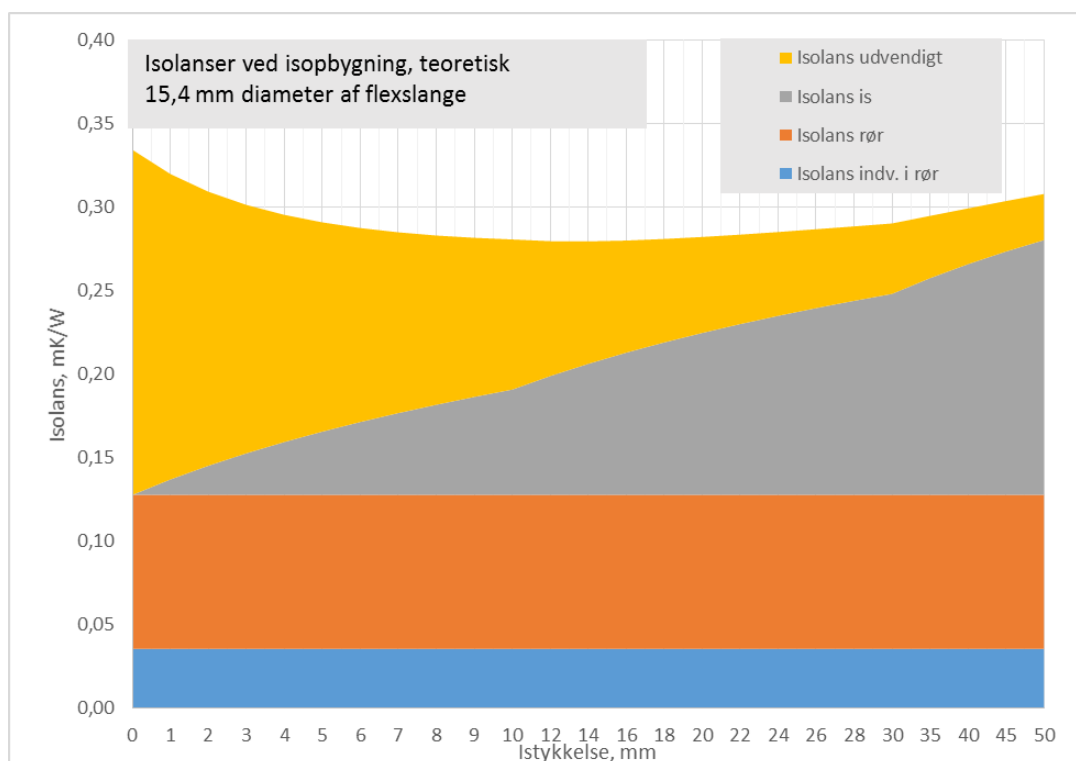


Figur 32. Tilvækst i volumen af isen på flexrør og stålrør, målt og teoretisk. Som udtryk for volumentilvæksten er der benyttet arealtilvæksten af isen på rørets tværsnit i enheden kvadratcentimeter per minut.

For at sammenligne isdannelsen på de to rør (flexslange og stålrør) foretages der en beregning af isdannelsesforløbet med samme udvendige rørdiameter på 15,4 mm, hvilket svarer til flexslangens dimension og en godstykkelse af rørene på 1 mm. De isolanser, der bestemmes under dette forløb, ses i Figur 33 og Figur 34 for henholdsvis stålrør og flexslange. Forskellen på de to figurer er især isolansen af rørvæggene. Ved flexslangen udgør denne isolans et væsentligt bidrag til den samlede isolans, mens isolansen af stålrøret er negligibelt.



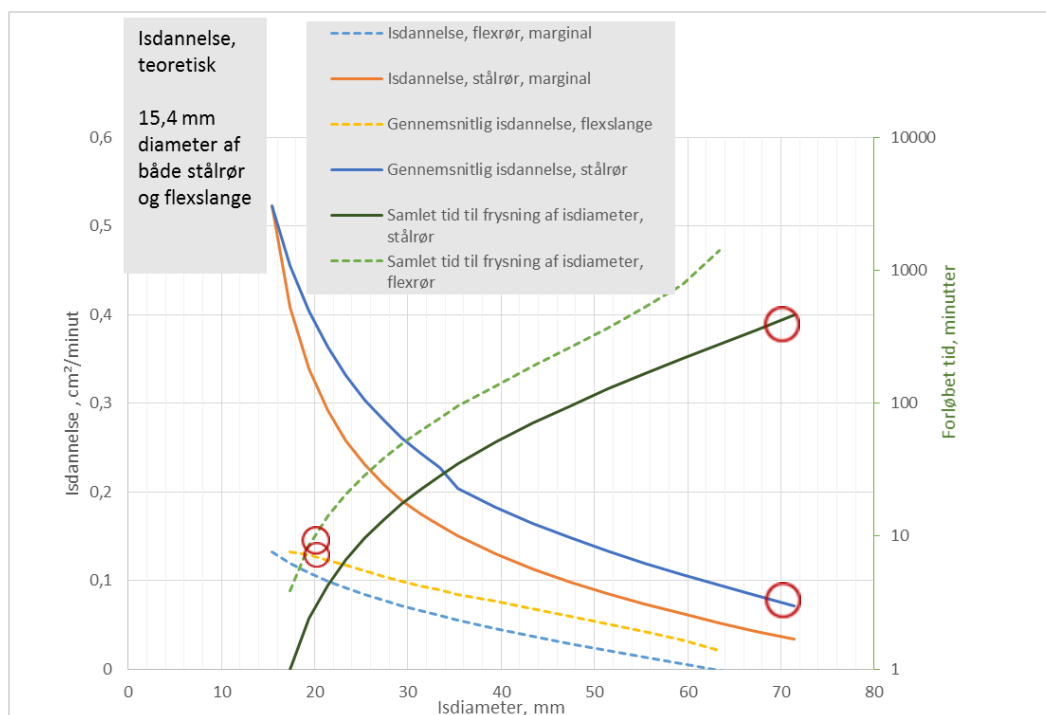
Figur 33. Beregnede isolanser under isopbygning på stålør: Indvendigt i rør (mellem røroverflade og brine), i rørvæg (ikke synlig på figur), i is og udvendigt på is (mellem isoverflade og vand).



Figur 34. Beregnede isolanser under isopbygning på flexrør: Indvendigt i rør (mellem røroverflade og brine), i rørvæg, i is og udvendigt på is (mellem isoverflade og vand).

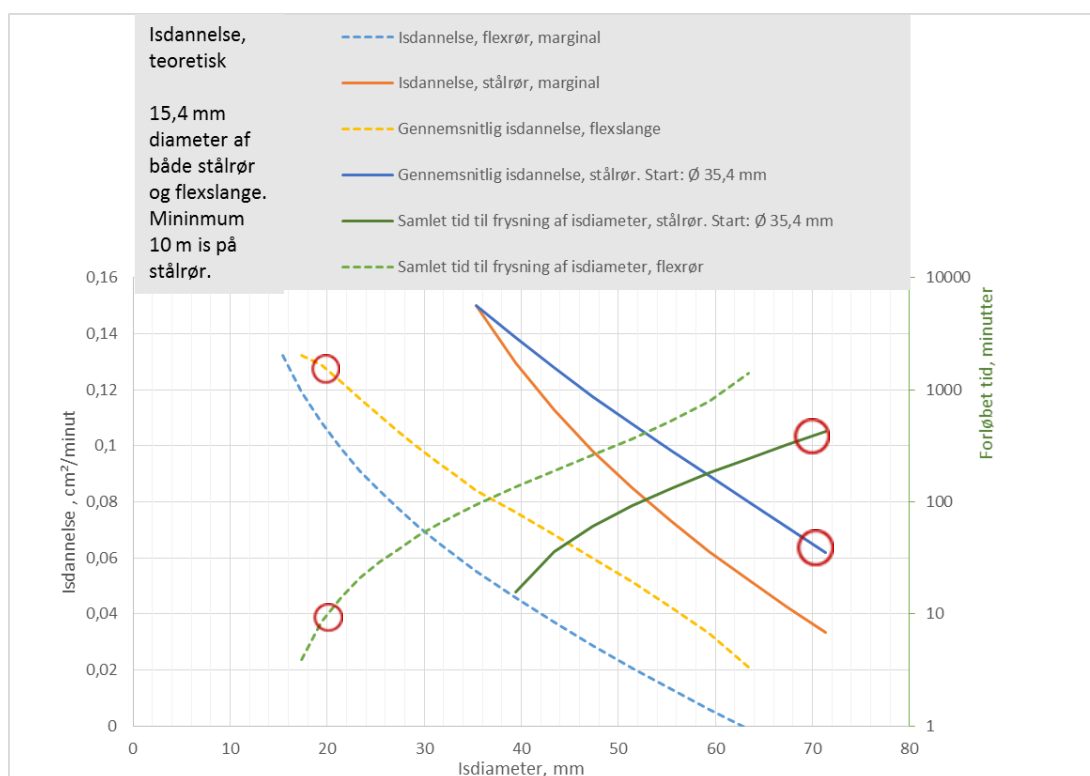
Resultatet af beregningen ses i Figur 35. De stiplede kurver repræsenterer flexslangen, mens de ubrudte kurver repræsenterer stålrøret. Den ubrudte blå kurve viser hastigheden for isopbygningen på stålrøret, mens den stiplede blå kurve viser isopbygningen for flexslangen. Kurverne repræsenterer det isvolumen, der opbygges per minut. For begge kurver gælder det, at isopbygningshastigheden falder meget, jo større istykkelsen er. For stålrøret er isopbygningshastigheden væsentlig større end for flexslangen, hvilket skyldes isolansen af selve flexslangen. Den orange kurve viser den gennemsnitlige isopbygningshastighed for stålrøret, dvs. fra start af isopbygningen til den aktuelle istykkelse er opnået. Den gule stiplede kurve er den tilsvarende gennemsnitlige isopbygningshastighed for den fleksible slange. De grønne kurver viser, hvor lang tid der går fra start af isopbygning til der opnås den specificerede isdiameter. Den ubrudte kurve viser tider for isopbygning på stålrøret, mens den stiplede kurve viser tider for flexslangen. Resultater kan aflæses på den logaritmiske skala på højre akse. Tages der udgangspunkt i dannelse af is på stålrøret med en isdiameter på 70 mm, kan denne figur eksempelvis anvendes til at se, at dette tager ca. 400 minutter (grøn kurve), og at den gennemsnitlige isdannelseshastighed er 0,08 cm² per minut (blå kurve).

For den fleksible slange vil isen typisk blive frigjort hvert 10. minut (se grøn stiplede kurve), hvilket svarer til en isdiameter på 20 mm og en istykkelse på ca. 2,3 mm. Den gennemsnitlige isdannelseshastighed kan af den gule stiplede kurve aflæses til 0,125 cm² per minut. Det vil sige, at med de valgte forudsætninger er isdannelseshastigheden ca. 50 % større for den fleksible slange end for stålrøret.



Figur 35. Beregnede isdannelseshastigheder (vist som vækst af isens tværsnitsareal i enheden cm² per minut) for flexslange og stålrør samt den medgåede tid til at danne isen (grønne kurver, der aflæses på højre skala). Der vises både den øjeblikkelige isdannelseshastighed som funktion af isdiameteren og den gennemsnitlige isdannelseshastighed i tidsrummet fra istykkelsen er 0 mm til den aktuelle isdiameter er opnået. De stiplede kurver viser resultaterne for den fleksible slange, og kurverne for stålrøret er vist med ubrudte linjer.

Forudsættes det, at den traditionelle isbank med stålrør styres, så istykkelsen ikke kommer under 10 mm, hvilket giver en god restkapacitet af islageret, så kan forholdene forventes at svare til resultaterne vist i Figur 36. Med de samme forudsætninger, og hvor islageret opbygger is til diameteren af isen er 70 mm, opnås der en gennemsnitlig isdannelseshastighed ved stålrøret på 0,065 cm² per minut. For flexslangen antages forudsætninger som beskrevet ovenfor og dermed en isdannelseshastighed på 0,125 cm² per minut. I denne situation er isdannelsen næsten dobbelt så stor ved den fleksible slange som ved stålrøret.



Figur 36. Beregnede isdannelseshastigheder (vist som vækst af isens tværsnitsareal i enheden cm² per minut) for flexslange og stålrør. Istykkelsen ved start er 10 mm på stålrøret og 0 mm på flexrøret. Herudover vises den medgåede tid til at danne isen (grønne kurver, der aflæses på højre skala). Der vises både den øjeblikkelige isdannelseshastighed som funktion af isdiameteren, samt den gennemsnitlige isdannelseshastighed i tidsrummet fra istykkelsen er 10 mm på stålrøret og 0 mm på flexslangen til den aktuelle isdiameter er opnået. De stiplede kurver viser resultaterne for den fleksible slange, og kurverne for stålrøret er vist med ubrudte linjer.

5. Konklusion

IPFLEX konceptet bygger på den forudsætning, at dannelse og afgivelse af is kan foretages på fleksible overflader både i væske og i luft. Ved at underlaget er fleksibelt kan en bevægelse af underlaget medføre, at vedhæftningen mellem underlaget og isen brydes. Ved at der samtidig sker passende brud i isen, vil denne kunne føres væk enten på grund af opdriften, som skyldes, at is har en mindre densitet end vand, eller en strømning, som river isen med. Den fleksible overflade vil dermed være i stand til at danne ny is, indtil der sker en ny bevægelse af den fleksible overflade.

I projektet er det eftervist, at dette IPFLEX-koncept kan fungere i en testopstilling. I opstillingen cirkuleres afkølet brine i en fleksibel slange, som er lavet af et elastisk materiale. Når slangen er nedsænket i vand, dannes der is på overfladen, som frigøres, når trykket i brinen øges, og slangen derved udvides.

Vedrørende materielvalg viser test, at isen lettere frigøres, når underlaget (slangen) ikke blot er fleksibel, men også er elastisk, idet underlaget derved kan bevæge sig i tre dimensioner, når trykket øges. Det er primært erfaringer fra de praktiske test med en slange med elastiske egenskaber, som har en diameter på 15 mm og med en tykkelse på 1 mm, der beskrives i det efterfølgende. Temperaturen af det omgivende vand er holdt på en temperatur tæt på vands frysepunkt, dog lidt over. Brinetemperaturen er vigtig for, hvor hurtig isdannelsen sker. Af resultaterne ses det, at i starten af testen dannes isen hurtigt, men at hastigheden aftager, jo større istykkelsen er på grund af den isolans, der er i den allerede dannede is.

Der er foretaget test af, hvor stort et tryk der er nødvendigt i slangen for at bryde isen ved forskellige istykkelser. Det ser ud til, at der ikke er lineær sammenhæng mellem det nødvendige tryk og istykkelsen. Dette kan skyldes, at isen får en mere homogen struktur ved større tykkelser og ved de specielle spændingsforhold, der må opstå i isen, når isen danner en cylinder, hvor istykkelsen ikke er ubetydelig i forhold til diameteren af cylinderen.

Resultaterne viser, at konceptet også er muligt at anvende til affugtning af luft ved lave lufttemperaturer, uden at det er nødvendigt at have afrimning i form af opvarmning, som normalt benyttes til dette formål. Ved at bevæge de elastiske overflader vil isen blive frigjort og falde af overfladerne.

Der er opstillet en teoretisk model for isdannelsen uden på slangen. Parametrene, der indgår i beregningsmodellen, er tilpasset, så der opnås en acceptabel forskel mellem måle- og beregningsresultater, hvorved de anvendte skønnede modelparametre ligger i et forventet interval. En parameter, der skønnes at være en væsentlig begrænsende faktor for varmeovergangen, er varmeledningsevnen af det elastiske materiale, selv om materialetykkelsen kun er 1 mm. Det forventes, at den opstillede model vil kunne give et godt skøn over isdannelsen, hvis der benyttes andre randbetingelser, geometrier og materialeegenskaber.

Der er beregnet et eksempel, som viser, at når isafgivelsen for et stålrør sammenlignes med en flexslange med samme diameter, vil isafgivelsen være ca. 50–100 % større ved flexslangen, idet den øgede isolans af det elastiske materiale bliver kompenseret af, at isen, der er dannet på den fleksible slange, bliver frigjort meget oftere end på stålrøret.

Resultaterne viser, at det undersøgte koncept kan forventes at være velegnet ved en række anvendelser, men at der samtidig er behov for at afdække mere specifikt, hvorledes systemet skal udformes og dimensioneres samt undersøge de materialemæssige forhold nærmere i relation til egenskaber, holdbarhed og anvendelse.

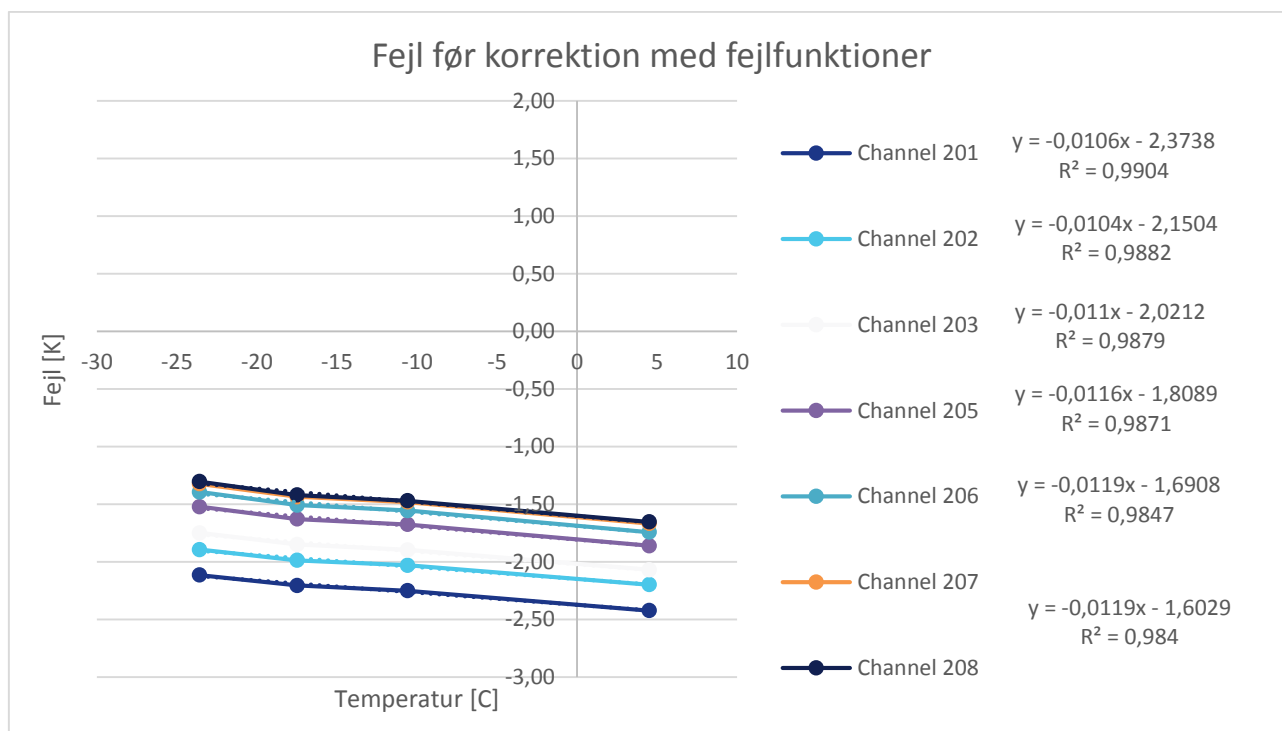
6. Referencer

- /1/ Ice accretion by spraying supercooled droplets is not dependent on wettability and surface free energy of substrates. Salih, Ozbay og H. Yildirim, Erbil. Gebze Technological University, Department of Chemical Engineering, Turkey: Elsevier, 2016.
- /2/ Laboratory study on the adhesive properties of ice to the asphalt pavement of highway. Han-Cheng-Dan et al. Cold Science and Technology. 104-105, p. 7-13. 2014.
- /3/ Vores vand er hårdt, HTK Forsyning A/S, Lervangen 35 D, 2630 Taastrup <http://www.htkforsyning.dk/vandforsyning/vandets-hårdhed/>.
- /4/ SBI-anvisning 236: Vandinstallationer – installationsdele og anlæg. 1. udgave 2011. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet 2011/.
- /5/ Danvak Grundbog, 2. Udgave 1997.
- /6/ DS/EN ISO 10456: 2008. Byggematerialer og -produkter – Hygrotermiske egenskaber – Tabeldesignværdier og procedurer til bestemmelse af termiske deklarerede værdier og termiske designværdier. Dansk Standard.
- /7/ Hoffmann Mineral. Hubert Oggenmüller. Effects of fillers on the thermal Conductivity of Elastomers.
- /8/ DS 418:2011. Beregning af bygningers varmetab. Dansk Standard.

Bilag 1

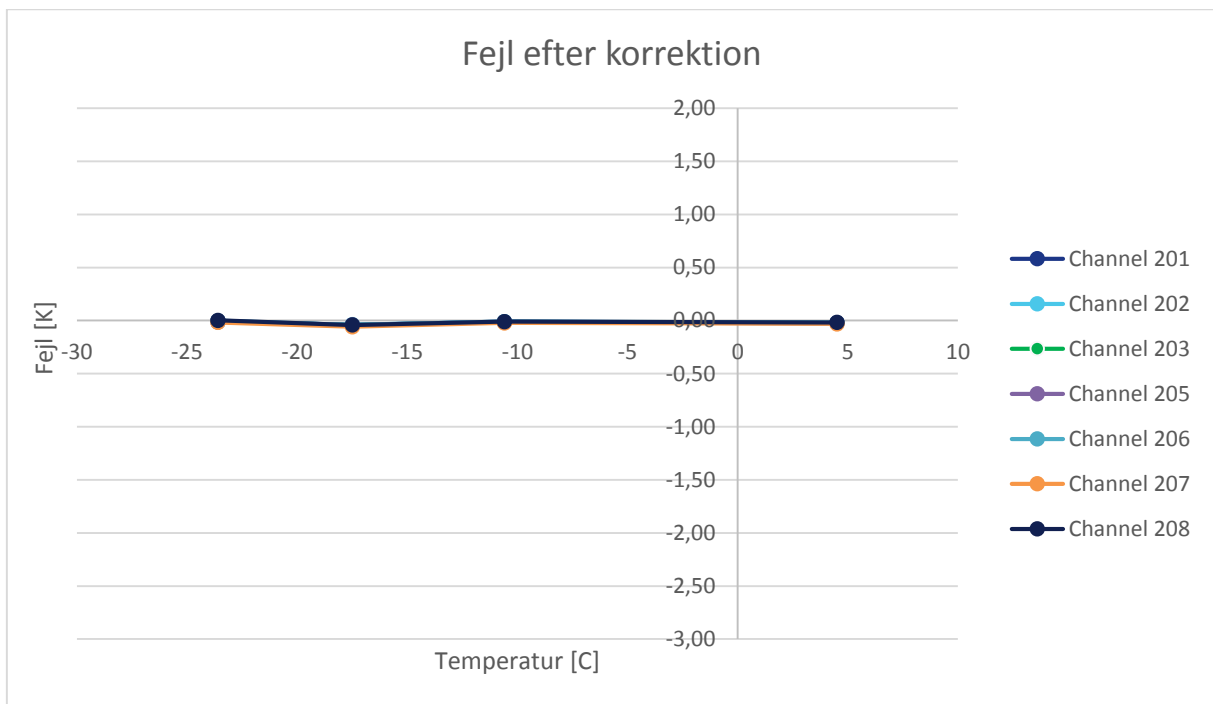
Korrektion af temperaturfølere

For at kalibrere temperaturfølerne er der benyttet et spritbad. Alle de termoelementer, som er benyttet til at måle temperaturer i de forskellige forsøg, har været nedsænket i dette spritbad. Spritbadet fungerer på den måde, at det sænker temperaturen til forskellige niveauer og holder denne temperatur i tre timer. Temperaturen i spritbadet måles meget præcist og kan derfor bruges som reference. Temperaturniveauerne er -23,6 °C, -17,5 °C, -10,6 °C og 4,5 °C. Ved den benyttede metode beregnes fejlvisningen for hver føler, og resultatet plottes som funktion af referencetemperaturen, se Figur 37.



Figur 37: Fejlvisning før korrektion og fejlfunktioner.

Der bestemmes et lineært fit til hver føler, som kan beregne fejl/afvigelsen i hele måleintervallet. Denne fejlfunktion bruges til at korrigere temperaturen for hver føler. Fejlfunktionen for hver føler/kanal er vist i Figur 37 ud for den pågældende kanal. Efter korrektionen er fejlene minimeret, se Figur 38.



Figur 38: Fejlvisning efter korrektion.