

TR A7487 - Åpen

Rapport

Frysemetoder for pelagisk fisk

Leveranse L3.1

Forfatter(e)

Kristina Norne Widell

Ole Stavset

Tom Ståle Nordtvedt



SINTEF Energi ASPostadresse:
Postboks 4761 Sluppen
7465 TrondheimSentralbord: 73597200
Telefaks: 73597250energy.research@sintef.no
www.sintef.no/energi
Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Rapport

Frysemetoder for pelagisk fisk

Leveranse L3.1

EMNEORD:
Frysetuneller
Målinger
Simuleringer
Pelagisk industri**VERSJON**

1

DATO

2015-05-20

FORFATTER(E)Kristina Norne Widell
Ole Stavset
Tom Ståle Nordtvedt**OPPDRAKSGIVER(E)**

FHF

OPPDRAKSGIVERS REF.

900915

PROSJEKTNR

502000326

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

47

SAMMENDRAG

Denne rapporten er leveranse L3.1 i prosjektet Teknologi for effektiv og bærekraftig infrysning av pelagisk fisk. Rapporten starter med et sammendrag av resultater fra beregninger, simuleringer og målinger, med anbefalinger om drift og utforming av en frysetunell. Videre oppsummeres resultater fra tidligere målinger og målinger gjennomført i forbindelse med dette prosjektet. Til slutt presenteres beregninger og simuleringer som er gjennomført i dette prosjektet, før rapporten avsluttes med en konklusjon og en referanseliste.

UTARBEIDET AV

Ole Stavset

SIGNATUR**KONTROLLERT AV**

Anne Karin Hemmingsen

SIGNATUR**GODKJENT AV**

Petter E. Røkke

SIGNATUR**RAPPORTNR**

TR A7487

ISBN

978-82-594-3625-2

GRADERING

Åpen

GRADERING DENNE SIDE

Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1	2015-05-20	Ferdig rapport

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon.....	5
2	Sammendrag anbefalinger for frysetunell	6
2.1	Sild eller makrell – kuldebehov i tunell.....	6
2.2	Emballasje	6
2.3	Varmestrøm fra produktene	6
2.4	Hastigheter over produktene.....	7
2.5	Ledeskovler og ledeplater.....	7
2.6	Reoler	8
2.7	Himling	8
2.8	Temperaturer kuldeanlegg, fordampere og luft.....	9
2.9	Fordampere.....	9
2.10	Avriming.....	9
2.11	Vifter	10
2.12	Luftretning	10
2.13	Overvåkning og måling	11
3	Målinger	12
3.1	NP Måløy 1994.....	12
3.2	NP Måløy 2006.....	13
3.3	NP Måløy 2008.....	13
4	Målinger NP Selje 2013	15
5	Målinger Nergård Senjahopen 2013	16
6	Målinger NP Måløy 2014 sommer	17
7	Målinger NP Måløy 2014 høst	18
7.1	Målingsoppsett	18
7.2	Fordampertemperaturer	18
7.3	Lufttemperaturer	19
7.4	Produkttemperaturer.....	21
7.5	Sammenligning av de to innfrysningene.....	24
7.6	Effektmålinger på viftene.....	24
7.7	Lufthastighetsmålinger	25
8	Beregninger.....	28
8.1	Kuldebehov i tunell	28

8.2	Temperaturstigning over produkt.....	29
8.3	Vifteeffekt	29
9	Simuleringer Simflow.....	30
9.1	Ledeskovler	30
9.2	Høyde på reoler	32
9.3	Lengde himling.....	33
9.4	Vifteplassering og luftretning	34
9.5	Sammenligning resultater.....	34
10	Simuleringer Modelica.....	36
10.1	Verifisering av modellen	36
10.2	Varmestrømsimuleringer med Modelica.....	37
10.3	Ulike typer produkt og fettinnhold	40
10.4	Ulik vifteregulering.....	41
10.5	Ulik lufthastighet.....	41
10.6	Ulik fordampningstemperatur	42
10.7	Ulikt antall rader	42
10.8	Oppsummering Modelica-simuleringer.....	43
11	Konklusjoner	44
	Referanser	47

BILAG/VEDLEGG

[Skriv inn ønsket bilag/vedlegg]

1 Introduksjon

Denne rapport er leveranse L3.1 i prosjektet *Teknologi for effektiv og bærekraftig innfrysing av pelagisk fisk*. Rapporten starter med et sammendrag av resultater fra beregninger, simuleringer og målinger, med anbefalinger om drift og utforming av en frysetunell.

Kapittel 3-7 gir oppsummeringer fra tidligere målinger og målinger utført i forbindelse med dette prosjektet. Kapittel 8 inneholder en del beregninger og generelle ligninger. Kapittel 9 omhandler simuleringer med simFlow og kapittel 10 omhandler simuleringer med Modelica. Rapporten avsluttes med konklusjoner.

2 Sammendrag anbefalinger for frysetunell

For å få best mulig kvalitet og drift bør en eksisterende tunell lastes som den er dimensjonert for. Dette betyr blant annet at tverrsnittet skal fylles, slik at all luft må passere produktene.

2.1 Sild eller makrell – kuldebehov i tunell

Minimum kuldebehov for frysing av sild og makrell er beregnet og vist i kapittel 8.1. Da er det antatt at temperaturen i produktene senkes fra 5 °C til -25 °C med en frysetid på 20 h (fra start til at alle produkter har nådd sluttemperaturen) og at viftene gir en varmeeffekt¹ som tilsvarer 30 % av det totale kuldebehovet (produkter + vifter). Beregningene viser at det trengs betydelig større kuldeeffekt for sildefileter med sjøvann enn for makrell fryst som rund fisk, så dette bør man ta hensyn til gjennom å tilpasse driften til type produkt. I eksisterende tunneller må man ta hensyn til installert kuldeeffekt og ikke laste en tunell med mer enn den er beregnet for. Hvis det på grunn av produksjonen likevel må lastes over kapasiteten bør tiden produktene er inne i tunnelen forlenges eller fordampningstemperaturen reduseres.

Simuleringer av Modelica-modellen (kapittel 10.3) viser at dersom silda fryses som fileten med tilsatt lake, er den totale energibruken 15 % høyere og frysetiden 20 % lengre, sammenlignet med frysing av rund sild uten tilsatt lake. Hvis en ikke kan godta så lang frysetid kan man for eksempel senke fordampningstemperaturen til -42 °C, noe som reduserer innfrysningstiden med 9 % mot en energibruksøkning på 1 % sammenlignet med frysing av sildefilet med tilsatt lake med en fordampningstemperatur på -39 °C.

Fettprosenten til produktene har også stor betydning. En høyere fettprosent gir lavere kuldebehov for produktene og dermed kortere frysetid. Simuleringer av frysing av sildefileter med lake har vist at energibruken er 10 % lavere for sild med 20 % fett, sammenlignet med sild med 7 % fett. Frysetiden for sild med 20 % fett vil være 11 % kortere enn for sild med 7 % fett. Dette viser at det kan være hensiktsmessig å variere driften av tunnelene ut i fra årstiden.

2.2 Emballasje

Pappesker med pelagisk fisk er lette å håndtere og stabile, men gir et luftlag mellom fisk og emballasje som gjør varmeovergangen dårligere og innfrysingen langsommere. I eksisterende tunneller er det oftest ikke mulig å endre hvordan produktene emballeres, men for nye tunneller bør man se på muligheter med forbedret emballasje. Laboratorieforsøk viste at frysetiden ble 61 % kortere for en eske uten lokk, sammenlignet med en eske med lokk. En eske med utskjæringer hadde 30-40 % kortere frysetid enn en eske med helt lokk. Man kan også vurdere om man skal ha mindre esker, for eksempel med 10 kg istedenfor 20 kg, for å få kortere frysetid. En kortere frysetid gir generelt lavere energibruk. Samme mengde varme må føres bort fra produktene, men energibruk på grunn av bl.a. vifter blir lavere.

2.3 Varmestrøm fra produktene

Varmen fra produktene skal først ledes gjennom produktene (konduksjon) og deretter over til luften (konveksjon). Konduksjonsvarmen avhenger av temperaturer og produktets varmeledningsevne. Frosset produkt har høyere varmeledningsevne (1,34 W/mK for makrell) enn ikke-frosset produkt (0,43 W/mK for makrell). Konveksjonen avhenger blant annet av om produktet er emballert og av hastigheten på luften. Konveksjonsvarmen avhenger av konveksjonstallet og temperaturforskjellen mellom produkt og luft.

¹ For hver tunell trengs også kuldeeffekt for å kjøle ned reoler og annet samt for varmetap gjennom vegger og tak, men normalt utgjør dette liten del av totale kuldeeffekten.

For å få høyest varmestrøm for produktene må lufttemperaturen være lav, lufthastigheten høy og det bør være minst mulig luft mellom produkt og emballasje. Produkt uten emballasje fryser raskest, men risikerer uttørking².

Simuleringer i Modelica (kapittel 10.2) har vist at varmestrømmen er betydelig større i starten av innfrysningen enn mot slutten. Dette bidrar blant annet til at fordamperne må være dimensjonert for en høyere ytelse enn gjennomsnittlig ytelse dersom man kun ser på kuldebehov og tid. Det kan være nødvendig med en ytelse som er 35 % høyere enn gjennomsnittlig ytelse.

2.4 Hastigheter over produktene

Lufthastigheten over produktene har stor innvirkning på hvor raskt varmen blir transportert fra produktene til luften, og følgelig hvor lang frysetiden til produktene blir. Dersom lufthastigheten over produktene er ulik på forskjellige steder i tunellen, vil frysetidene til produktene variere. Det kan føre til at noen produkter ikke har nådd ønsket sluttemperatur når de flyttes til fryselaget, og de må dermed etterfryses på lageret. Frysing i et lager er mye langsommere enn i en tunell, noe som kan gå ut over kvaliteten til produktet. En annen konsekvens av ujevn frysetid er at en del av produktene er for lenge inne i tunellen, noe som gir høyere energibruk enn nødvendig. Det vil derfor være gunstig med en jevn luftstrømningsprofil gjennom tunellen, slik at produktene fryses med samme hastighet.

I et tidligere prosjekt ble frysetid for en eske med tett lokk målt og beregnet. For å oppnå en kjernetemperatur på -25 °C i løpet av 20 timer og med en lufttemperatur på -30 °C , må man ha en hastighet over esken på ca. 3 m/s. Hvis hastigheten kun er på 1 m/s, men ellers samme betingelser, blir frysetiden ca. 27 timer. Hvis frysetiden skal holdes under 20 timer og lufthastigheten er 1 m/s må lufttemperaturen reduseres til -37 °C , hvilket betyr en fordampningstemperatur på -42 °C eller lavere.

Simulering i Modelica (kapittel 10.5) har vist at dersom ulik luftfordeling fører til at hastigheten i ulike hyller varierer mellom 3,2 m/s og 4,1 m/s, vil innfrysningstiden for de respektive hyllene variere med 3 timer (10 %). Dette fører imidlertid til at alle produktene må stå lengre i tunnelen, og forskjellen i sluttemperatur for de ulike hyllene er $3,4\text{ °C}$. Målinger ved anlegg (kapittel 7.4) har imidlertid vist enda større forskjeller, noe som kan tyde på at lufthastigheten i realiteten varierer enda mer.

Det går med andre ord an å kjøre med lavere lufthastigheter i tunellen, men da må fordampningstemperaturen også reduseres. I tillegg bør man ha så jevn hastighetsprofil i tunellen som mulig, som nevnt ovenfor.

2.5 Ledeskovler og ledeplater

Ledeskovler eller -plater er forholdsvis enkle å installere og kan være veldig effektive for å jevne ut hastighetsfeltet. Simuleringer i simFlow (kapittel 9.1) har vist effekten på hastighetsprofilen ved forskjellige tiltak. En ledeskovl etter himlingen gir høyere lufthastigheter for produktene øverst i tunellen. Her er det ellers lav hastighet. I tillegg blir hastighetsprofilen bedre, det vil si mindre forskjell mellom laveste og høyeste hastighet.

I tidligere prosjekter har det også blitt testet forskjellige ledeplater for luft. utfordringen ligger i hvor de skal plasseres for best effekt og ikke å være i veien for inn- og utlastering, noe som avhenger av tunnelens utforming.

² Uttørking av produkt gir også mer fukt i tunellen som blir til rim på fordamperne.

2.6 Reoler

Reolene i dagens pelagiske anlegg er tilpasset automatisert på- og avlasting ved at et lag med produktesker skyves inn og ut fra platene. Eskene er standard for industrien og inneholder 20 kg produkt. Hver reol har vanligvis mellom 11 og 14 hyller, hvor 5 esker har plass på hver reolhylle.

Simulering (kapittel 9.2) av tverrblåst tunell med to forskjellige høyder på reolene ble gjort i simFlow og resultatene viste at en høyere tunell fikk større forskjeller i lufthastigheter. I tillegg krever en høyere tunell mer luftstrøm, noe som gir mer vifteeffekt, så tunellen bør ikke være høyere enn hva som kreves for inn- og utlasting.

Målinger og simuleringer i Modelica har vist at det er forskjell i temperaturer oppe og nede på høye fordampere med ammoniakk. Hvis det er mulig anbefales det derfor å bygge tunneller med kun en reol i høyden, ikke to oppå hverandre.

Det er vanlig å ha 4 reolrader i tverrblåste tunneller. Målinger (kapittel 7.3) har vist at dette gir en temperaturøkning over produktene på 5-6 grader i starten av innfrysingen og ca. 3 grader mot slutten (viften var da regulert ned). Målinger i andre tunneler (kapittel 5) har vist en temperaturstigning på omtrent 3 grader for tunneler med 4 rader. For tunneler med 3 rader var temperaturstigningen i underkant av 3 grader, mens det ved 5 rader var en temperaturøkning på omtrent 4 grader.

Simuleringer i Modelica (kapittel 10.7) har vist at med 3 rader øker temperaturen over produktene med omtrent 4-5 grader i starten av innfrysningen, mens det med 5 rader vil være en temperaturøkning på 6-7 grader. Dette fører til at det blir større forskjell mellom produkttemperaturene i første og siste rad, noe som igjen fører til økt energibruk siden produktene i de første radene fryses til en lavere temperatur enn nødvendig.

I tunellene i Måløy er det 14 rekker med reoler og tunellen er inndelt i 3 seksjoner. Dette gir at to rekker står midt mellom to seksjoner. Sannsynligvis påvirker dette ikke normal drift, men ved lite produkt og kun lasting av en seksjon hadde det vært en fordel med jevnt antall rekker per seksjon.

2.7 Himling

En himling over produktene vil sørge for å styre luften fra viftene til motsatt side av tunellen, før den går gjennom produktreolene og fordamper og tilbake til viftene igjen. Dersom luftretningen er motsatt vei, vil himlingen hindre at luften kortsluttes og går direkte tilbake til viftene uten å passere produktene.

Det har blitt diskutert om lengden på himlingen bør være kortere enn hva den normalt er. I noen anlegg har man dessuten helt fjernet himlingen, fordi man mener luftfordelingen blir like god og lasting og lossing blir lettere. Imidlertid har det blitt vist i simuleringer med simFlow (kapittel 9.3) at dette gir plasser i tunellen med svært lav lufthastighet, og dette bør derfor unngås. I begge tilfellene er det altfor mange av produktene som har nesten stillestående luft over og/eller under. Lengden på himlingen kan optimaliseres med hensyn på lufthastigheten, men dette er tidkrevende og andre tiltak, som ledeskovler, har betydelig større effekt på luftfordelingen. Avstand mellom produkter og himling bør ikke være større en nødvendig for inn- og utlasting.

2.8 Tunnelgeometri

Dersom man skal bygge en tunnel uten beskrakninger i forhold til eksisterende bygningsmasse bør man sørge for nok volum til å snu luftretning 90°. Samtidig er det viktig å unngå at volumet blir for stor siden det øker sirkulert luftmengde og dermed viftearbeid og trykktap. I (Nordtvedt et.al 2003) er det vist at vendekanalene bør være minimum 0,8 m og maks 1 m. Man bør også sørge for at hjørnene er avrundet slik at man unngår unødig trykktap. Det er også viktig å sørge for at avstand mot kortveggen er minst mulig for å unngå falskluft.

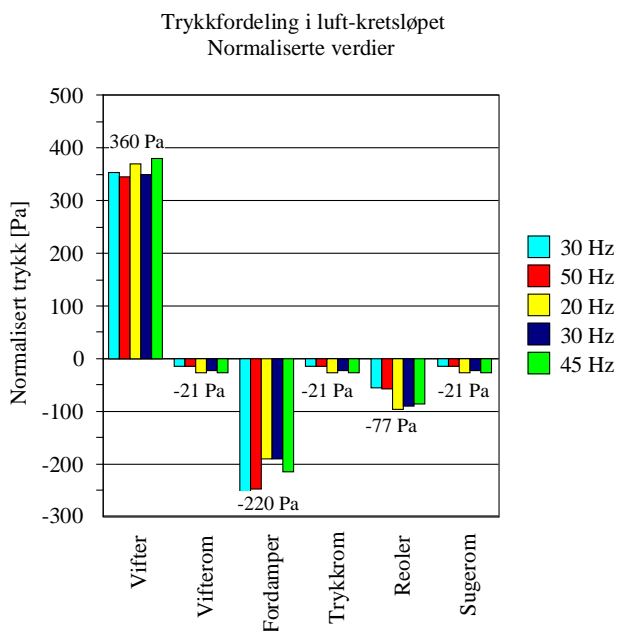
2.9 Temperaturer kuldeanlegg, fordampere og luft

Et eksempel på temperaturer ved et tilfelle (6 timer ut i innfrysningen) viser $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ på toppen av væskeutskilleren og $-36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-33,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ på øverste respektive nederste logger på fordamperrør. Temperaturen på luften ut av fordampere var da målt til $-29,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ oppe og $-30,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ nede. Etter viftene har temperaturen økt til $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Før fordampere hadde luften oppe en temperatur på $-23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ og nede på $-22,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Årsaken til temperaturforskjellen mellom væskeutskilleren og fordampere og de ulike delene av fordampere er trykktap. Simuleringene i Modelica viser omtrent samme temperaturer for kuldemediet i fordampere og på lufta ut av fordampere (kapittel 10.1).

2.10 Fordampere

Fordampere dimensjoneres ut fra hvor mye og hvilket produkt som skal fryses. Dessuten gjøres en dimensjonering av vifter og fordampere parallelt, slik at luftmengde blir riktig og at hastigheten over produktene blir stor nok for å fryse innenfor ønsket frysetid.

Som nevnt i kapittel 2.6 har målinger og simuleringer vist at det blir en temperaturdifferanse mellom topp og bunn av fordampere på opp mot $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det anbefales derfor å ha lavere fordampere for at ikke få for store temperaturforskjeller. Fordampere bør likevel dekke hele tunellvernsnittet. Fra (Nordtvedt et.al 2003) er det vist at fordampere betyr mest i forhold til trykktap slik at riktig dimensjonering av disse er viktig.



Figur 2.1: Trykfall over de ulike delene på luftsiden i en tunnel.

Det er ikke bare dimensjonering av fordampere som har betydelse for driften, avriming er også viktig, mer om det i neste kapittel.

2.11 Avriming

Rim eller is på fordampere reduserer varmeledning og kan hindre luftgjennomstrømning. Dersom det dannes rim i løpet av innfrysningen, kan dette smelte og renne nedover fordampere hvis det er plussgrader i tunnelen mellom innfrysningene (se kapittel 7.7). Vannet fryser på igjen der det er minusgrader (nederst i fordampere). Hvis det går mange innfrysninger etter hverandre uten avriming blir det mer og mer is nederst

i fordamperne. Det anbefales derfor at man avrimer ofte, gjerne etter hver innfrysing, slik at man unngår is på fordamperne. Avriming oftere gir mindre rim/is som skal fjernes og man trenger derfor kortere avriming. Ved mye is må man kjøre avriming i flere timer og med vifter i gang, noe som er energikrevende.

Dårlig avriming, ujevn fordeling av kuldemedier og ufullstendig drenering av kuldemedievæske under avriming kan også gi økt isdannelse på fordamperne.

2.12 Vifter

Viftene dimensjoneres slik at luftmengden i tunnelen gir ønsket/akseptert temperaturstigning over produktene. De bruker energi både direkte og indirekte siden de avgir varme til luften i tunnelen, og denne varmen må fjernes av kuldeanlegget. Mot slutten av fryseperioden kan viftevarmen være like stor som varmen fra produktene. I starten av innfrysingsperioden, mens den latente varmen i produktene skal fjernes, er det viktig med høy lufthastighet. Mot slutten av innfrysingsperioden er varmestrømmen fra produktene lavere og lufthastigheten kan da reduseres. Dersom viftehastigheten reduseres mot slutten av innfrysingsperioden vil frysetiden til produktene gå litt opp, men energiforbruket vil reduseres betydelig. Ved hjelp av simuleringer i Modelica viste Walnum, Andresen et al. (2011) at energiforbruket kunne reduseres med 33 % ved å tillate en 14 % lengre innfrysningstid. I programmet kunne viftene frekvensreguleres ned til 25 % av maks hastighet. Viftene ble regulert slik at lufttemperaturen skulle øke med minst 2 °C over produktene. I starten var det mye varme som skulle avgis og da gikk viftene for fullt. Etter ca. 5 timer begynte viftene å regulere ned. Resultatene ble sammenlignet med en simulering hvor viftene gikk med jevn hastighet under hele innfrysingen.

For å redusere lufthastigheten kan man enten slå av en del av viftene eller regulere ned turtallet med f.eks. en frekvensomformer. Å regulere ned turtallet gir mer energisparing enn å slå av vifter. Målinger har vist at strømforbruket til de viftene som fortsetter å gå når andre i samme seksjon slås av går litt opp. Hvis en av tre vifter slås av gir det derfor mindre enn 33 % reduksjon i vifteeffekt. En reduksjon i turtall med 33 % gir en reduksjon i vifteeffekt med ca. 70 %.

Modelicasimuleringer (kapittel 10.4) har vist at innfrysningstiden reduseres 7 % dersom viftene kjøres for fullt i hele perioden sammenlignet med et driftsmønster hvor tre av ni vifter slås av etter 14 timer, og ytterligere to slås av etter 17 timer. Dette innebærer imidlertid en energibruksøkning på 10 %. Det er verdt å merke seg at viftereduleringen har mindre innvirkning på frysetid og energiforbruk enn typen produkt som fryses (jf. kapittel 2.1 og 10.3).

2.13 Luftretning

I simFlow (kapittel 9.4) ble en tunnel med vifter plassert midt oppå himlingen og med to ledeskovler simulert. Ledeskovlene ble plassert på samme høyde men på hver side av tunnelen. I simT6left blåses luften over himlingen, over produktene og gjennom fordamperne. I simT6right er luftretningen omvendt. Simuleringene viser at begge har et jevnere hastighetsfelt enn "baseline case". Laveste og høyeste hastighet for simT6left var 1,6 m/s og 7,0 m/s; for simT6right var de 3,1 m/s og 7,3 m/s. Samme verdier for "baseline case" var 0,1 og 8,6 m/s. Fordamperen virker som et filter som jevner ut hastighetene, noe man ser tydelig i simT6right.

Det ble målt på produktesker ved NP Selje (kapittel 4), hvor det finnes to like tunneller men med ulik luftretning. Målingene ble gjort etter innfrysningen med innstikkstermometer. Målingene viste små forskjeller mellom de to tunnelutforminger, men en liten fordel viser likevel tunnelen med fordamper i luftstrømmen før varene, siden luften som treffer varene har lavere temperatur.

Denne løsningen med vifter plassert midt på himlingen er imidlertid dyrere å bygge på grunn økt dimensjonering av bærebjelkene. Mest vanlig er det å bygge med viftene plassert rett over fordamper. Med den plassering vil det være mest hensiktsmessig å la viftene blåse over himlingen, gjennom produkt og fordamper da det gir minst trykktap og høyest lufthastighet over produktene.

2.14 Overvåkning og måling

Hvor mye og hvilke data som logges varierer fra anlegg til anlegg. Generelt virker det å være lite overvåking av effekt- og energibruk. Det gjør at det kan være vanskelig å se "energisluk", men også utfordrende å se effekten av forskjellige energieffektiviserende tiltak. I eksisterende anlegg kan det være vanskelig å få plass i elskap for å installere målere, men for nye anlegg bør det være med.

Det finnes systemer for overvåking av energibruk, som i tillegg kan gi forbedringsforslag. Det er viktig å skille energibruk til kuldeanlegg og vifter fra resten av fabrikk. Da går det å få et mer nøyaktig tall på spesifikk energibruk per tonn produkt, hvilket kan sammenlignes.

Det er vanlig å ha måling av lufttemperatur i tunellen og styre driften delvis av denne. Det kan i tillegg være bra å ha noen flere sensorer for måling av lufttemperaturer. Hvis sensorer plasseres på forskjellige høyder, før og etter produkt samt etter fordampere, kan det gi indikasjoner på skjevfordeling og rim og isdanning på fordamperne.

Innstikksmålinger på ferdigfrosne produkter gjøres også, men med varierende nøyaktighet. Målinger (kapittel 7.4) har vist at målinger fra siden av en pakke gir 1,5-2,5 °C lavere temperatur enn senter av esken. Det er mest praktisk å måle fra siden, men da må dette tas hensyn til. I tillegg bør det heller ikke gjøres målinger i tilfeldige reoler, men kjente "problemprodukter". De er som oftest plassert høyt opp og nære fordamperne. For å finne riktig plass må man i første omgang gjøre mange målinger, og deretter velge ut noen plasser. Målinger har vist at med samme type produkt og samme driftsmønster blir temperaturforløpet for en gitt plassering nokså likt.

For å få lave nok produkttemperaturer og lavt energibruk er det viktig å tilpasse driften til type og mengde produkt, men for å få det til må man ha oversikt over hva som skjer under innfrysingen.

3 Målinger

3.1 NP Måløy 1994

Simuleringer av fordampernes ytelse ble gjort i EVAC. Med dette program kunne man finne lufttemperaturer ut av fordamperen, k-verdi, resirkulasjonstall og ytelse for forskjellige fordampningstemperaturer og inn-temperaturer på luften. Kompressorenes ytelse ved de forskjellige driftstilstander er beregnet ved hjelp av dataprogrammet COMP1 fra Sabroe Refrigeration A/S, Danmark. Resultatene viser at det er god overensstemmelse mellom kompressor- og fordamperytelsene.

Som simuleringverktøy for lufthastigheter i tunnelen har en benyttet FLUENT. Tre sett med simuleringer ble utført. I den første suger viftene luften gjennom fordamperen, i den andre blåser viftene luften gjennom fordamperen og i den tredje ble det plassert en ledeskjerm/ledeskovl for å lede luften inn under himlingen (og luften suges gjennom fordamperen). Simuleringer av lufthastigheter i tunell uten ledeskovl (hvor viftene suger luften gjennom fordampene) viser at man får en virvel oppe under den falske himlingen, hvor en har tilbakestrømming av luft. Det ser ut til at den dårligste posisjonen er under himling midt i tunnelen (hastighet under 1 m/s). Ujevn luftfordeling gir i tillegg til dårlig innfrysing også dårlig utnyttelse av fordamperen. Resultatene fra simuleringer av lufthastigheter hvor viftene blåser luften gjennom fordamperen viser en jevnere luftfordeling over tunneltverrsnittet. Fordamperen antas å virke som en trykkutligner og man får ikke lommer med stillestående luft eller tilbakestrømming av luften. Laveste hastighet er øverst, nærmest fordamper, og der er lufthastigheten mellom eskene ca. 3 m/s. Resultatene fra simuleringen av lufthastigheter i tunell med ledeskovl viser en noe bedre luftfordeling over tverrsnittet enn for samme tunell uten ledeskovl, men ikke så god som for en tunell hvor en blåser luften gjennom fordamperen. I simuleringene er viftene plassert omtrent midt på himlingen.

Et laboratorieforsøk med måling av fryseforløpet ved forskjellige typer lokk ble gjennomført. Lufttemperaturen var -32 °C og lufthastigheten ca. 4 m/s. Starttemperaturen ved disse forsøkene var $10\text{--}15\text{ °C}$. Innfrysingstiden for en 20 kg makrelleske uten lokk er ca. 8 h. Med samme lufttemperatur og -hastighet, men med lokk vil en derimot få en innfrysingstid på ca. 20 timer. Målinger av en eske med tett lokk og forskjellige lufthastigheter og -temperaturer viste at hvis ønsket innfrysingstid er 18 h og lufthastigheten er 1 m/s, må en senke lufttemperaturen til -41 °C , hvilket betyr en fordampningstemperatur mellom -46 °C og -48 °C .

For å verifisere simuleringresultatene og beregningene ble det utført temperaturmålinger på de aktuelle tunnelene. Målingene ble foretatt mens anlegget var i regulær drift. Arbeidet besto av registrering av lufttemperatur og innfrysingstid på eksisterende tunneller og registrering av innfrysingstid på tunell med ledeskovl.

I tillegg utførte bedriften omfattende manuelle temperaturmålinger gjennom å bore hull og måle med innstikkstermometer. For en tunell uten ledeskovl og en innfrysingstid på ca. 23,5 h viste målinger fra hylle 9 at alle de nedre reolene hadde en temperatur på $-22,3\text{ °C}$ eller lavere (kaldest var på $-30,4\text{ °C}$). For de øvre reolene var temperaturene høyere. Middelttemperaturen av alle produkter på hylle 9 i raden nærmest fordamper var $-18,73\text{ °C}$, med varmest enkelttemperatur på $-10,7\text{ °C}$. Ved neste innfrysing ble det ikke satt inn reoler øverst nærmest fordamper (mengde produkt var 115 tonn istedenfor 128 tonn). De manuelle målingene ble igjen tatt i hylle 8 eller 9. Frysetiden denne gang var 25 h. Høyest temperatur ble denne gang -19 °C , hvilket var øverste reolen i raden lengst fra fordamperen. Neste to måleserier ble utført på en tunell med ledeskovl installert for å lede mer luft inn under himlingen. Resultatene viste en jevnere temperaturfordeling over tunneltverrsnittet.

Simuleringer, beregninger, målinger og observasjoner har gitt data som viser de muligheter og begrensninger som kuldeanlegget og innfrysingsutstyret har. Målingene viser at ønsket innfrysingstid på 18 timer ikke er oppnådd. Årsakene til dette er:

- Større innlastet mengde enn dimensjoneringsgrunnlaget (116-132 tonn isteden for 106 tonn)
- Skeivfordeling av luft i tunnelene

Installerte ledeskovler har resultert i bedre luftfordeling over produktene og jevnere produkttemperaturer.

Referanse: Aalvik, Johan, *Frysing av makrell i esker i tverrblåst innfrysingstunell*, STF11 F94007, 1994.

3.2 NP Måløy 2006

I 2006 ble anlegget i Måløy analysert i forbindelse med en masteroppgave og doktorgrad (NTNU). Da var anlegget inndelt i to systemer; ett som hadde fordampningstemperatur på $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ og ett på $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hovedårsaken til dette var at en del frysetstyr (gyrofrysere) trengte den laveste temperaturen, mens $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ var nok for frysetuneller og platefrysere.

Alle skruekompressorene ble regulert med sleideregulering. Dette ga en trinnløs regulering mellom 100 % og 10 %. Stempelkompressorene ble regulert i trinn ved inn- og utkobling av sylindere. UNISAB koblet inn og ut kompressorer i en gitt rekkefølge. For -38 -systemet var det en av stempelkompressorene som startet først, deretter skruekompressorene i størrelsesorden, fra minst (220 kW) til de største (795 kW). Oftest regulertes to kompressorer ned eller opp sammen (samme sleideposisjon).

Bedriften kontrollsystem logget en stor mengde data fra hele kuldeanlegget og disse ble samlet inn og behandlet videre i beregningsprogram. Noen målepunkter ble valgt ut og data fra to perioder ble analysert for å finne forbedringspotensialet for kompressordriften. Begge måleperiodene varte knapt 10 dager; den ene viste driften mens det var relativt full drift i innfrysingsanlegget, mens den andre måleserien viste driften mens det var mindre drift (normal drift).

Verdiene fra loggesystemet ble brukt til dellastkarakteristikker for hver kompressor. Disse viste at det ikke er energieffektivt å kjøre kompressorene på dellast, siden effektbehovet er nesten 80 % av full last når kuldekapasiteten er nede i 50 % av full kapasitet.

Dellastkurvene ble deretter brukt i en optimaliseringsmodell, for å finne en bedre drift av kompressorene, med lavere energibruk. To forskjellige reguleringsalternativer ble brukt; det ene der kun én kompressor ble regulert med sleide og resterende kompressorer enten var på eller av og det andre alternativet var å koble en frekvensomformer til én av kompressorene (og ikke bruke sleideregulering). Beregningene viste at det ikke var så stor forskjell mellom disse alternativene, hvilket er naturlig for et system med kompressorer i flere forskjellige størrelser. Regulering med en frekvensomformer er sannsynligvis litt bedre i virkeligheten enn hva beregningene viste. Basert på produksjonstall og -dager ble det estimert at bedriften kunne tjene mellom 260 000 og 430 000 NOK per år ved å forbedre reguleringen av kompressorene.

I 2006 ble det også gjort temperaturmålinger i frysetunellene til NP i Måløy. Termoelementer ble brukt for målingene av lufttemperaturer mens produkttemperaturer ble målt med temperaturloggere. Det ble målt på flere plasser i tunellen og i flere tuneller. Det var ikke mulig å måle lufthastigheten i tunellen når anlegget var i gang. Et pitot-rør ble plassert over himlingen, for å måle lufthastigheter der, men resultatene fra denne var for ujevne for å kunne brukes. Det kunne konkluderes med at det er en utfordring å plassere målerne nøyaktig, så det er derfor viktig å ha mange nok for å se et mønster. I dette prosjektet ble målingene brukt til å verifisere simuleringsmodeller. Målinger kan også brukes til å kontrollere at innfrysingshastigheten er som forventet.

3.3 NP Måløy 2008

Norway Pelagic AS og Domstein Fish AS hadde et felles kuldesystem i sine foredlingsanlegg på Trollebø industriområde ved Måløy. Dette anlegget ble besøkt 2. og 3. oktober 2008. Prosjektet hadde som ambisjon å kartlegge all effektforbruk ved anlegget og driftsperioder for de ulike komponentene i kuldeutstyret for å få en oversikt over effekt- og energibruken på de ulike delene av anlegget. Etter ombygging av kompressorstyringen for anlegget har målesystemet blitt vesentlig forenklet. Det viste seg at det nye måleopplegget for kuldeanlegget ikke var forberedt til å kunne samle inn data for hvordan kompressorene gikk under drift (dvs. trykk, temperaturer, sleideposisjon kapasitetsregulering, strømforbruk etc.). Disse dataene ble bare registrert lokalt på hver kompressor uten at de ble overført til den sentrale databasen for driftsdata. Det viste seg at det ville medføre en god del omprogrammering av målesystemet for å få dette til. Det ble i dette prosjektet derfor konsentrert om effektbruk på alle komponenter relatert til kuldeanlegget og hvilken funksjon de hadde og når de var i drift. Data fra effektmålinger på komponenter finnes i tabell i

vedlegg til notatet. Det ble gjennomført befarings på alle produksjonssteder for å kartlegge hvordan driften foregikk og ut fra produksjonsdata ble det gjort en vurdering av energibruken og muligheter for sparing av energi.

Anlegget var fra starten av bygget med to ulike temperaturnivå. Det vil si at gyrofryserne og de to store fryselagrene gikk på -42 °C i fordampningstemperatur, mens frysetunneler, platefrysere og fõrlager gikk på -38 °C i fordampningstemperatur. Dette er senere gjort om slik at systemet nå driftes med felles sugeledning og dermed samme fordampningstemperatur (-39 °C) for at kompressorene skal kunne utnyttes bedre.

Mye utstyr som pumper er i drift og trekker unõdig effekt og energi. Det er gjort mye for å redusere energibruket på anlegget. Eksempler på dette er:

- Ny styring av kompressorer som gjør at en kan kjøre kompressorene med mer optimal rekkefølge for start og stopp
- Bedre utnyttelse av kompressorer ved å kjøre med felles sugetrykk i de to kuldesystemer (kompressorene har felles sugeledning)
- Vifter i frysetunneler stoppes etter hvert som fryseprosessen går mot slutten
- Vifter i fryselager stoppes på dagtid når det er høy aktivitet på innfrysingsutstyr
- Frekvensstyring på den ene sjøvannspumpen
- Varmegjenvinning fra oljekjølerkrets på kompressorer

Tall fra kartleggingen er oppsummert i vedlegget til rapporten.

Referanse: Eikevik, Widell, *Målinger på anlegget til Norway Pelagic AS og Dosmtein Fish AS i Måløy*, Notat. 2008, .

4 Målinger NP Selje 2013

Ved besøket orienterte driftspersonalet om anlegget og informerte om driften, videre ble anlegget gjennomgått, med spesielt fokus på frysetunnelene. Seljeanlegget mottar kun makrell og hadde en produksjon på 40 000 tonn i 2012. Innfrysningskapasiteten er på 500 tonn per dag, og lagerkapasiteten er 7 000 tonn. Normalt fileteres omtrent 10 % av mottatt kvantum med ca. 50 % utbytte. Hoveddelen blir frosset i 20 kilos standard pappesker. Avfall blir levert til nærliggende sildoljefabrikk.

Det ble valgt å måle i to geometrisk like tunneler, men bygget slik at luftretning i den ene tunnelen ga luftstrøm gjennom fordamper før innløp varer (tunell 7), mens den andre hadde motsatt luftstrøm slik at luften gikk over varene før innløp fordamper (tunell 6). Loggerne ble delvis festet i luftstrømmen etter fordamper og i oppspente snorer etter varene.

Temperaturmålingene viser rask temperatursenking etter oppstart av innfrysingen. Lufttemperaturen ved innløp varer er som forventet jevn siden den er godt blandet gjennom vifter og kanal. En logger etter produktene, øverst før luften går inn på fordamper, viser samme temperatur som loggerne før produktene. En forklaring på dette kan være at en luftstrøm ("falskluft") går under himlingen uten å ta opp varme og treffer loggeren plassert øverst, eller at lufta er stillestående i dette området. Det er trolig også skjevheter i luftfordelingen inne i tunnelene, erfaringene fra slike målinger viser ofte betydelig større hastigheter ved gulvet enn under himlingen.

Etter stabilisering av driften etter startfrysingen ligger inngående lufttemperatur på $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ og faller nesten lineært til $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av 19-20 timer. Dette er noe høye temperaturer og kan skyldes liten kompressorkapasitet, men siden driftspersonalet anga at sugetrykket vanligvis var ca. $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ tyder det på betydelige trykktap fra tunneler til væskeutskiller og/eller lite effektive fordampere. Temperaturforskjellene mellom inn- og utløp fra varene nederst er i en lang periode i starten relativt konstant ca. $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beregnet luftmengde og hastigheter ut fra oppgitt luftmengde viser at en trolig har lave hastigheter som gir lav varmeoverføring fra varene og derfor liten oppvarming av luften.

Lufttemperaturene inn på varene er under hele fryseperioden klart lavere i tunell 7 enn i tunnel 6 og under slutfrysingen er forskjellen trolig 1-3 $^{\circ}\text{C}$. En årsak er at viftevarmen med arrangementet i denne tunnel tilføres etter fordamper/før innløp varer og spesielt ved slutfrysingen har dette effekt på innfrysingen.

Det er også fastmonterte temperatursensorer før og etter produktene i tunnel 6 og 7, og for tunnel 6 viser de at det er liten forskjell mellom temperaturen før og etter produktene, mens forskjellen er forholdsvis stor i tunell 7. En forklaring til den lave forskjellen i tunell 6 kan være at mye av luften har passert produktene uten å ha tatt til seg noe varme. En annen forklaring kan være at det er vertikale temperaturforandringer i tunnelen, og dersom sensorene er plassert ved ulik høyde, er det ikke sikkert at det er den samme lufta som passerer de to sensorene. Den store temperaturforskjellen over produktene i tunell 7 kan forklares med at sensorene er plassert i ulik høyde. Det vil da ikke være den samme lufta som passerer sensor 10 og sensor 11, og dermed kan ikke målingene sammenlignes direkte.

Målingene viser også en tydelig lavere lufttemperatur oppover fordamperen, i starten er lufttemperaturen ca. $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lavere øverst enn nederst, og mot slutten er temperaturforskjellen ca. $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette skyldes trolig den høye fordamperen som er seksjonert, men som nederst har et langt stigerør og sannsynligvis stort trykktap. Felles stigerør for alle seksjoner gir ekstra trykktap.

Bedriften har imidlertid egne rutiner for kontroll av varetemperaturen etter innfrysing. Esker blir da tatt ut fra steder i tunnelene hvor en erfaringsmessig vet "henger etter" med høy temperatur. Målingene gjennomføres ved innboring av små hull mot midten av varene i eskene og temperaturen måles med innstikkstermometer. Slik målingene er gjennomført viser de trolig ikke de høyeste temperaturer i varene, men indikerer likevel at varene er rimelig godt frosset. Som forventet er temperaturene høyest ved luftutløp fra varene, noe som skyldes temperaturstigningen gjennom varene. Selv om høyeste temperatur er målt øverst i tunnelen med fordamper etter luftstrøm gjennom varene er det små forskjeller mellom de to tunnelutforminger, en liten fordel viser likevel tunnelen med fordamper i luftstrømmen før varene.

Referanse: Magnussen, Nordtvedt, Stavset, Gullsvåg. *Norway Pelagic Selje AS, Anleggsgjennomgang og målinger*. Notat. 2013.

5 Målinger Nergård Senjahopen 2013

Ved besøket orienterte teknisk sjef Halgeir Hansen om anlegget og informerte om driften, videre gjennomgikk en anlegget og spesielt frysetunellene. Anlegget på Senjahopen mottar sild hvor en stor del fileteres. Anlegget har 8 fileteringsmaskiner samt to dyptrekkere. Driftsperioden er fra og med oktober til og med januar. Innfrysningsskapasiteten er på ca. 480 tonn per dag, og lagerkapasiteten er et bufferlager på 5000 tonn. I tillegg er det et frysehotell. Silda fileteres med ca. 50 % utbytte og filetene fryses i 20 kilos vakuumposer med ca. 1,5 l sjøvann og pakkes i 20-kilos esker med lokk og fryses i frysetunell med frysetid på ca. 19 timer.

Det ble planlagt å gjennomføre enkle temperaturmålinger i de tre tunelltypene som eksisterer i Senjahopen for å få et inntrykk av driftsforholdene og slik at de tre ulike tunellene kan sammenlignes. De tre tunelltypene har forholdsvis lik utforming, men ulik størrelse. I tunnel 4 er det tre rader med reoler, tunnel 2 har fire rader, og tunnel 7 har fem rader. Tunnelene har ikke himling.

Dersom man sammenligner kurvene for de ulike tunellene, kan man se at temperaturøkningen over produktene er noe større i tunell 7 enn i de to andre tunellene, 4 grader i forhold til 3. Det kommer trolig av at tunnel 7 har flere rader med reoler. En større temperaturøkning kan være en indikator på større variasjon i innfrysningstid for produktene. Det er også litt forskjell på lufttemperaturen i de ulike tunellene. For tunell 2 er temperaturen etter produktene ved starten av innfrysningsperiodene omtrent $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, og denne reduseres til i underkant av $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av periodene. For de to andre tunellene er temperaturen etter produktene $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i starten av innfrysningsperiodene og reduseres til omtrent $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette kan være årsaken til at innfrysningsperioden i tunell 2 ser ut til å være noe lenger enn for de andre tunellene.

Årsaken til at lufttemperaturen er høyere i tunell 2 kan være høyere temperatur i fordampere grunnet for lav kapasitet til kuldeanlegget, eller for små eller for lite effektive fordampere. Til tross for høyere lufttemperatur er det ikke gitt at innfrysningsperioden blir lenger da høyere temperatur kan kompenseres med høyere lufthastighet. Det er ikke gjort målinger eller beregninger av lufthastigheten i tunellene.

Generelt, og spesielt for tunell 7 og 4, viser temperaturmåleren som er plassert øverst etter produktene omtrent samme temperatur som målerne plassert før produktene. Dette viser at lufta som passerer denne måleren ikke har tatt til seg varme, noe som tyder på at lufta ikke har passert noen produkt eller er stillestående i dette området. For å få en jevnere vertikal temperaturfordeling kan det bygges en falsk himling i tunellene. Denne himlingen vil sørge for at all luft må passere produktene, noe som kan gi en jevnere innfrysning.

Referanse: Gullsvåg, Stavset. *Pelagisk innfrysning, Nergård Senjahopen*. Notat 2013.

6 Målinger NP Måløy 2014 sommer

Målinger av lufthastigheter, lufttemperaturer og produkttemperaturer ble gjort i tre tuneller. En del av resultatene har blitt brukt til å verifisere simuleringsmodellene.

Lufthastighetsmålingene ble gjort med en håndholdt TSI-måler ved et tilfelle. Målingene ble fortatt ved at to seksjoner var fylt opp og alle viftene var i gang. Resultatene ble varierende fra 1,3 m/s til 10,8 m/s.

Det ble også plassert ut temperaturloggere i frysetunellene. De målte temperaturer på luft og i produkt. Starttidspunkt var vanskelig å fastsette eksakt siden målingene ble gjort i seksjon 2 og dermed delvis startet mens det fortsatt foregikk innlastingen. Noen av loggene viste høyere eller lavere lufttemperaturer enn forventet og de var sannsynligvis plassert for nært vegg eller fordamper.

Flere produkter hadde ikke nådd ønsket sluttemperatur når tunellene tømmes. For å finne ut hvorfor, bør dette undersøkes videre. Det kan bl.a. gjøres med gjennomgang av kuldeanlegget og temperaturmålinger på fordamperrør. Temperaturmålinger i produktesker på "verste plassen" (høyt opp nærmest fordamper) bør også gjøres. Bedriften bør gjøre egne, mer omfattende målinger av produktet ved utlasting.

Temperaturmålinger i et snitt av tunellen kan vise om luften tar opp mye eller lite varme over produktene og skjevfordeling av luft kan dermed avdekkes.

Referanse: Widell, *Norway Pelagic – Måløy juni 2014*. Notat. 2014

7 Målinger NP Måløy 2014 høst

Det ble gjennomført målinger av luft-, fordampner- og produkttemperaturer samt lufthastighetsmålinger og vifteeffektmålinger i perioden 4.11.2014 – 8.11.2014. I løpet av perioden mottok anlegget sild som hovedsakelig ble filetert og pakket i 20 kg esker sammen med 2,5 liter lake. Noe sild ble også pakket rund i 20 kg esker uten lake i de innfrysingene som startet 6. nov.

Normal drift av en kald tunnel er å la alle viftene (9 per tunnel) gå for fullt i 14 h, deretter blir midtviftene i hver seksjon skrudd av. Etter 17 h blir to vifter til skrudd av; de i seksjon 1 og 3 som er nærmest seksjon 2.

Det ble gjennomført to innfrysninger i hver tunnel, en som startet 4. november, og en med start 6. november. Ved innfrysingene den 4. november ble tunnelene driftet som normalt, men siden det ikke kom mer fisk før 6. november ble produktene stående i omtrent 40 timer før de ble tatt ut av tunnelen. Ved innfrysingene den 6. november ble viftene i tunnel 4 regulert på en annen måte. Alle viftene gikk for fullt i 16 timer, og deretter ble midtviftene i hver seksjon skrudd av. Etter 19 timer startet de med uttak fra tunnelen. I tunnel 5 ble viftene regulert som normalt og uttaket ble startet etter 19 timer. Stikkprøvemålinger av produkttemperaturen viste imidlertid for høye temperaturer og utlasteringen ble stoppet. Produktene ble satt tilbake i tunnelen og viftene skrudd på. Etter ytterligere 15 timer ble utlasteringen gjenopptatt.

7.1 Målingsoppsett

Målingene ble gjennomført ved to innfrysninger i hver av tunnelene 4 og 5, totalt 4 innfrysninger. Begge tunnelene ble utstyrt med temperaturloggere på fordamperrørene og bak fordampneren, samt at loggere ble festet på reolene for måling av lufttemperaturer. I tunnel 4 ble det også installert en lufthastighetsmåler og temperaturlogger over himlingen, og det ble plassert loggere i noen produktesker. Under innfrysningene ble vifteeffekten til viftene i de to tunnelene målt på ulike tidspunkt. Alle disse målingene ble gjennomført på seksjon 3, den siste seksjonen som fylles.

I tillegg til målingene med loggere ble det foretatt en del stikkprøver av temperaturen til produktene som ble tatt ut av tunnelene. Bedriften gjennomfører også stikkprøver, men kun av 3 tilfeldig utvalgte esker per tunnel, og det markeres ikke hvor disse eskene var plassert.

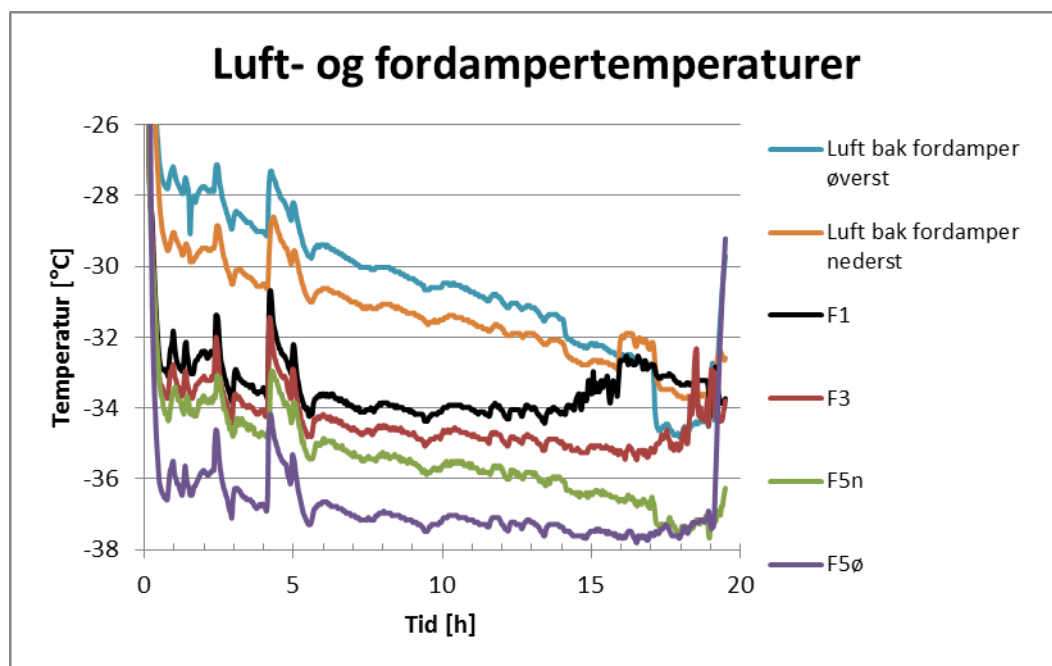
7.2 Fordampertemperaturer

Temperaturen målt på fordamperrørene i første innfrysningsperioden i tunnel 4 vises i Figur 7.1. Av figuren kan man se at det er en forskjell på ca. 3 °C mellom nederste og øverste fordampnerseksjon (F1 og F5ø), samt en forskjell på 1,5-2 °C mellom nederste og øverste del av den øvre fordampnerseksjon (F5n og F5ø). Temperaturforløpen er lik for de andre innfrysningene.

Temperaturen i væskeutskilleren (ikke med i grafen) lå i denne perioden på omtrent -39 °C, men varierte noe i starten av perioden, hvilket gjenspeiles i temperaturene på fordamperrørene. Fra omtrent 6 timer ut i innfrysningsperioden var temperaturen i væskeutskilleren tilnærmet konstant. Etter 6 timer er temperaturen ved F1 -33,6 °C mens temperaturen øverst er -36,6 °C, en differanse på 3 °C. Differansen er ganske lik frem til 14 timer.

Etter 14 h (da man slår av 1/3 av viftene i tunnelen) ser man en endring i mønstret. Da stiger temperaturen på det nederste fordamperrøret og etter hvert også på F3. Forskjellen på temperaturen på F5n og F5ø blir gradvis mindre, og etter 17 h er de nærmest lik hverandre. Temperaturen bak fordampneren øverst faller med ca. 2 °C ved 17 h og temperaturen bak fordampneren nederst hopper både opp (ved 16 h) og ned igjen (17 h). Temperaturen nederst bak fordampneren er etter 17 h lavere enn temperaturen målt på fordamperrørene i nederste fordampnerseksjon.

Mye av det merkelige som skjer med temperaturene er sannsynligvis på grunn av at det sitter mye is på den nederste fordampneren, noe som hindrer luften å strømme gjennom.



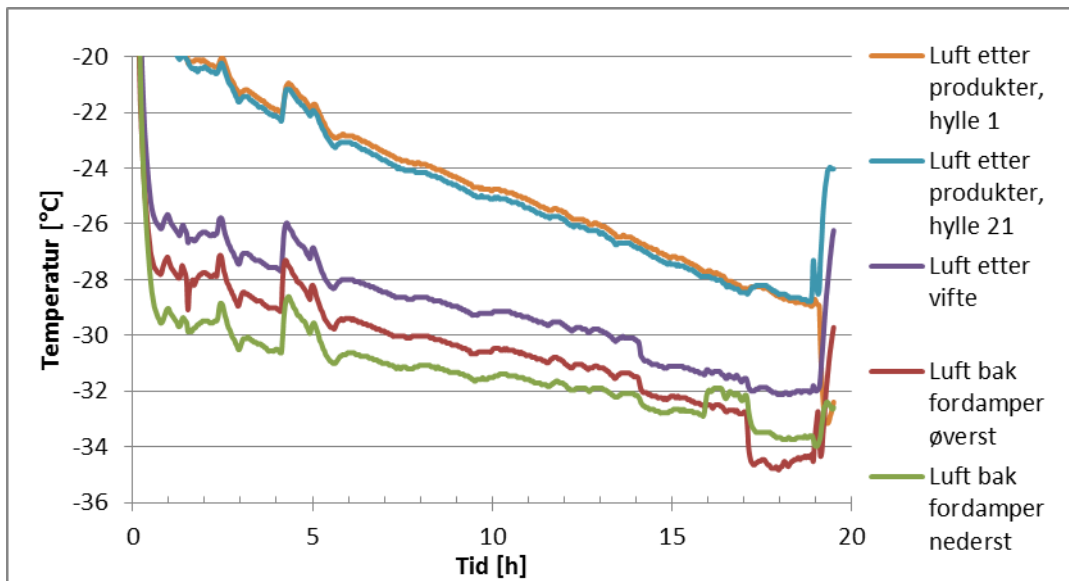
Figur 7.1 Luft- og fordampertemperaturer i tunnel 4 med start 4. november.

7.3 Lufttemperaturer

Figur 7.2 viser temperaturer bak fordamperen ved innfrysningen med start 4. november i tunnel 4 og hvor mye temperaturen øker på grunn av viftevarmen som tilføres og på grunn av produktene. Siden temperaturen er ulik oppe og nede bak fordamperen, kan man ikke si nøyaktig hvor stor temperaturøkning viftevarmen forårsaker, men det er grunn til å tro at det er minimum 2 grader mens alle viftene er i drift. Ved denne innfrysningen ble viftene regulert som normalt, det vil si at én vifte ble skrudd av etter 14 timer, og ytterligere én etter 17 timer. Etter 14 timer kan man se at temperaturen etter vifter synker siden en vifte blir avskrudd. Man kan også se at temperaturforskjellen mellom lufta før og etter viftene reduseres, noe som viser at viftene tilfører mindre varme.

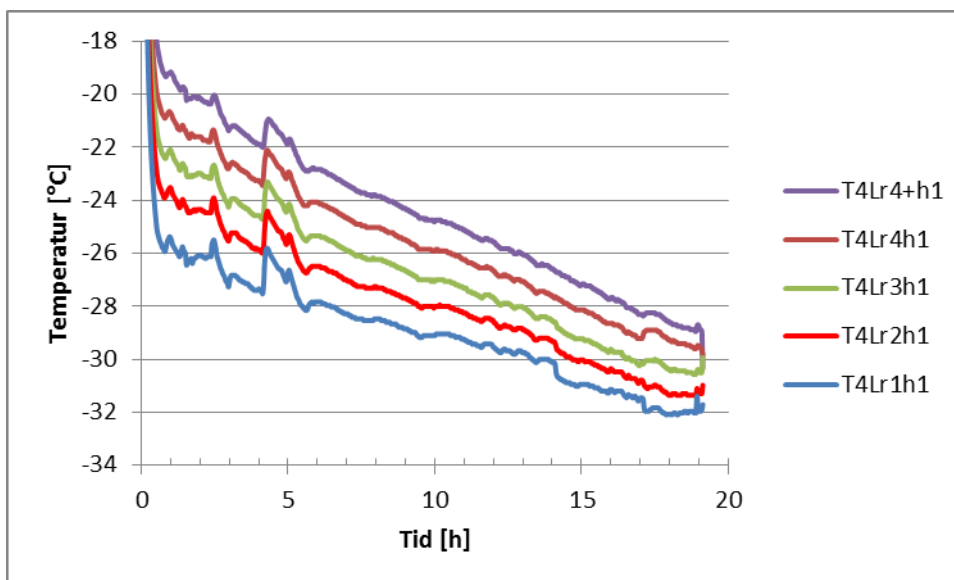
Temperaturen på luften etter produktene synker ikke markant ved 14 h. Sannsynligvis er dette på grunn av utjevning av lufttemperaturer.

Målinger av temperaturene på fordamperrørene viser at det er kaldest på toppen av fordamperen, men lufttemperaturmålingene viser at det er varmere øverst bak fordamper enn nederst. Dette skyldes trolig at rim/is på baksiden av fordamperen fører til at mesteparten av lufta passerer i øvre del av fordamperen.



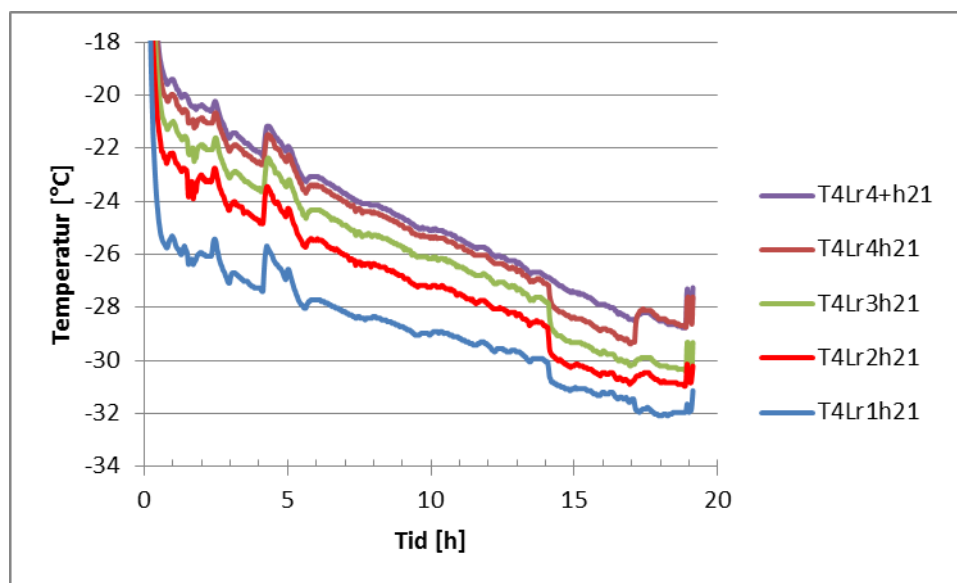
Figur 7.2 Lufttemperaturer på utvalgte plasser i tunell 4 den 4. nov.

Figur 7.3 viser hvordan lufttemperaturen ved hylle 1 øker fra rad til rad i løpet av en innfrysning. I starten øker temperaturen over produktene med 5 - 6 °C, mens den etter 19 timer øker med i overkant av 3 °C. Temperaturnedgangen på grunn av viftereguleringen er kun synlig på de første radene. På de siste radene kan det se ut som om temperaturen øker etter 17 timer, det vil si ved den siste viftereguleringen. Temperaturøkningen fra rad til rad er jevn gjennom hele tunnelen for hylle 1.



Figur 7.3 Lufttemperaturer målt i tunnel 4 med start 4. november ved hylle 1

Figur 7.4 viser hvordan lufttemperaturen ved hylle 21 øker fra rad til rad i løpet av en innfrysning. I motsetning til hylle 1, ser man her en tydelig forskjell i temperaturøkningen gjennom tunnelen. Over den første reolen, fra rad 1 til rad 2, øker temperaturen med omtrent 2 °C i starten av innfrysningen, mens over den siste reolen, fra innløp til utløp av rad 4, øker nesten ikke temperaturen i det hele tatt i starten av innfrysningsperioden. Det er først etter den første viftereguleringen, etter 14 timer, at temperaturen stiger over rad 4. Dette viser at lite varme blir tatt opp fra produktene i hylle 21 i rad 4.



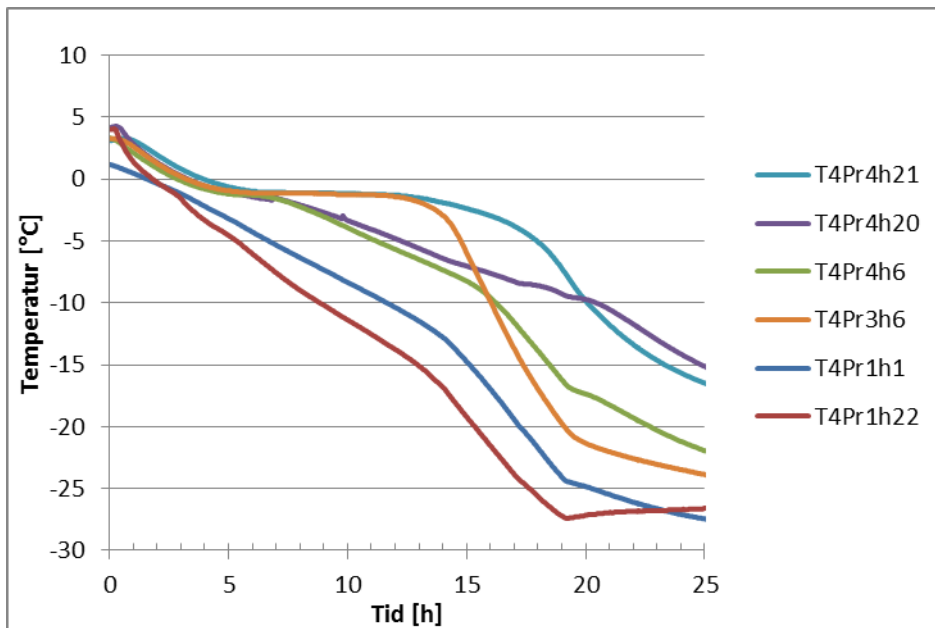
Figur 7.4 Lufttemperaturer målt i tunnel 4 med start 4. november ved hylle 21

7.4 Produkttemperaturer

Hensikten med disse målingene var å logge temperaturen i midten av eskene, men det viste seg å være vanskelig å forsikre seg om at loggerne var riktig plassert. Det førte til at det ikke nødvendigvis var sentrumstemperaturen som ble målt, og noen av temperaturkurvene fikk dermed andre former enn det man hadde forventet dersom loggeren var plassert i midten.

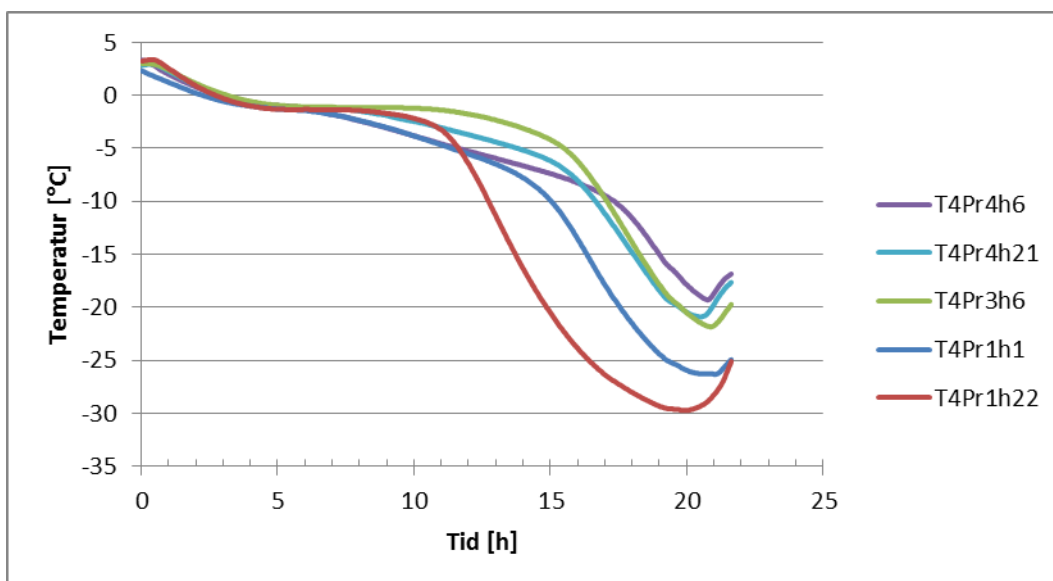
Figur 7.5 viser produkttemperaturer målt i tunnel 4 med start 4. november. Figuren viser at enkelte av loggerne trolig ikke har vært i midten av eskene, siden kurveprofilen er annerledes enn det man kunne forventet. Dette gjelder spesielt loggerne som var plassert i rad 1, og til dels loggeren i rad 4 hylle 6 og rad 4 hylle 20.

I utgangspunktet varer en innfrysning i 19 timer, men siden det ikke kom ny fisk 5. november, lot man produktene stå til vedlikeholdsfrysing til 6. november. Det gjorde at sluttemperaturen til produktene ble lav nok. Imidlertid viser data fra loggerne at produktene ikke hadde oppnådd ønsket temperatur etter 19 timer. I hylle 20 og 21 i rad 4 var temperaturen hele -10 °C , noe som er betydelig høyere enn den ønskede temperaturen på -20 °C . Figuren viser også at det er store forskjeller mellom temperaturen i de ulike hyllene. Blant annet kan man se at temperaturen i rad 3 hylle 6 er over 10 °C lavere enn temperaturen i rad 4 hylle 21 etter 19 timer. Temperaturen i rad 1 er enda lavere, og dette er sannsynlig til tross for at disse kurvene muligens ikke viser kjernetemperaturen. De store forskjellene viser at mye energi kan spares dersom innfrysningen jevnes ut.



Figur 7.5 Produkttemperaturer målt i tunnel 4 med start 4. november

Under andre innfrysning som startet 6. november ble produkttemperaturene logget som vist i Figur 7.6. Under denne innfrysningen ble viftene regulert slik at alle viftene gikk for fullt i 16 timer, i motsetning til 14 timer som er normalt. Etter 16 timer gikk 2 vifter de resterende 3 timene. Figuren viser at med en slik vifteregulering vil selv de produktene som fryses sist komme ned i omtrent -20 °C etter 20 timer. Det er imidlertid verdt å merke seg at ved denne innfrysningen var det en rad med rund sild, uten tilsatt lake. Siden dette produktet har mindre kuldebehov, er det grunn til å tro at dette har vel så stor innvirkning på temperaturforløpet som viftereguleringen. Det er noe overraskende at det ser ut til å være hylle 6 i den siste seksjonen som fryses langsomt. Dette stemmer ikke overens med andre målinger og simuleringer, så det er uklart hva dette skyldes.



Figur 7.6 Produkttemperaturer målt i tunnel 4 med start 6. november

Da produktene ble tatt ut av tunnelen, ble det tatt stikkmålinger av temperaturen i eskene for å kontrollere om denne målemetoden viste samme temperatur som loggerne som var plassert i eskene. Stikkprøvene ble tatt

fra siden og fra toppen av esken, og resultatene vises i Tabell 7.1. Denne sammenligningen viser at stikkprøvemålingene tatt fra toppen viser omtrent 1,5-2,5 grader høyere temperatur enn stikkprøvemålingene tatt fra siden. Dette kan komme av at stikkprøvene fra siden ikke kommer langt nok inn i produktene, slik at det ikke er kjernetemperaturen som måles. Sammenligningen mellom loggertemperaturen og gjennomsnittet av de to stikkprøvetemperaturene viser at loggertemperaturen er litt høyere. Dersom man sammenligner loggertemperaturen med stikkprøvetemperaturen tatt fra toppen ser man imidlertid at forskjellen er mindre, og det tyder på at stikkprøvene tatt fra toppen av esken gir et riktigere mål av kjernetemperaturen. Unntaket er loggeren plassert i produkteska i rad 1 hylle 22, hvor loggeren viser en lavere temperatur enn begge stikkprøvetemperaturene. Det viste seg imidlertid at denne loggeren var plassert litt høyt i esken, noe som gjør det sannsynlig at den ikke viser kjernetemperaturen.

Tabell 7.1 Stikkprøvetemperaturer sammenlignet med loggertemperaturer fra innfrysningen i tunnel 4 den 6. november

Eske med logger	Temperatur [°C]				
	Side	Topp	Forskjell side/topp	Logger	Forskjell stikkprøver/logger
r1h1	-26,6	-25,3	1,3	-26,3	-0,3
r1h22	-27,4	-27,6	-0,2	-29,1	-1,6
r3h6	-24,2	-21,6	2,6	-21,7	1,2
r4h6	-20,8	-18,8	2,0	-19,2	0,6
r4h21	-22,6	-21,0	1,6	-20,8	1,0

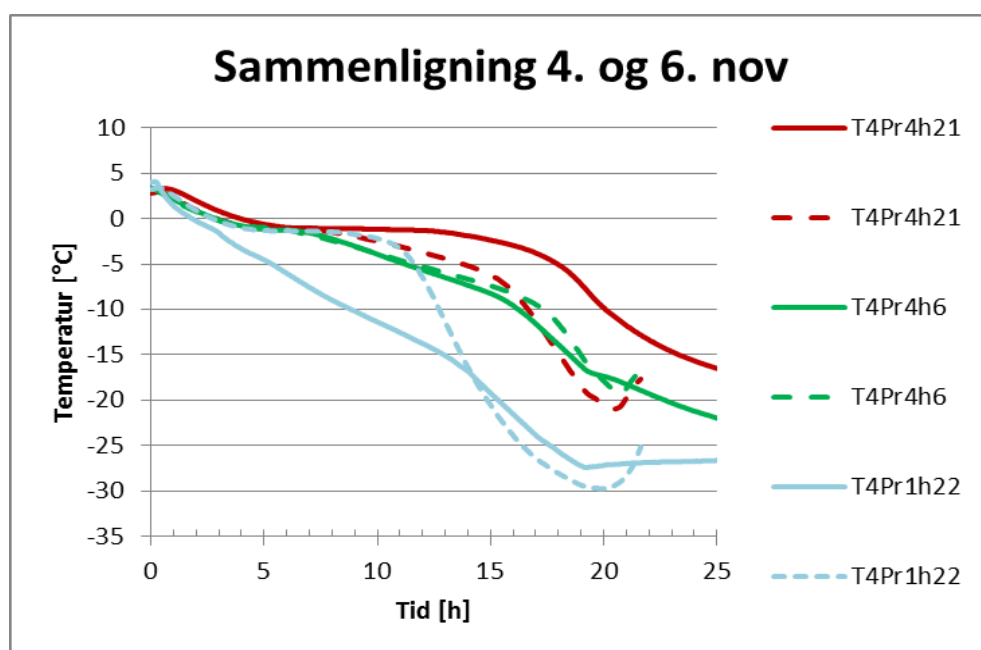
Tabell 7.2 viser stikkprøvetemperaturer fra ulike plasser i tunnel 4 etter innfrysningen med start 6. november. Målingene viser at temperaturene i rad 1 stort sett er betydelig lavere enn temperaturene i rad 4, noe som er naturlig siden rad 4 er nærmest fordampere. Man kan også se at temperaturen stort sett er høyest i hylle 20 og 21. Et unntak er i rekke 12, hvor hylle 6 viser høyest temperatur. Årsaken til dette er ukjent, men loggertemperaturene som vises i Tabell 7.1 bekrefter det samme resultatet.

Tabell 7.2 Stikkprøvetemperaturer fra ulike plasser i tunnel 4 etter innfrysningen som startet 6. november

	Rekke	1	4	7	10	12	14
Rad	Hylle						
1	22	-25,7				-23,3	
	21	-27,9				-24,0	
	20					-20,9	
	6	-29,0				-26,7	
	1	-29,4				-27,0	
4	22		-18,6	-21,8	-20,7	-24,4	
	21		-17,8	-19,8	-19,2	-21,0	
	20		-16,0	-16,3	-16,6	-19,9	
	11	-27,3					-21,3
	6	-25,4	-19,6	-20,9	-20,9	-19,8	-18,8
	1	-26,6	-23,8	-21,1	-20,9		-21,2

7.5 Sammenligning av de to innfrysningene

I Figur 7.7 sammenlignes produkttemperaturene fra første og andre innfrysningsperiode. Heltrukne linjer representerer første innfrysning med start 4. november, mens stiplede linjer representerer andre innfrysning med start 6. november. Linjene med samme farge viser produkttemperaturer fra samme plassering. Fra figuren kan man se at produktene i rad 4 hylle 6 følger omtrent samme kurve. Produktene i rad 1 hylle 22 har forskjellig form (mulig feilplassering av loggeren ved første innfrysning), men ender på omtrent samme temperatur. For rad 4 hylle 21 er forskjellen imidlertid tydelig. Én forskjell mellom de to innfrysningene var viftereguleringen. For første innfrysning ble en vifte i hver seksjon (totalt 3 vifter) skrudd av etter 14 timer, og ytterligere 2 vifter ble skrudd av etter 17 timer. For andre innfrysning gikk alle viftene for fullt i 16 timer, da en vifte i hver seksjon ble skrudd av. De resterende viftene gikk resten av perioden. Denne nye viftereguleringen kan ikke alene forklare hvorfor produktene i rad 4 hylle 21 fryses raskere ved andre innfrysning. Viftene gikk likt i de første 14 timene av begge innfrysningene, men allerede da er forskjellen omtrent 4 °C. Ved den andre innfrysningen var det imidlertid en rad med rund sild (rad 3), mens det ved den første innfrysningen kun var filet. Siden det ikke tilsettes vann i produkteskene med rund sild, krever disse mindre kuldebehov, og det er grunn til å tro at dette kan ha vel så stor påvirkning på temperaturforløpet som den nye viftereguleringen.



Figur 7.7 Sammenligning mellom produkttemperaturer ved første og andre innfrysning på enkelte steder i tunnelen. Heltrukne linjer representerer første innfrysning med start 4. november, mens stiplede linjer representerer andre innfrysning med start 6. november.

7.6 Effektmålinger på viftene

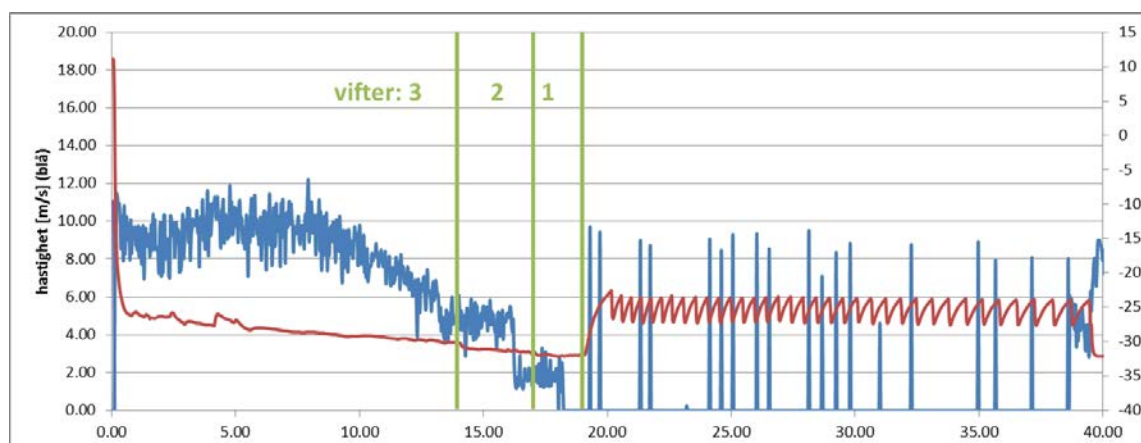
Resultatene fra effektmålingene vises i Tabell 7.3. Måleresultatene ble ikke logget, og måleresultatene varierte relativt mye ved avlesningen, slik at resultatene er omtrentlige verdier. Siden avlesningen var utfordrende på grunn av de varierende verdiene, er det vanskelig å trekke konklusjoner ut fra målingene. En teori var at effekten til enkelte vifter ville øke, når andre vifter ble skrudd av, men denne konklusjonen kan ikke trekkes ut i fra disse måleresultatene.

Tabell 7.3 Resultatene av effektmålingene på viftene

Dato	Klokkeslett	Tunnel	Antall vifter i gang	Vifte 1 [kWh]	Vifte 2 [kWh]	Vifte 3 [kWh]
04.nov	18:00	4	3	16	17	
05.nov	11:00	4	1	-	-	18
05.nov	11:00	5	2	18	-	18
05.nov	15:30	5	1	-	-	18
06.nov	18:30	4	3	17	18	18
06.nov	18:30	5	3	17	17	18

7.7 Lufthastighetsmålinger

Det ble gjennomført lufthastighetsmålinger under én innfrysing ved NP anlegg i Måløy i november 2014. Resultatene vises i Figur 7.8. Blå linje er hastigheten og rød linje er lufttemperaturen, begge er målt over himlingen, rett før luften vender ned.



Figur 7.8. Lufthastighetsmålinger (blå linje) over himling for en innfrysing. Rød linje viser lufttemperatur på samme plass.

Det er ganske stor fluktuering i målerverdiene, noe som kommer av at det er turbulent der sensoren står. Likevel kan man lese flere ting ut fra grafen.

I starten av innfrysingen går tre vifter og hastigheten er da mellom 8 og 11 m/s for de første 10 h. Deretter synker hastigheten gradvis mot 5 m/s ved 13-14 h. Dette er uventet og tyder på at noe ikke er som det skal. Det kan være riming på fordamperne som er årsaken. Dersom det dannes rim på fordamperne vil de tettes og trykkdifferansen vil øke, noe som gir lavere lufthastighet. Rimet på toppen av fordamperne smelter mellom innfrysingene, siden temperaturen da blir opp til 10 °C, se Figur 7.9. Vannet renner nedover og fryser lengre ned i fordamperen, hvilket også var observert. Figur 7.10 viser en tunnel før avriming, hvor det er mye is på fordamperne. For hver innfrysing blir da islaget på fordamperen tykkere, hvilket hindrer varmeovergang og luftgjennomstrømning. I tillegg trengs mye varme og lang tid for å tine all isen ved avriming, hvilket ikke er effektivt. Isteden bør man avrime oftere, helst etter hver innfrysing. Hvordan avrimingen da gjøres best bør også utredes.

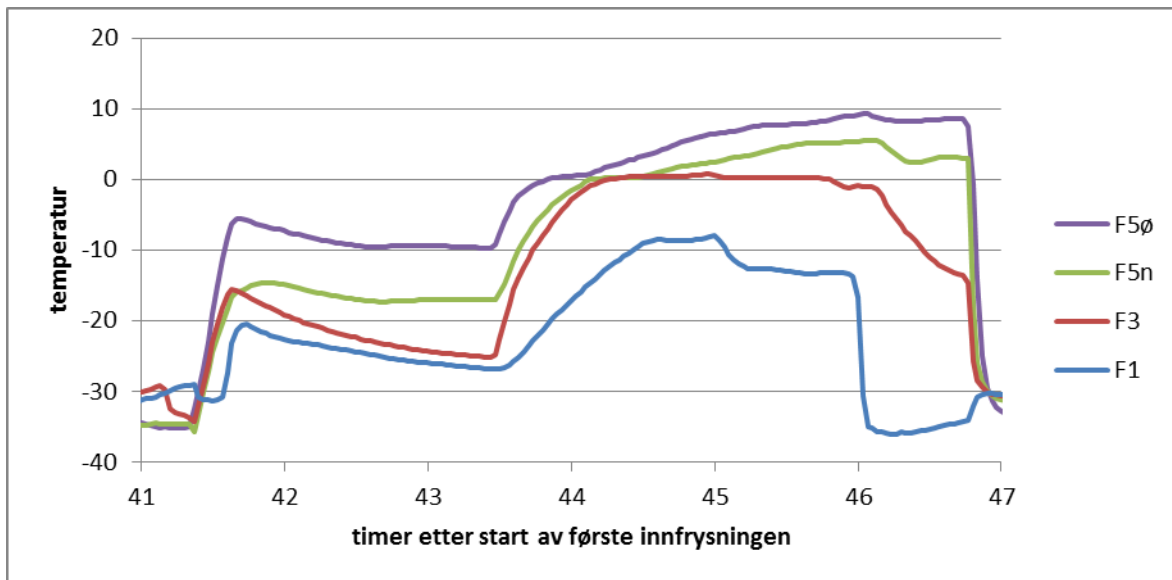
Ved 14 h slo man av midtviften i alle seksjonene. Hastigheten i grafen ser ut å være uforandret rundt 5 m/s. Eventuelt kan grafen tolkes som at hastigheten gjør et dropp ved 13 h, fra 6 til 5 m/s, men det er for store svingninger for å si dette sikkert. Deretter gjør hastigheten et dropp til ca. 2 m/s ved 16 h.

Hvis hastighetsfeltet er godt utviklet der hvor sensoren er plassert, burde det ikke ha noe å si om det er midtviften eller en sidevifte som blir avslått, hastigheten skal være nokså jevn over tverrsnittet. Hvis man imidlertid ser på hastigheten ved utlasting (40 h) så er den omtrent 4 m/s og da går kun midtviften. Hastigheten er altså høyere når det kun er midtviften som går enn når det kun er viften nærmest døren som går.

Fra 19 h er viftene av, foruten når temperaturen i tunnelen (oppe bak fordamperne) går over $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, da startes en vifte i en kort periode. Sannsynligvis er viftene i gang så kort at loggeren ikke registrerer dette ved flere av tilfellen (ref. rød linje i Figur 7.8). Målerverdier registreres annethvert minutt.

Det ble logget under en innfrysning, og i tillegg ble hastigheter avlest ved noen tilfeller i løpet av neste innfrysning. I starten av den andre innfrysningen var hastigheten 10 m/s og mot slutten av perioden med 3 vifter viste loggeren 6 m/s. Dette tyder på at det var samme mønster som i periode 1, med gradvis synkende hastighet.

Hvis effekten (ev. strømtrekk) til viftene hadde vært logget kontinuerlig hadde det vært mulig å gi mer konkrete forslag til forbedring av driften. Det er viktig å se på forandringen over en innfrysingsperiode og å sammenligne flere innfrysingsperioder.



Figur 7.9 Temperaturer målt på fordamperrørene i tunnel 4 mellom innfrysninger (6. nov).



Figur 7.10 Is på fordampere i tunnel 3 før avriming.

8 Beregninger

8.1 Kuldebehov i tunell

Kuldebehovet for en tunell avhenger i størst grad av mengden produkt som skal fryses. Hvis eskene fylles med sjøvann (som blir gjort f.eks. med sildefilet), så gir dette økt kuldebehov, hvis mengden fisk er den samme. Start- og sluttemperatur er også av betydning, samt hvor stor fettandel og hvilken type produkt det er. Vifteeffekten bidrar også til kuldebehovet, mer om det i kapittel 8.3.

For å beregne kuldebehovet for et produkt må man ha spesifikk energi for det produktet, over og under frysepunktet, samt latent varme. For sild og makrell kan dette beregnes basert på innhold av vann, fett, proteiner etc. (ASHRAE 2006). I Tabell 8.1 vises kuldebehovet for fisk med forskjellig fettinnhold. For sild er det lagt til 2,5 kg sjøvann per 20 kg fisk. Hvis man fryser hel sild er egenskapene nokså lik de for makrell med samme fettandel.

"Sum" gir minimum kuldeeffekt som trengs i tunnelen for å senke temperaturen i produktene fra 5 °C til -25 °C med en frysetid på 20 h. Da er det antatt at viftene gir en varmeeffekt³ som tilsvarer 30 % av totale kuldebehovet. Fra tabellen kan man se at det trengs betydelig større kuldeeffekt for sildefileter med sjøvann enn for makrell fryst som rund fisk. Dette er anslåtte verdier og ikke tilstrekkelig for å fryse produktene om luftforholdene i tunnelen er ujevn eller sirkulert luftmengde lav slik at varmestrømmen og derved kuldebehovet varierer mye.

Tabell 8.1. Kuldebehovsberegning for fisk med forskjellig fettinnhold; temperatur 5 °C til -25 °C og en frysetid på 20 h. For sild inngår 2,5 kg sjøvann per 20 kg fisk.

Sild 9 % fett		Sild 20 % fett	
produkter	269,9 kJ/kg	produkter	237,5 kJ/kg
sjøvann	364,5 kJ/kg	sjøvann	364,5 kJ/kg
produkter	3,75 kW/tonn prod	produkter	3,30 kW/tonn prod
sjøvann	5,06 kW/tonn vann	sjøvann	5,06 kW/tonn vann
vifter	1,9 kW/tonn prod	vifter	1,7 kW/tonn prod
	30 %		30 %
sum	6,26 kW/tonn prod	sum	5,61 kW/tonn prod
Makrell 20 % fett		Makrell 30 % fett	
produkter	225,5 kJ/kg	produkter	196,0 kJ/kg
produkter	3,13 kW/tonn prod	produkter	2,72 kW/tonn prod
vifter	1,3 kW/tonn prod	vifter	1,2 kW/tonn prod
	30 %		30 %
sum	4,47 kW/tonn prod	sum	3,88 kW/tonn prod

Beregnet kuldebehov gir et grunnlag for hvor stor fordampere og kuldeanlegg bør være. Hvis en antar at det trengs 30 %⁴ mer enn minimum kuldeeffekt for å få fryst produktene innen 20 h, må ha installert kuldeeffekt

³ For hver tunell trengs også kuldeeffekt for å kjøle ned reoler og annet samt for varmetap gjennom vegger og tak, men normalt utgjør dette liten del av totale kuldeeffekten.

⁴ Årsaker til at man trenger mer enn minimum kuldeeffekt kan være ujevn fordeling av luft, forskjellige temperaturer på fordampere på grunn av høyden, rim på fordampere etc. Dette fører til at det fjernes mer varme enn det minimale, siden mesteparten av produktene kommer ned i en lavere temperatur enn det som er nødvendig. En annen årsak er at det kun er i starten av innfrysningen at fordampere yter det den er kapabel til.

være på 581 kW for en tunell med 100 tonn (makrell 20 % fettinnhold). Hvis samme tunell brukes til sildefileter med sjøvann (2,5 lit/20 kg fisk) kan den kun lastes med 71-80 tonn produkt, hvis samme betingelser gjelder. Alternativt kan man la produktene være lengre inne i tunellen eller senke fordampningstemperaturen.

8.2 Temperaturstigning over produkt

Hylleavstanden for de vanlige reoler er 200 mm som på grunn av avstivninger gir lysåpning ved innløp på 175 mm. Med eskehøyde på 120 mm blir luftspalten ca. 55 mm, men i praksis vil ofte eskene bule litt og redusere høyden. Innenfor bjelken er tverrsnittet noe større, men konstruksjonen sperrer for strømning og lager turbulens. For overslagsberegning regnes derfor til; Areal = $1,31 \cdot 0,055 = 0,072 \text{ m}^2$. Med forutsatt lufthastighet 4 m/s vil dette gi: $V_{\text{luft}} = 4 \cdot 0,072 = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$ eller massestrøm (tetthet luft; ca. $1,41 \text{ kg/m}^3$) = $0,29 \cdot 1,41 = 0,41 \text{ kg/s}$. Luftens spesifikke varme: $c_{\text{luft}} = 1,0 \text{ kJ/kg}$

Ligningen for varmemestrømmen er:

$$q = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T$$

Varmestrømmen fra varene tas opp ved temperaturstigning og etter ca. 1 time er varmemestrømmen ca. $1,0 \text{ kW/hylle}^5$ som gir: $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Etter 10 timer frysing er varmemestrømmen ca. $0,7 \text{ kW/hylle}$, hvilket gir: $\Delta T = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Etter 15 timer frysing er varmemestrømmen nede i $0,4 \text{ kW/hylle}$, hvilket gir: $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Med 4 reoler i luftretningen vil en forvente en temperaturstigning totalt i størrelsesorden ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (etter 1 time), $8 \text{ }^\circ\text{C}$ (etter 10 timer) og $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (etter 15 timer). Det anbefales ikke å ha for stor temperaturredifferanse over produktene, siden det gir ujevn innfrysing.

8.3 Vifteeffekt

Fan affinity laws gir hvordan luftens volumstrøm, trykkdifferanse og vifteeffekt endres ved å endre turtallet til viften. For volumstrøm (eller hastighet hvis tverrsnittet er uforandret):

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Trykk:

$$\frac{dp_1}{dp_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Vifteeffekt:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

En reduksjon i turtall med 33 % gir teoretisk en reduksjon i volumstrøm eller hastighet med 33 %, men en reduksjon vifteeffekt med ca. 70 %.

⁵ Fra simuleringer med Modelica, se også kapittel 10.2.

9 Simuleringer Simflow

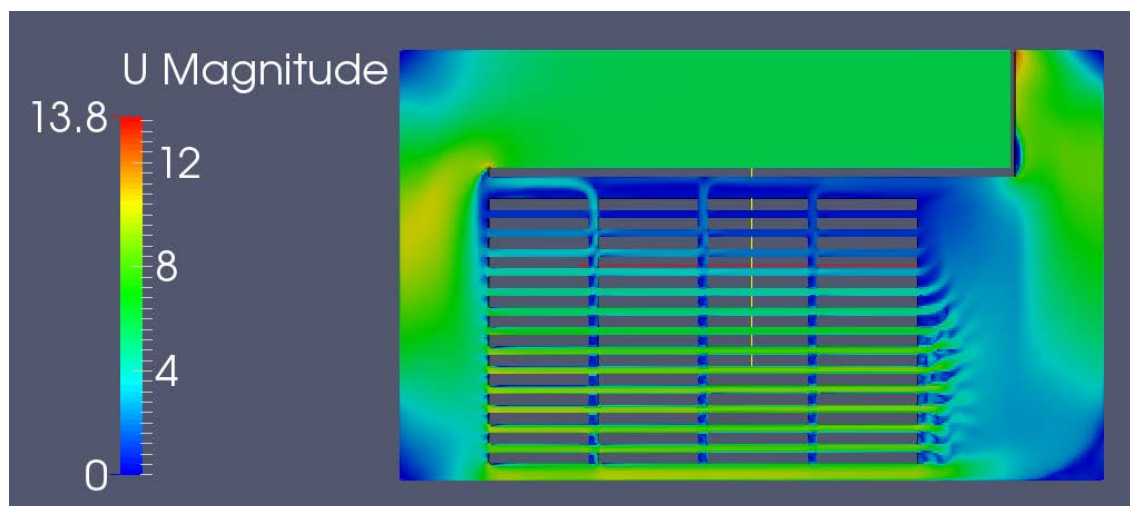
For å simulere lufthastigheter i en frysetunell har CFD⁶-programmet simFlow blitt brukt. SimFlow er basert på åpen kildekode og kombinerer et intuitivt brukergrensesnitt med fordelene av OpenFOAM®-programvaren, som har blitt grundig utviklet over tid. Tilgangen til beregningsalgoritmer som brukes i simFlow gir mulighet for bedre forståelse av modelleringsmetodikk, noe som er en viktig fordel i forhold til andre programvarer basert på lukket kildekode. SimFlow tilbyr funksjonalitet for å håndtere komprimerbar og inkompressibel fluidstrøm, turbulente strømmer, varmeoverføring (ledning, konveksjon, stråling) og flerfasestrømninger. I sammenligning med ANSYS Fluent viste begge programmer lignende resultater, men simFlow er raskere å bruke.

Frysetunellen ble først tegnet i Autodesk Inventor og deretter overført til Simflow der parametere for vifte og fordampere ble lagt inn. Parametere for porøsitet og turbulens ble lagt inn, samt for rutenett (mesh), modell og simuleringer. Resultatene vises og analyseres med Paraview, som også er basert på åpen kildekode. Figur 9.1 viser originaltunellen, med vifte over en himling og uten ledeskovler. Fordampere er modellert som en porøs boks og er derfor ikke så tydelig i figuren. Luftretningen er fra vifte, over himling, forbi produkter og gjennom fordampere. Reolene som ble simulert hadde en hyllehøyde på 0,2 m, hvilket er vanlig i industrien. Viften ble satt til en jevn hastighet på 5,6 m/s, hvilket skulle gi en middelhastighet mellom produkter på ca. 4,8 m/s. Det har blitt tatt utgangspunkt i en reol i høyden, med 14 hyller.

For lettere å kunne se effekten av forskjellige tiltak har også frysetiden blitt beregnet for produkter i det hastighetsfeltet som simuleringene gav. En modifisert Planks ligning (Pham 1986) ble da brukt, hvor produkttegenskaper ble beregnet fra modeller og parametere fra ASRAE Refrigeration (2006). Det konvekative varmeovergangstallet ble beregnet fra denne ligningen (Valentas, Rotstein et al. 1997):

$$h_c = 7,3 \cdot u_a^{0,8} \quad (1)$$

Hastigheten i ligningen (u_a) var beregnet middelhastighet over og under et produkt. En sammenligning av resultater vises i kap 9.5.



Figur 9.1 Simulering av hastighet i originaltunell (simT2).

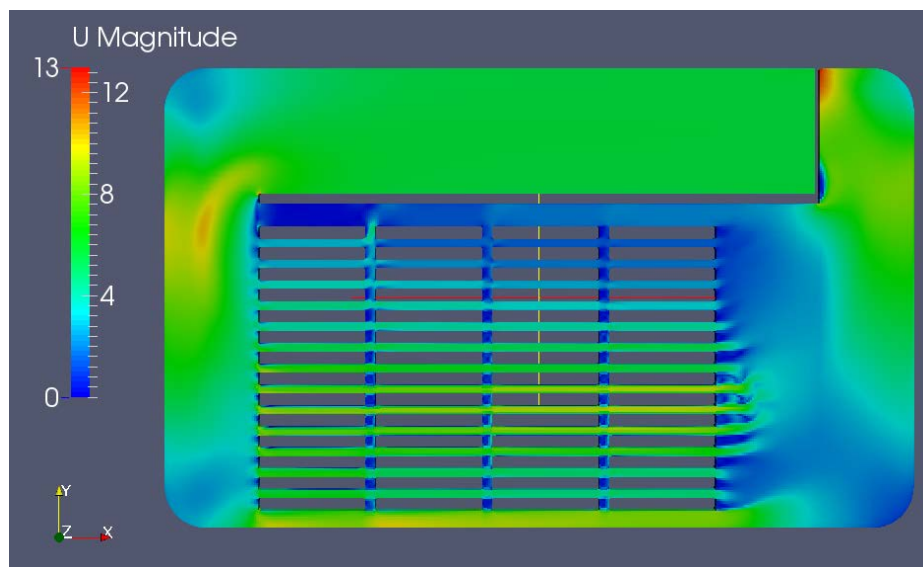
9.1 Ledeskovler

Ledeskovler eller -plater er forholdsvis enkle å installere og kan være veldig effektive for å jevne ut hastighetsfeltet. Utfordringen ligger i hvor de skal plasseres for best effekt og ikke å være i veien for inn- og

⁶ Computational fluid dynamics

utlasting. I dette prosjekt ble ledeskovler i tunellens hjørner og etter himlingen simulert og sammenlignet med en tunell uten ledeskovler.

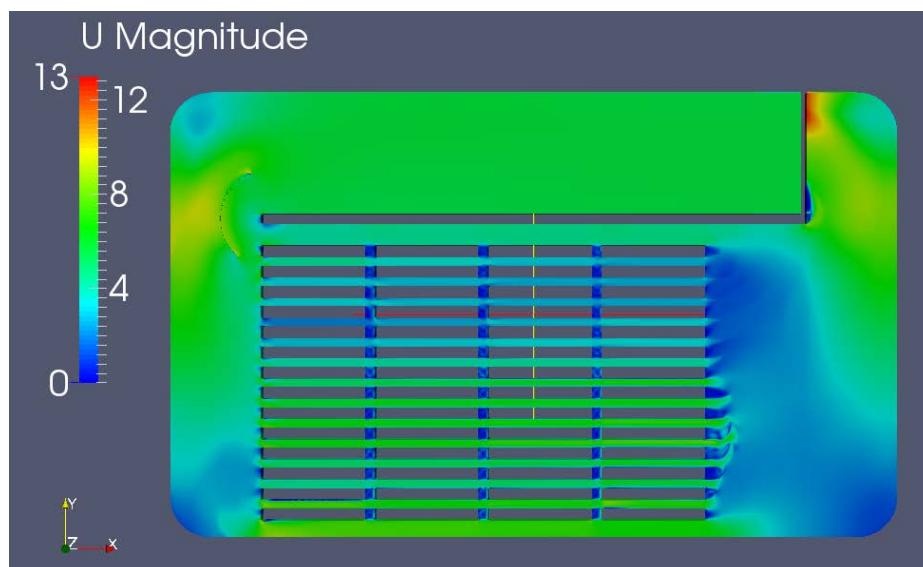
I starten av simuleringene ble tunellen modellert med ledeskovler i hjørnene av rommet, se Figur 9.2. Simuleringene viste at denne utformingen gav litt jevnere hastighetsprofil enn den i Figur 9.1, derfor ble den brukt i videre simuleringer som "baseline case".



Figur 9.2 Hastighetsfelt i originaltunell med ledeskovler i rommets hjørner, "baseline case" (simT3).

En tunell med ledeskovl etter himlingen har også blitt simulert tidligere, med programmet Airpak. Resultatene fra de simuleringene viste bl.a. at det produktet som fryser langsamst har en frysetid som er 24 % kortere hvis tunnelen har ledeskovl. (Widell, Frydenlund, 2009).

Simuleringene i simFlow resulterte i Figur 9.3, for en tunell med ledeskovl etter himlingen. Man ser mindre mørkeblå farge, hvilket betyr ikke så lave hastigheter. I tillegg er det mindre gul farge, hvilket betyr lavere makshastighet og et jevnere hastighetsfelt. Det er ingen plass hvor luften står tilsynelatende helt stille. De laveste hastighetene er i første rad, mellom hylle 10 og 11, og i rad 3 og 4 (nærmest fordamper), hyller 11-13. De produkter som får den varmeste luften er de i siste raden, så de produkter som fryser langsamst er de i rad 4, hylle 11-13. For en høyere tunell, med for eksempel to 11-hyllers reoler blir det likt, men det er sannsynligvis fler hyller med lav hastighet øverst i rad 4.

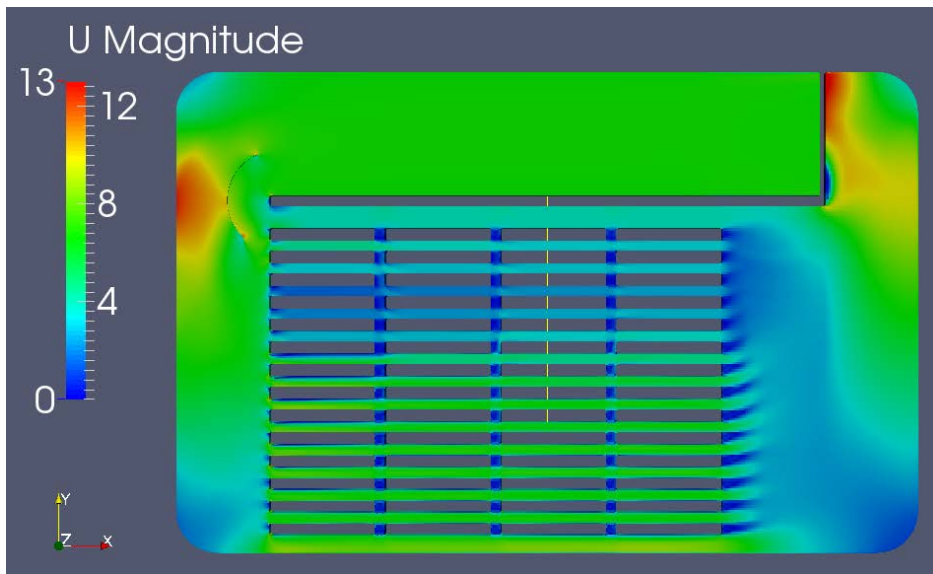


Figur 9.3 Hastighetsfelt i tunell med ledeskovl etter himling (simT3guide)

En beregning av frysetider ble gjort for hver hylle basert på simulerte lufthastigheter. Det ble også antatt en økende lufttemperatur gjennom tunellen på 1 °C per rad, hvor luften før rad 1 er på -31 °C. Det produktet med lengst frysetid befinner seg på hylle 12 i begge tunellene, men frysetiden er 22 % kortere for tunellen med ledeskovl.

9.2 Høyde på reoler

To forskjellige høyder på reoler ble simulert. Den i baseline case (simT3) har en hylleavstand på 0,2 m, mens den høyere reolen har en hylleavstand på 0,22 m. Hastigheten på luften ut fra viften ble økt til 6,6 m/s (18 % økning) for at det skulle bli samme middelhastighet over produktene som i baseline case. Figur 9.4 viser hastighetsfeltet for denne tunellen. Her er det et større område med mørkere blått i første og andre rad, hyller 10-11. Beregninger at langsomste produkt har en frysetid på 8 % lengre enn for den lavere tunellen med ledeskovl (simT3guide). Ut fra disse resultatene kan man se at det gir dårligere fordeling av luften og langsommere frysing med de høyere reolene. Sannsynligvis hadde det gått å forbedre fordelingen litt ved å endre utformingen av ledeskovlen.



Figur 9.4 Hastighetsfelt i en høyere tunell (simT4guide) med ledeskovl etter himling.

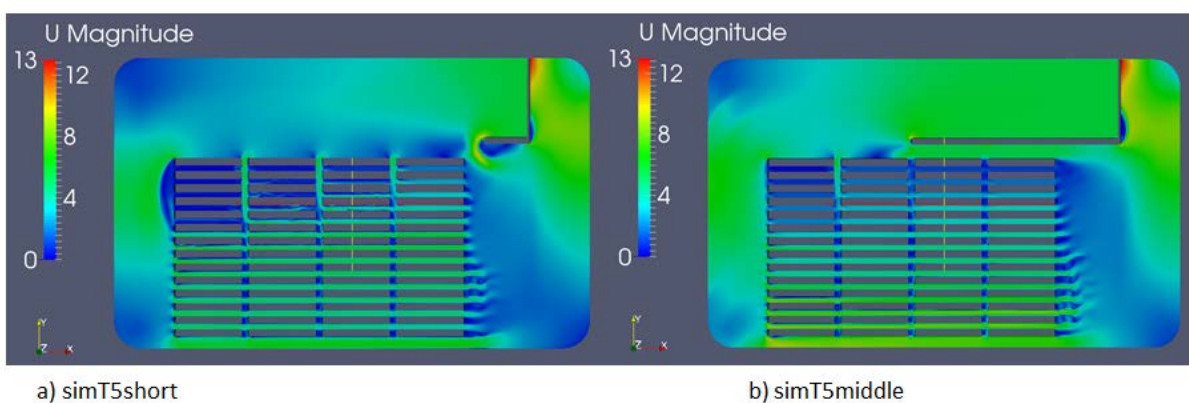
En økt lufthastighet med 18 % gir ca. 64 % høyere energibruk for viftene, gitt av affinitetslovene for vifter (under forutsetning at tetthet, cp og temperaturer er uforandret):

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^3$$

Med andre ord, det lønner seg ikke å ha høyere reoler.

9.3 Lengde himling

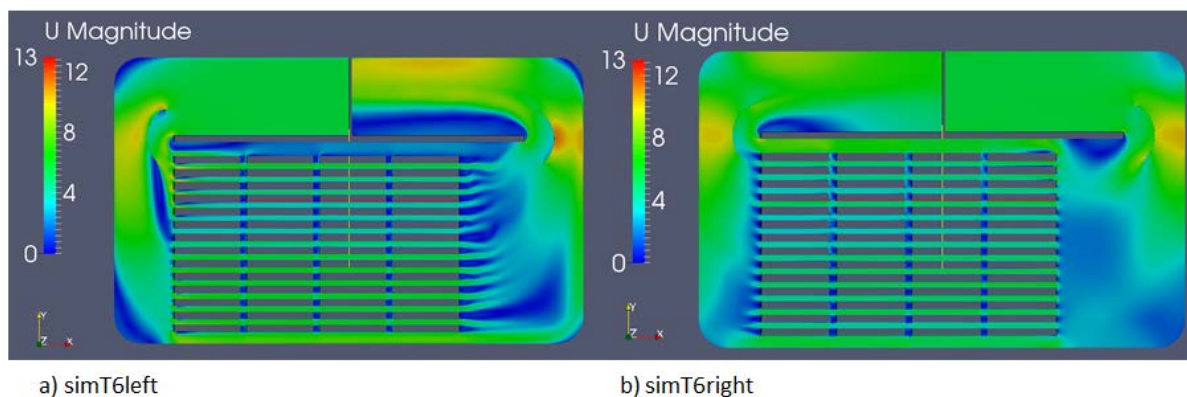
Ved noen pelagiske anlegg har det vært testet å korte ned eller ta bort himlingen. Derfor ble dette også simulert. Resultatene vises i Figur 9.5. Her ser man tydelig at det blir lave hastigheter over flere av de øverste hyllene, i begge alternativene. Dette anbefales derfor himling med full lengde.



Figur 9.5 Lufthastigheter i tunell a) uten himling og b) med halv himling.

9.4 Vifteplassering og luftretning

De siste simuleringalternativene var å teste forskjellige luftretninger. For best å kunne sammenligne alternativene ble viftene plassert midt på himlingen og det ble satt opp ledeskovl i begge endene av himlingen. Resultatene vises i Figur 9.6. Hastighetsfeltet er her jevnere enn for de tidligere konfigurasjonene.

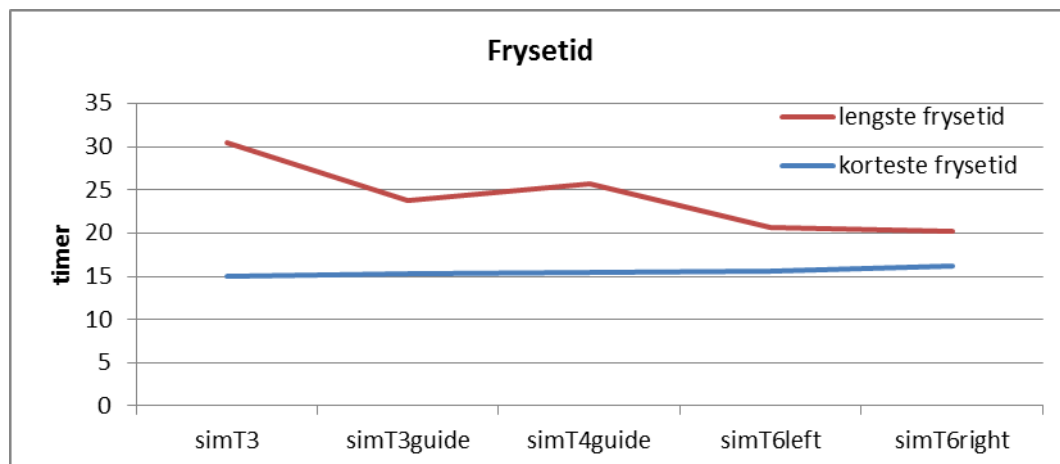


Figur 9.6 Simulering av tunell med to forskjellige luftretninger. a) vifte – produkt – fordampner, b) vifte – fordampner – produkt.

For beregning av frysetid ble det for simT6left gjort samme antagelser som tidligere. For simT6right ble det antatt at lufttemperaturen inn på rad 4 (nærmest fordampner) var $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ og deretter økende med $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per rad. I de andre alternativene har luften passert viftene etter fordampneren og dermed fått en litt økt temperatur. Det produkt med lengst frysetid befinner seg på hylle 9 i begge tunellene, men i rad 4 for simT6left og i rad 1 for simT6right. Frysetiden for det langsamst frysende produktet er henholdsvis 32 % og 35 % kortere enn for baseline case. Sammenlignet med tunnelen med en ledeskovl (simT3guide) er frysetiden henholdsvis 14 % og 17 % kortere. Kun basert på dette er det tydelig at det er best å la luften gå fra vifter til fordampner og deretter over produktene.

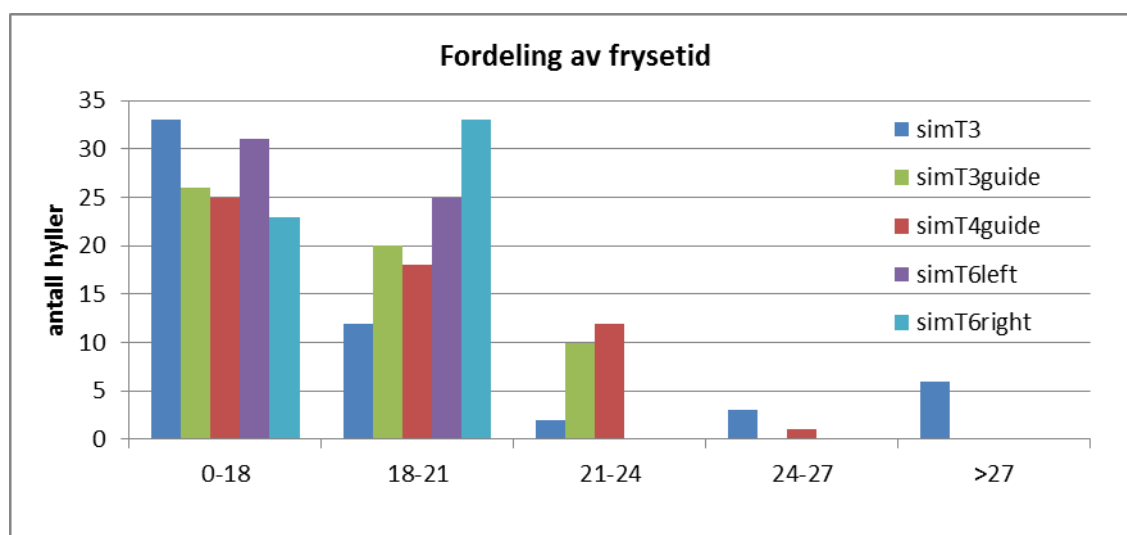
9.5 Sammenligning resultater

For å beregne frysetid for en hylle ble middelhastigheter fra simuleringene og en antatt lufttemperatur brukt. Det ble antatt at lufttemperaturen før første rad var $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ og at den deretter øker med 1 grad for hver rad. Dette er verdier som er funnet ut fra måleverdier. Kortest og lengste frysetid vises i Figur 9.7. Korteste frysetid er ganske lik for alle alternativene, fra 15 h til 15,6 h. Den lengste frysetiden, for baseline case, er på 30,5 h og 19,8 h for simT6right, (hvor luften går fra vifte til fordampner til produkt). Differansen mellom lengste og korteste frysetid for hvert av alternativene er fra 16 h (simT3) til 4 h (simT6right).



Figur 9.7 Lengste og korteste frysetider beregnet fra luft hastigheter simulert med simFlow.

Figur 9.8 viser fordelingen av antall hyller med en viss frysetid. For alle alternativene fryses mesteparten av produktene innen 21 h. De tre første alternativene har også noen produkter med lengre frysetid.



Figur 9.8 Antall hyller med forskjellig frysetid for simuleringsalternativene.

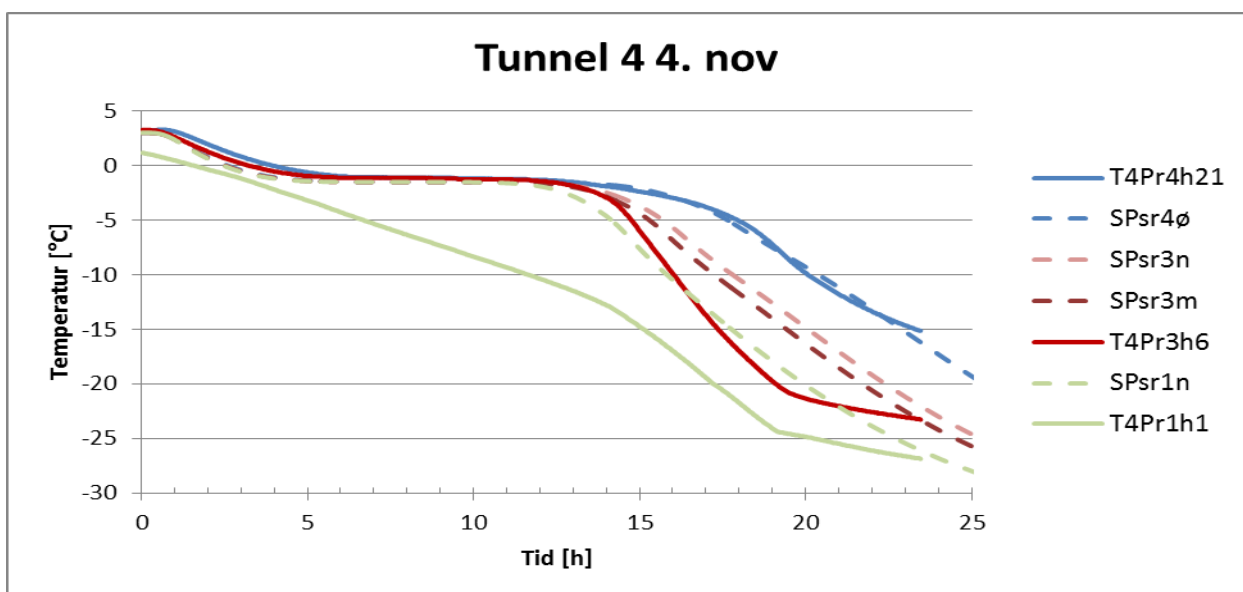
10 Simuleringer Modelica

For å dokumentere effekten av energieffektiviseringstiltak og vurdere ulike driftsstrategier ble det laget en modell av frysetunnelen og kuldeanlegget basert på modelleringsspråket Modelica. Modellen er basert på en tidligere modell (Walnum, Andresen et al. 2011a) men er modifisert i forbindelse med dette prosjektet. I motsetning til tidligere, kan man nå dele inn tunnelen i flere horisontale lag, slik at man kan simulere ulik lufthastighet i ulike deler av tunnelen. Modellen tar imidlertid ikke høyde for vertikale luftstrømninger gjennom tunnelen. Det vil si at all luft som kommer inn i et av de horisontale lagene må gå ut av det samme laget. Dette er en antagelse som ikke stemmer med simuleringer av luftgjennomstrømningen (Widell and Frydelund 2009), og begrenser derfor nøyaktigheten av simuleringresultatene.

Simuleringene tar utgangspunkt i en "normal" innfrysning og ulike alternativ sammenlignes opp mot dette. Den normale innfrysningen er frysing av filet av sild med 14 % fett tilsatt 2,5 liter lake. Under innfrysningen reguleres viftene etter driftsmodellen fra Måløy. Det vil si at 3 av 9 vifter slås av etter 14 timer, og ytterligere 2 vifter slås av etter 17 timer. Fordampningstemperaturen er satt til $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det er disse innstillingene som er brukt når simuleringresultatene er sammenlignet med måledata. Innfrysningsperioden er satt til den tiden det tar før den siste produktesken har nådd $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

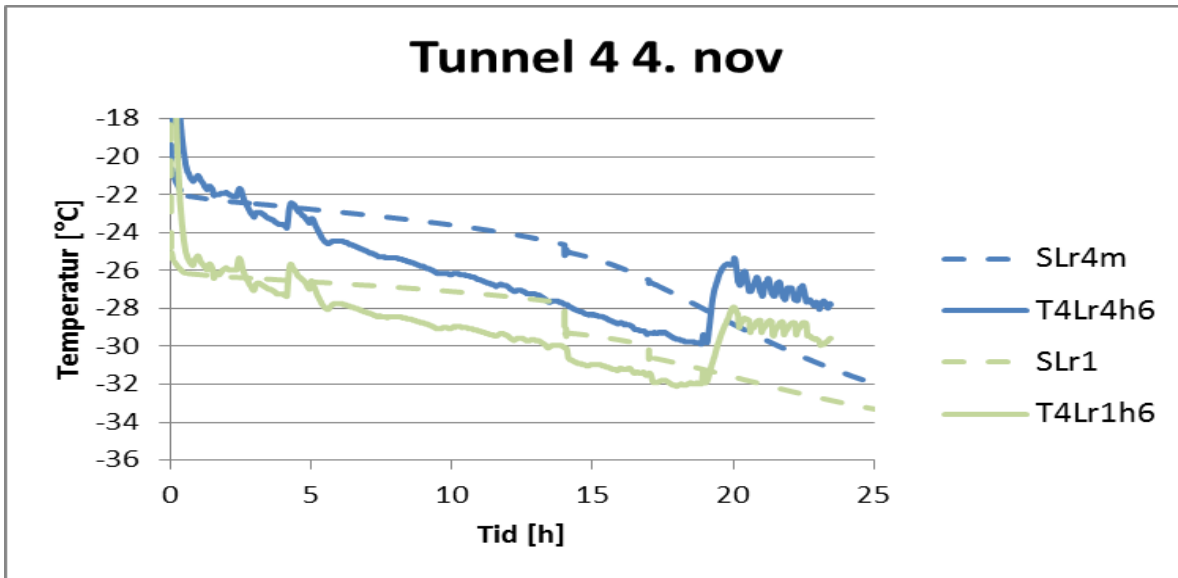
10.1 Verifisering av modellen

For å verifisere modellen ble simuleringresultatene sammenlignet med måleresultater for et fryseanlegg. I Figur 10.1 sammenlignes målte og simulerte produkttemperaturer. De stiplede linjene representerer de simulerte verdiene, mens de heltrukne linjene viser de målte verdiene. Samme farger indikerer samme plassering i tunnelen. Mange horisontale lag i modellen fører imidlertid til langsomme simuleringer, og det ble derfor valgt å simulere med tre lag med ulik lufthastighet i stede for et lag for hver hylle. Det øverste laget har lavest lufthastighet og representerer de øverste hyllene hvor fisken fryses langsomt. Det midtre laget har høyest hastighet og det nederste laget har middels hastighet. Av figuren kan man se at resultatet fra den siste raden i det øvre horisontale laget i simuleringen stemmer godt overens med de målte verdiene fra rad 4 hylle 21 i tunnelen. De målte verdiene fra rad 3 hylle 6 viser imidlertid at produktene fryses raskere enn simuleringen av både det midtre og nedre laget, og den samme tendensen vises fra rad 1. Dette tyder på at forskjellen mellom radene i simuleringen er litt for liten i forhold til virkeligheten.



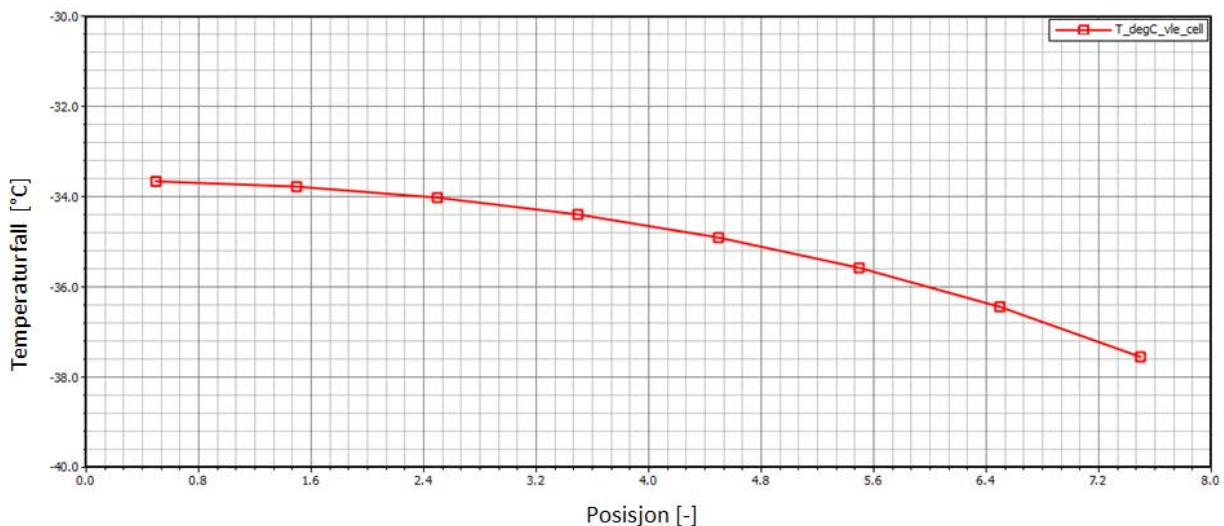
Figur 10.1 Sammenligning mellom simulerte og målte produkttemperaturer. De simulerte verdiene er representert med stiplede linjer, mens de heltrukne linjene viser målte verdier. Samme farger indikerer samme plassering i tunnelen.

I Figur 10.2 sammenlignes målte og simulerte lufttemperaturer. Forskjellen i lufttemperatur mellom første og siste rad er relativ lik, men figuren viser at de målte temperaturene faller noe raskere enn de simulerte temperaturene.



Figur 10.2 Sammenligning av målte og simulerte lufttemperaturer. De simulerte verdiene er representert med stiplede linjer, mens de heltrukne linjene viser målte verdier. Samme farger indikerer samme plassering i tunnelen.

Temperaturen i væskeutskilleren ved anlegget ble holdt forholdsvis konstant på -39 °C , men på grunn av trykktap var temperaturen i fordampere mellom -32 °C og -38 °C (jf. Figur 7.1). Dette stemmer godt overens med fordampertemperaturen i simuleringen, se Figur 10.3.

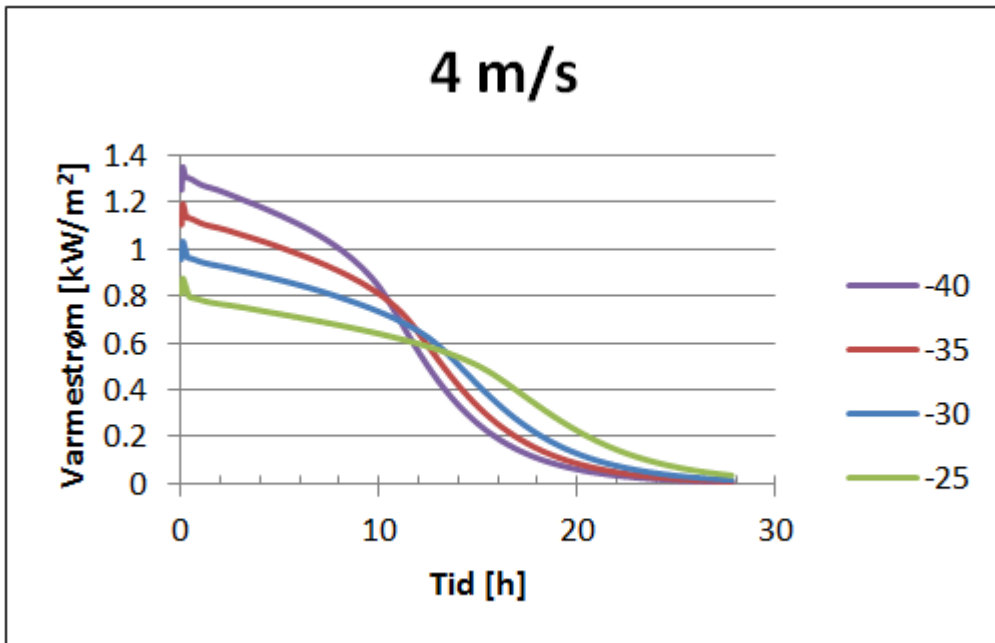


Figur 10.3 Temperaturen i fordampere 6 timer ut i innfrysningen.

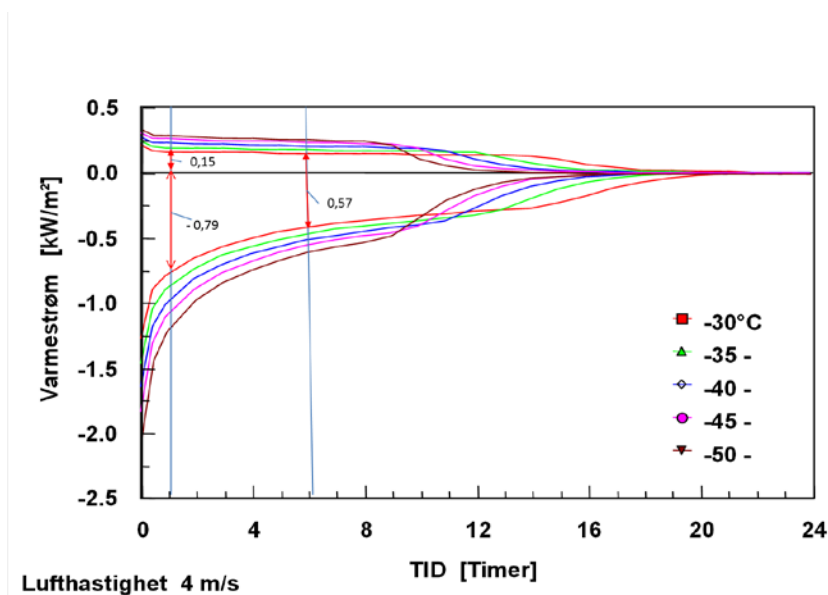
10.2 Varmestrømsimuleringer med Modelica

Figur 10.4 viser varmemstrømmen fra produktene slik de simuleres i Modelica. Dersom denne sammenlignes med tidligere simuleringer av varmemstrømmen (Figur 10.5), viser det seg at denne kurven har en noe annerledes fasong. Tidligere simuleringer viser at varmemstrømmen er raskt avtagende de første timene av innfrysningen, for deretter å flate noe ut, før den igjen reduseres raskt mot slutten. Kurvene fra Modelica-

simuleringen har ikke med den raske reduksjonen i starten av innfrysningen, og dette kan være en av grunnene til at lufttemperaturene i Modelica-simuleringene ikke følger de målte verdiene.

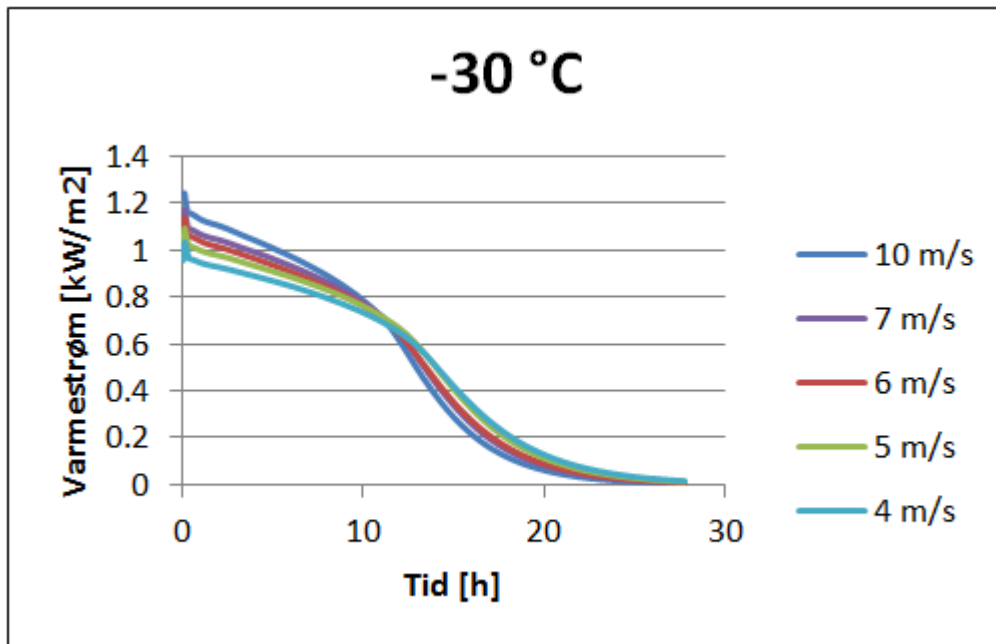


Figur 10.4 Varmestrøm fra produktene som funksjon av tid ved ulike lufttemperaturer i Modelica-simuleringen.



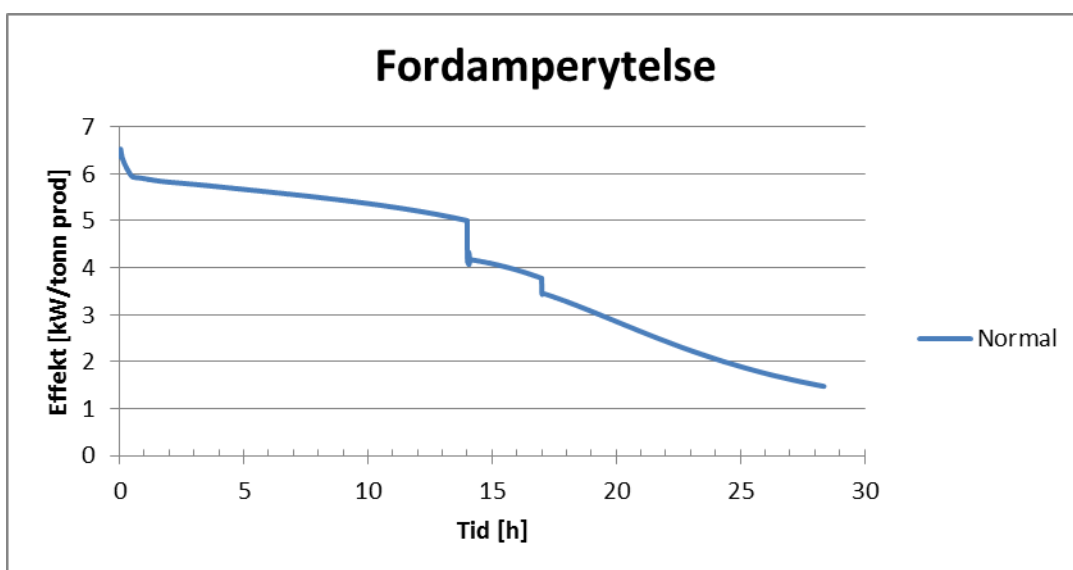
Figur 10.5 Simulert varmemstrøm til luften fra lokket og bunnen som funksjon av tid etter startfrysing ved forskjellige konstante lufttemperaturer. Varmestrømmen oppover er definert positiv og total varmemstrøm er avstand mellom øvre (fra lokk) og nedre (fra bunn) kurve (Magnussen and Nordtvedt 2006a).

Figur 10.6 viser varmemstrømmen fra produktene som funksjon av tid ved ulike lufthastigheter. Figuren viser at varmemstrømmen øker noe ved økt lufthastighet, og forskjellen mellom for eksempel 4 og 7 m/s tilsvarer en senkning av lufttemperaturen på 5 °C (jf Figur 10.4).



Figur 10.6 Varmestrøm fra produktene som funksjon av tid ved ulike lufthastigheter.

Siden varmemstrømmen avtar i løpet av innfrysingsperioden, vil ytelsen til fordampere også avta i løpet av innfrysingsperioden. Dette vises i Figur 10.7. Siden ytelsen går ned i løpet av perioden, må den installerte kapasiteten være betydelig høyere enn den teoretiske midlere kapasiteten. Ut i fra kuldebehovsberegningene i kapittel 8.1 trengs det 6,26 kW/tonn fisk for å fryse fisken fra 5 til -25 °C i løpet av 20 timer. Simuleringene viser imidlertid at det tar over 28 timer å fryse fisken dersom fordampere har en ytelse på omtrent 6 kW/tonn i starten av innfrysingsperioden. En innfrysingsperiode på 28,2 timer tilsvarer en midlere fordamperytelse på 4,44 kW/tonn, men simuleringen viser at man trenger 35 % større fordamperytelse i starten for å oppnå samme innfrysningstid.

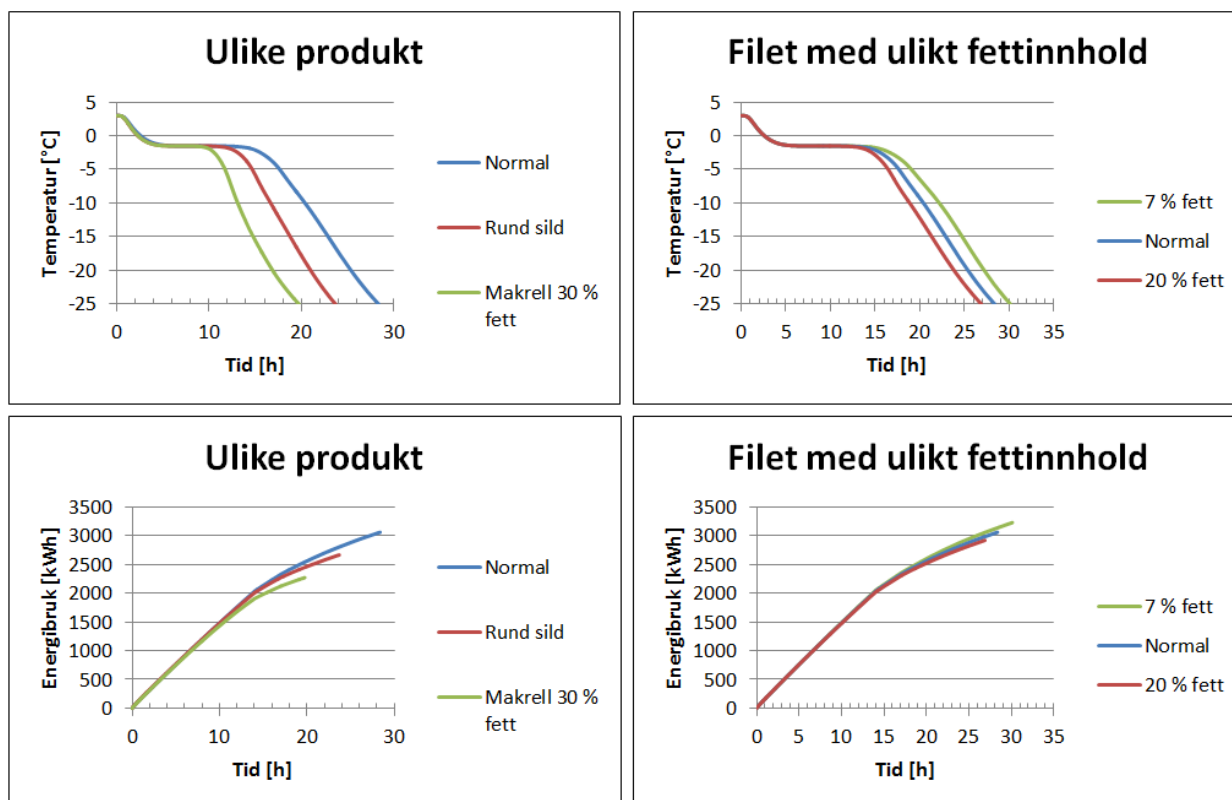


Figur 10.7 Fordamperytelsen som funksjon av tid i løpet av en innfrysingsperiode.

10.3 Ulike typer produkt og fettinnhold

Siden det varierer hvilke produkt som fryses i tunnelene, ble det gjennomført simuleringer av innfrysninger av ulike typer produkt. Det som har mest og si for innfrysingsforløpet er om fisken fryses rund eller som filet. Årsaken til dette er at man tilsetter 2,5 liter lake i eskene med filet, noe som øker kuldebehovet. I tillegg varierer fettinnholdet i fisken i løpet av sesongen. Silda kan ha et fettinnhold på mellom 7 og 20 %, mens makrellen kan inneholde helt opp til 30 % fett. Dette vil også påvirke innfrysingsprosessen.

Figur 10.8 viser innfrysingsprosessen til ulike typer fisk. Figuren tar utgangspunkt i en normal innfrysning, det vil si filet av sild med 14 % fett tilsatt 2,5 liter lake. Alternativet "Rund sild" vil si sild med samme fettprosent, men uten tilsatt lake. "Makrell 30 % fett" er også uten tilsatt lake. Figuren viser også hvor stor påvirkningen fettprosenten har ved frysing av filet tilsatt 2,5 liter lake. Av figuren kan man se at forskjellen mellom frysing av rund sild og filet er betydelig. Dersom fisken i tillegg inneholder mye fett, reduseres innfrysningstiden og energibehovet ytterligere. Fettprosenten påvirker også innfrysingsprosessen, men i noe mindre grad. Årsaken til variasjonene er at fet fisk inneholder mindre vann, og det kreves derfor mindre energi for å fryse den.

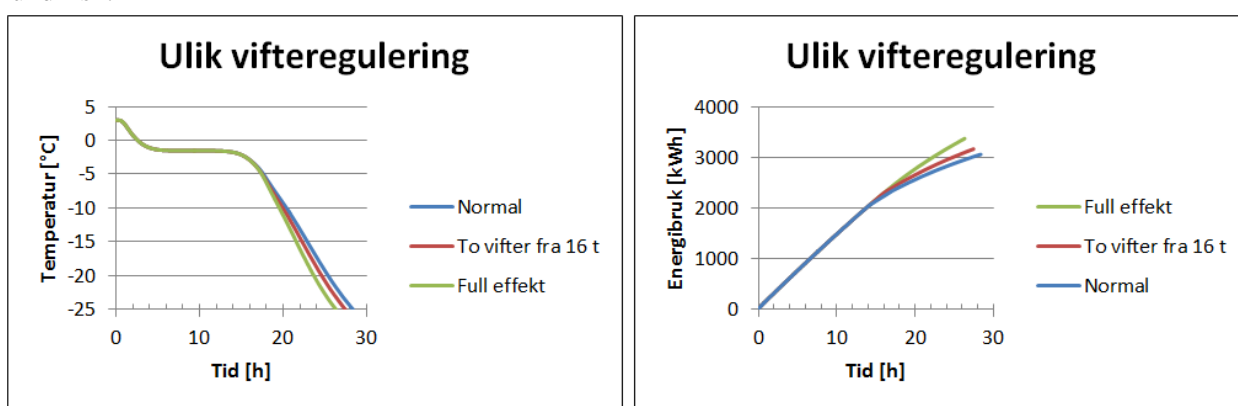


Figur 10.8 Temperaturkurver og energibruk for innfrysingsprosessen av ulike typer fisk.

Det viser at dersom en tunnel er designet for rund sild som fryses uten tilsatt lake, må man beregne en betydelig lengre innfrysningstid dersom man fryser filet i den samme tunnelen. Forskjellen i innfrysningstid mellom rund sild og sildefilet er på hele 16 %, og man bør derfor drifte tunnelene forskjellig for frysing av ulike produkt. Et alternativ kan være å plassere mindre produkt i tunnelen, eller man kan redusere fordampningstemperaturen for å overholde den ønskede innfrysningstiden. Fettinnholdet varierer i løpet av sesongen, og forskjellen i innfrysningstid for sildefilet med 7 % fett og sildefilet med 20 % fett er på 11 %. Dette viser at det også kan være hensiktsmessig å ha ulike driftsrutiner i ulike deler av sesongen.

10.4 Ulik vifteredulering

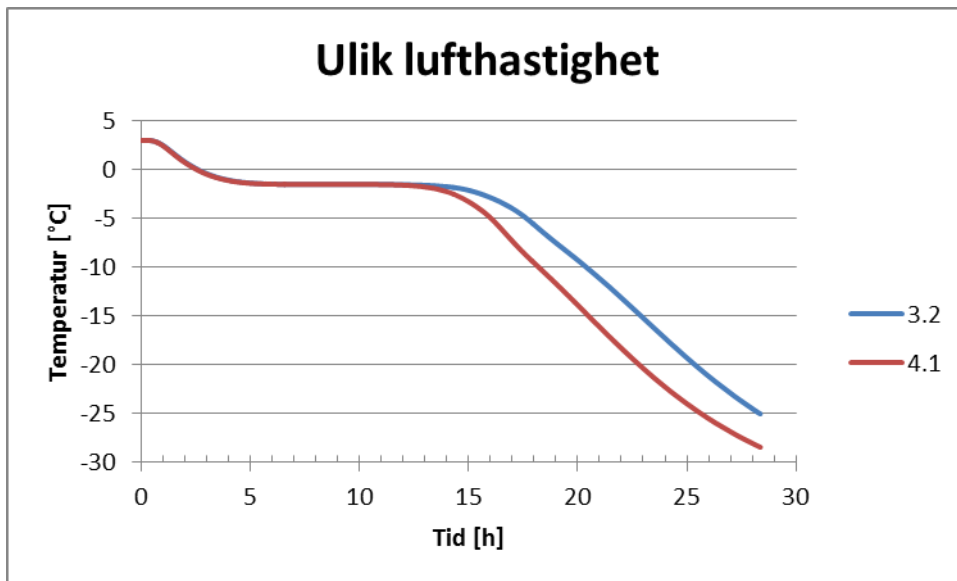
Viftene står for en betydelig andel av energien som benyttes ved frysing av fisk, og det er derfor vanlig å regulere ned vifteeffekten i løpet av innfrysingsprosessen. Dette bidrar til å redusere energibehovet, men fører samtidig til noe lengre innfrysningstid. I Figur 10.9 sammenlignes en normal vifteredulering med to ulike alternativ. Den normale viftereduleringen reduserer vifteeffekten til 67 % av makseffekt etter 14 timer, og til 44 % av makseffekt etter 17 timer. Alternativet "To vifter fra 16 t" tilsvarer at vifteeffekt reduseres til 67 % av makseffekt etter 16 timer, mens alternativet "Full effekt" tilsvarer at alle viftene går for fullt i hele perioden. Figuren viser at ved å kjøre alle viftene for fullt i hele perioden reduseres innfrysingsperioden med 7 % mens energiforbruket øker med 10 %. Figuren viser også at de ulike formene for vifteredulering har lite å si sammenlignet med effekten av ulike produkt i tunnelen (jf. Figur 10.8). Det vil si at alternativ vifteredulering alene ikke er nok til opprettholde ønsket frysetid dersom fileet fryses i en tunnel designet for rund fisk.



Figur 10.9 Temperaturkurver og energibruk for innfrysingsprosessen ved ulike former for vifteredulering.

10.5 Ulik lufthastighet

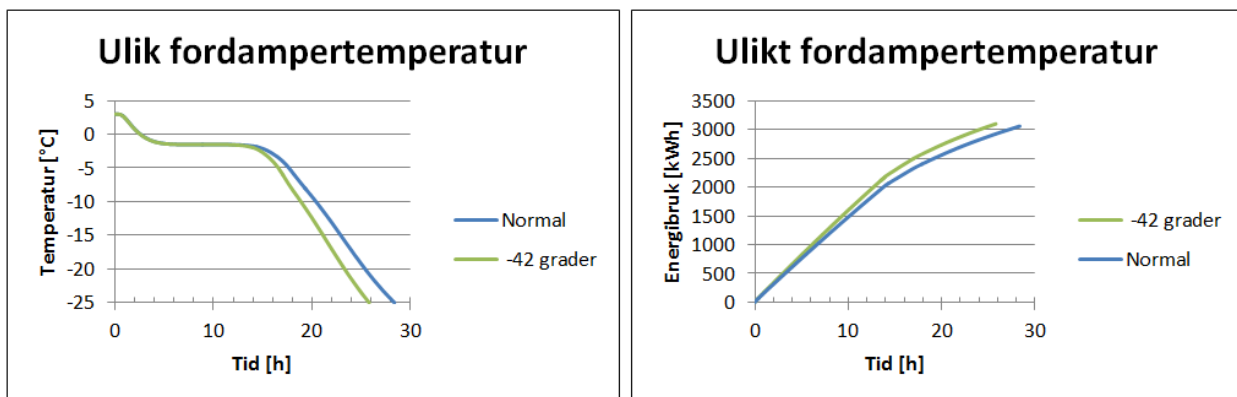
Som følge av ulik lufthastighet i tunnelen, fryses produktene på ulike hyller med forskjellig hastighet. Det fører til at det tar lengre tid før produktene i de øverste hyllene i raden nærmest fordampere fryses enn produktene lenger ned i den samme raden. Figur 10.10 viser temperaturkurver for produkt i ulike hyller med ulik lufthastighet. Dersom man antar at lufthastigheten varierer mellom 3,2 m/s og 4,1 m/s, vil det ta 3 timer lengre tid før de øverste produktene har oppnådd ønsket sluttemperatur, sammenlignet med de midtre produktene. Siden alle produktene må stå like lenge, senkes temperaturen i de midtre hyllene til -28,5 °C, noe som medfører et unødvendig høyt energiforbruk. Produktene i den første raden har da kommet ned i -31,3 °C. Målinger ved anlegg har imidlertid vist enda større forskjeller mellom de ulike hyllene, noe som kan indikere at lufthastigheten varierer enda mer enn det som er antatt i denne simuleringen.



Figur 10.10 Produkttemperaturer for produkt i hyller med ulik lufthastighet

10.6 Ulik fordampningstemperatur

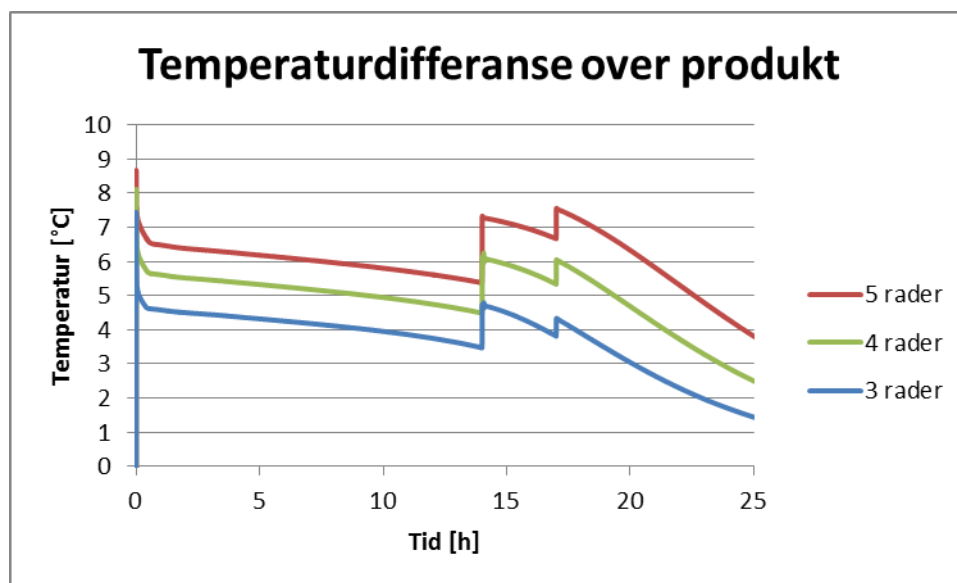
Et alternativ som vil bidra til å redusere innfrysningstiden er å redusere fordampningstemperaturen. I Figur 10.11 sammenlignes innfrysningsforløpet og energibruken for en normal innfrysning (-39 °C i fordampningstemperatur) med en innfrysning med fordampningstemperatur på -42 °C. Av figuren kan man se at innfrysningstiden reduseres med 9 %, mens energibruken kun øker med 1 %. Dette viser at redusert fordampningstemperatur kan være et godt alternativ for å redusere innfrysningstiden.



Figur 10.11 Temperaturkurver og energibruk for innfrysningsprosessen ved ulike fordampningstemperaturer.

10.7 Ulikt antall rader

Etterhvert som luften passerer produktene, varmes den opp av varmen som strømmer fra produktene. Dersom samme mengde luft benyttes med ulikt antall rader, vil temperaturdifferansen over produktene øke ved økende antall rader. Figur 10.12 viser hvor mye lufttemperaturen vil øke med henholdsvis 3, 4 og 5 rader dersom samme luftmengde benyttes. Temperaturøkningen er størst i starten av perioden, og etter viftereguleringene. For 3 rader er temperaturøkningen mellom 4 og 5 °C i starten av perioden, mens den for 5 rader vil være på mellom 6 og 7 °C. Det fører til at det med 5 rader vil være større forskjell i innfrysningstid for produktene i den første og siste raden enn ved 3 eller 4 rader.



Figur 10.12 Temperaturdifferansen mellom lufta inn på produktene og inn på fordamperen ved ulikt antall rader.

10.8 Oppsummering Modelica-simuleringer

I Tabell 10.1 sammenlignes resultatene av de ulike simuleringresultatene. Tabellen viser at det er stor forskjell på hvor mye de ulike alternativene påvirker innfrysingsprosessen. Det er for eksempel verdt å merke seg at typen produkt som er i tunnelen har mer å si for innfrysingsforløpet enn hvordan viftene reguleres. Dette viser at det er hensiktsmessig å ha ulike driftsmønstre for ulike typer produkt. Det innebærer at dersom det skal fryses filet i en tunnel designet for rund fisk, bør man vurdere om det bør settes mindre produkt i tunnelen, og om man bør senke fordampningstemperaturen. Fettinnholdet varierer i løpet av sesongen, og det kan derfor være hensiktsmessig å tilpasse driftsrutinene etter tid på året. For eksempel kan viftene driftes annerledes eller fordampningstemperaturen senkes i perioder hvor fisken inneholder mindre fett.

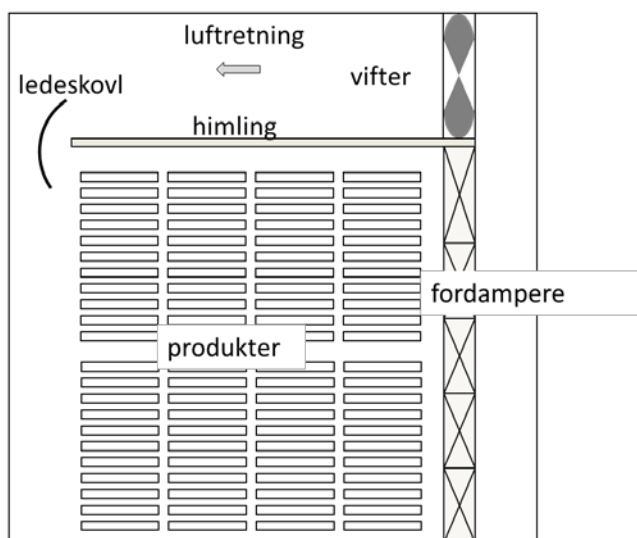
Tabell 10.1 Sammenligning av ulike Modelica-simuleringer

		Totalt energibruk [kWh]	Endring [kWh]	Endring [%]	Tid [h]	Endring [h]	Endring [%]
Normal	Filet 14 % fett	3060	0	0 %	28,4	0,0	0 %
Ulikt fettinnhold	7 % fett	3226	167	5 %	30,1	1,8	6 %
	20 % fett	2919	-140	-5 %	26,9	-1,5	-5 %
Ulik viffteregulering	To vifter fra 16 t	3164	105	3 %	27,4	-0,9	-3 %
	Full effekt	3372	312	10 %	26,3	-2,0	-7 %
Ulik fordampertemp	-42 grader	3099	40	1 %	25,8	-2,6	-9 %
Ulike produkt	Rund sild	2665	-394	-13 %	23,7	-4,7	-16 %
	Makrell 30 % fett	2270	-789	-26 %	19,7	-8,6	-30 %

11 Konklusjoner

Beregninger, simuleringer og målinger på eksisterende anlegg gir et godt grunnlag for å analysere frysetuneller. Beregninger gir et teoretisk grunnlag med antagelser bygget på erfaringer, tall fra litteratur og målinger. Beregninger gir stasjonære verdier og totalbeløp, så for transiente verdier er simuleringer viktig. Simuleringene bygger også på litteraturopplysninger, erfaringer og målinger. Simulerte data kan sammenlignes med målte data for å verifisere modellene. Ved hjelp av simuleringer kan man sammenligne forskjellige driftsmønstre for å finne det beste.

Basert på beregninger, simuleringer og målinger kan man si flere ting om hvordan en frysetunell bør se ut og driftes. I denne rapporten er det tatt utgangspunkt i en typisk frysetunell, se Figur 11.1.



Figur 11.1. Skisse tunell sett fra port inn, eksempel utforming frysetunell.

Produkt og emballasje

Type produkt har stor betydelse for kuldebehovet. Hvis en antar at produktene skal fryses fra 5 °C til -25 °C på 20 timer og at viftevarme mv utgjør 30 % av totalt kuldebehov viser beregninger at for sildefilet (9 % fettinnhold⁷) i esker med 2,5 kg sjøvann og 20 kg fisk trengs en minimum kuldeeffekt på 6,3 kW/tonn produkt. Hvis fisken har 20 % fettinnhold⁸ (og samme forhold ellers) så trengs en minimum kuldeeffekt på 5,6 kW/tonn produkt. For rund fisk (uten saltvann) og med 20 % fettinnhold trengs en minimum kuldeeffekt på 4,5 kW/tonn produkt. Makrell med 30 % fettinnhold⁹ trenger en minimum kuldeeffekt på 3,9 kW/tonn produkt. Hvis man dermed har en tunell med en dimensjonert kuldeeffekt på 600 kW kan man laste den med maksimum 96 tonn sild 9 % i sjøvann, 107 tonn sild 20 % i sjøvann, 134 tonn rund makrell 20 % eller 155 tonn rund makrell 30 % fett. Dette er maksverdier og tar dermed ikke hensyn til skeivfordeling av lufthastigheter mm.

Lufthastighet

En gjennomsnittlig lufthastighet på 4 m/s gir for en typisk tunell gjennomsnittlig innfrysningstid på 20 timer. Det anbefales ikke å øke hastigheten siden det gir høyere trykkfall og mer viftevarme uten at innfrysningstiden går ned.

⁷ Typisk verdi for fisk fanget i mars (norwaypelagic.no)

⁸ Typisk verdi for fisk fanget senhøst (norwaypelagic.no)

⁹ Typisk verdi for fisk fanget høst (norwaypelagic.no)

Reoler og utforming tunell

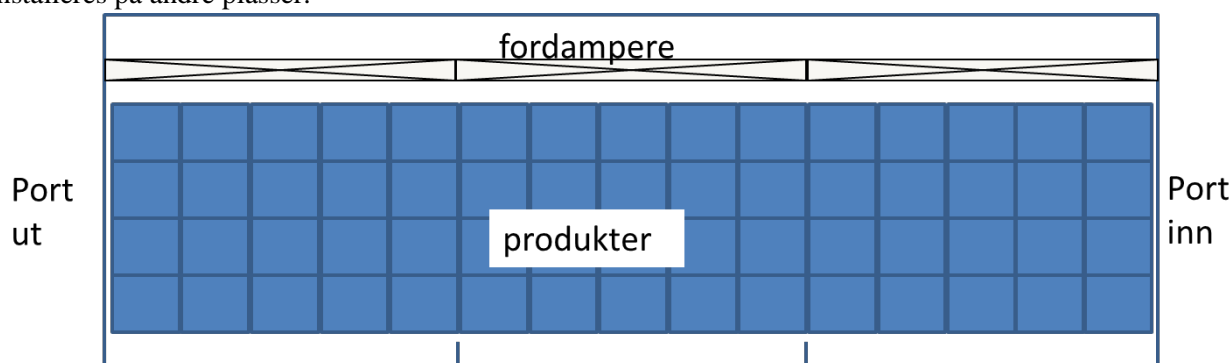
Frysetunell utformet som i Figur 11.1 bør ikke ha for stor høyde, det vil si at hvis det er nok areal bør man heller bygge flere/større tunneller enn å ha to reoler oppå hverandre. Reoler med 14 hyller finnes, så skal man kun ha en reol i høyden er disse å foretrekke. Simuleringer har vist at hvis man skal velge mellom hylleavstand på 0,2 m og 0,22 så er det minste å foretrekke, siden det gir mindre luftmengdebehov og dermed mindre energibruk.

Figur 11.2 viser et forslag til inndeling og reolplassering i en tunell. Med 14 hyllers reoler a 100 kg, gir det 1400 kg produkt per reol. En tunell med 4x15 rader kan dermed inneholde 84 tonn produkt, forutsatt at den lastes fullt. En gardin som trekkes ned mellom seksjonene kan også gi mindre påriming på fordampene under innlastning.

Avstanden over reolene må være stor nok at ikke himlingen ødelegges av truckenes inn-/utlasting, men ikke større. Stort volum over reolene vil gi en del kortslutning av luften. Andre avstander i tunnelen bør også gjøres minst mulig, men slik at inn/utlastning går uten forhindringer.

Simuleringer viser at en frysetunell som i Figur 11.1 bør ha himling, ellers går mye av luften direkte tilbake til fordampere og vifte og hastigheten over en del hyller blir liten. Halv lengde på himlingen er bedre enn ingen himling, men himlingen bør dekke produktarealet for best effekt.

Med full lengde på himlingen har målinger og simuleringer vist at hastigheten over de øverste produktene blir lav, men hvis en ledeskovl installeres blir hastigheten i tunnelen jevnere. Hvis tunnelen er utformet annerledes enn Figur 11.1, med større frie volumer må det vurderes om ledeplater eller -skovler skal installeres på andre plasser.



Figur 11.2. Skisse tunell sett ovenfra, forslag plassering reoler i frysetunell, 4 rader og 15 rekker

Temperaturer

Temperaturen målt på væskeutskilleren i kuldeanlegget bør være stabil. Hvis denne øker er det et tegn på at kuldeytelsen ved anlegget er for lav for den mengden produkter man lastet i tunnelene. Hvis dette ofte skjer bør man øke kuldekapasiteten til anlegget. Det er også viktig å ikke laste mer i tunnelen enn den er dimensjonert for. En forhøyet kuldemedietemperatur gir lengre frysetid enn dimensjonert.

Temperaturen i fordampere bør være lik den i væskeutskilleren (på samme høyde). Hvis den ikke er det kan det være et tegn på vann eller luft i systemet. En automatisk vannutskiller og luftutskiller bør da installeres. Målinger (målt på fordamperrøren med isolering) og simuleringer har vist at temperaturen i fordampere endrer seg med høyden, og derfor er lave fordampere å foretrekke.

Frysetid

Slik dagens innfrysingsanlegg er bemannet bør innfrysningen skje innenfor 19 timer. Det betyr at kjernetemperaturen bør være under $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for å ivareta teknisk og organoleptisk kvalitet.

Fordampere

Ytelse fordampere bør være større enn minimum kuldeeffekt. Dette fremfor alt på grunn av fare for påriming, nedkjøling ved oppstart og risk for skeivfordeling av luft i tunnelen. Tidligere prosjekter viser at 10-15 % større effekt er vanlig dimensjoneringsrutine. Fordampere bør fylle hele tverrsnittet for å unngå

falskluft. En må også sørge for at man ikke for skjevforelding av kuldemedie i fordamperrørene siden dette resulterer i ulik frysetid i tunellen

Avriming

Avriming av fordampere er viktig. Rim på fordampere gir dårligere varmeovergang og øker trykkfallet over fordampere. I en hektisk produksjonsperiode går det ofte mange innfrysinger mellom hver avriming og det vil øke energiforbruket samt forlenge innfrysningstiden.

Vifter

Viftene dimensjoneres slik at luftmengden i tunnelen gir ønsket/akseptert temperaturstigning over produktene. De bruker energi både direkte og indirekte siden de avgir varme til luften i tunnelen, og denne varmen må fjernes av kuldeanlegget. Simuleringer med vifter plassert midt på himlingen viser at det er best å la luften gå fra vifter til fordampere og deretter over produktene. Imidlertid er det mest vanlig å bygge med viftene plassert rett over fordampere, slik som vist i figur 11.1. Med den plassering vil det være mest hensiktsmessig å la viftene blåse over himlingen, gjennom produkt og fordampere da det gir minst trykktap og høyest lufthastighet over produktene.

Overvåking og logging

Overvåking og logging av flere forskjellige parametre i systemet har vist seg å være svært viktig for å ha kontroll og oversikt over energibruk. Det finnes systemer for overvåking av energibruk, som i tillegg kan gi forbedringsforslag. Det er viktig å skille energibruk til kuldeanlegg og vifter fra resten av fabrikken. Da går det å få et mer nøyaktig tall på spesifikk energibruk per tonn produkt, hvilket kan sammenlignes.

Det er vanlig å ha måling av lufttemperatur i tunnelen og styre driften delvis av denne. Det kan i tillegg være bra å ha noen flere sensorer for måling av lufttemperaturer. Hvis sensorer plasseres på forskjellige høyder, før og etter produkt samt etter fordampere, kan det gi indikasjoner på skjevfordeling og rim og isdanning på fordampere.

For å få lave nok produkttemperaturer og lavt energibruk er det viktig å tilpasse driften til type og mengde produkt, men for å få det til må man ha oversikt over hva som skjer under innfrysingen.

Referanser

ASHRAE (2006). Handbook - Refrigeration. Atlanta, USA, American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers.

Magnussen, O. M. and T. S. Nordtvedt (2006a). Kuldeanlegget - ENØK i fiskeindustrien, Teknisk rapport, A6287.

Pham, Q. T. (1986). "Freezing of foodstuffs with variations in environmental conditions." International Journal of Refrigeration(9): 290-295.

Valentas, K. J., E. Rotstein, et al. (1997). Handbook of food engineering practice, CRC Press.

Walnum, H. T., T. Andresen, et al. (2011a). "Dynamic simulation of batch freezing tunnels for fish using Modelica." Procedia Food Science **1**(0): 698-705.

Widell, K. N. and F. Frydelund (2009). Air velocity field in an air blast freezing tunnel. Deutscher Kälte-und Klimatechnischer Verein eV.

Nordtvedt, Tom Ståle et al. SINTEF Rapport STF80 F045009 "Fremtidens pelagisk innfrysingsbedrift"



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no