

Optimal produksjon av snø fra flere produksjonsenheter i samme område

Undersøkelse av hvordan snøproduksjonen
påvirker det lokale klimaet, og hvordan
styringen av produksjonen bør tilpasses til
dette

Odd Erlend Hansen Berg

Master i industriell kybernetikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Geir Mathisen, ITK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for teknisk kybernetikk



HOVEDOPPGAVE/MASTER THESIS

Kandidatens navn: **Odd Erlend Hansen Berg**

Fag: **Teknisk kybernetikk/Engineering Cybernetics**

Oppgavens tittel (norsk) : **Optimal produksjon av snø fra et system av flere snøkanoner**

Oppgavens tittel (engelsk): **Optimal production of snow, using a system of more snow guns**

Oppgavens tekst:

Et fremtidig mål er å automatisere et system av snøkanoner for snøproduksjon, slik at systemet kan selvstendig produsere snø med ønsket kvalitet ved vekslende produksjonsforhold. Snøkvalitet kan ikke måles direkte og kontinuerlig, men er et resultat av ulike parametere (vanntemperatur, lufttemperatur, luftfuktighet, produksjonsmengde og snøkvalitet) som inngår i produksjonen.

Snøproduksjon fra en enkel snøkanon kan påvirke det lokale klimaet, og derved snøproduksjonen for de omliggende kanonene. For å kunne optimalisere snøproduksjonen i et system med flere kanoner, ønsker en derfor i oppgaven å undersøke hvordan snøproduksjonen fra en enkel kanon påvirker klimaet lokalet og hvordan vinden påvirker dette lokalklimaet.

Oppgaven består av følgende 4 punkter:

1. Gi en oversikt over hvordan moderne snøproduksjon foregår.
2. Basert på feltmålinger, utvikle en sammenheng mellom snøproduksjon og det lokale klimaet ved produksjonsstedet.
3. Med utgangspunkt i målinger foretatt i Granåsen, se på hvordan vinden påvirker koblingen mellom lokalklimaet ved en snøkanon og det omliggende lokalklimaet.
4. Basert på punkt 2 og 3, utvikle en algoritme for optimal snøproduksjon fra flere snøkanoner og foreslå hvordan denne kan verifiseres.

Oppgaven gitt: 23. januar, 2017

Besvarelsen leveres: 19. juni, 2017

Besvarelsen levert: 18. juni, 2017

Utført ved Institutt for Teknisk kybernetikk

Faglig veileder: Bjørn Aas

Trondheim, den 26.01.2017

Geir Mathisen

Faglærer

Forord

Dette er en masteroppgave skrevet ved Norges tekniske- og naturvitenskaplige universitet (NTNU)

Snø og ski er en viktig del av den norske kulturen. Jeg har selv vokst opp med ski på beina og som tidligere aktiv skiløper har jeg et nære forhold til snø enn mange. Derfor ønsker jeg at kommende generasjoner også skal ha mulighet til å nyte snøen. Med en stadig økende global oppvarming er snøen truet, og nye metoder må tas i bruk for å sikre skiidretten.

Snøproduksjon har til nå vært preget av at lokale snøprodusenter har samlet egne erfaringer og anleggene styres etter disse. Det er derimot veldig lite litteratur og forskning som beskriver prosessene. En stor utfordring i denne oppgaven har derfor vært å knytte disse erfaringene opp mot teori og fysiske målinger. I denne prosessen har Trondheim Bydrift, som styrer den praktiske driften av Granåsen vært til stor hjelp.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Geir Mathisen og ekstern veileder Bjørn Aas for meget god veiledning. I tillegg vil jeg takke Bernhard Haver Vagle ved SIAT og Trondheim Bydrift. Bernhard har bidratt med anskaffelse av værstasjoner, annet praktisk arbeid og gode innvendinger. Bydrifts ansatte i Granåsen har bidratt med alt som angår anlegget, og har velvillig svart på spørsmål om anlegget og snøproduksjonen.

Trondheim, Juni 2017

Odd Erlend Hansen Berg

Sammendrag

Global oppvarming er i ferd med å ødelegge skiforholdene mange steder. For at det fortsatt skal være mulig å drive med skiaktiviteter blir snøproduksjon en viktig bidragsyter. Også her setter klimaet begrensinger, ettersom de mest utbredte snøproduksjonsmetodene er temperaturavhengige. Denne teknikken fungerer ved at små vanndråper fordeles ut i luften, og er avhengig av klimatiske forhold for å fryse til is. Faktorer som er viktige for disse produksjonsmetodene er luft- og vanntemperatur, luftfuktighet og vind.

Utstyret som brukes til temperaturavhengig snøproduksjon er hovedsakelig to ulike typer, viftekanoner og lanser. Lansen er den ekleste. Den består av dyser for luft og vann, og er som oftest plassert i et høyt tårn. Viftekanonen er mye mer omfattende og har størst produksjonspotensial, men er dyrere i drift og innkjøp. Her er dysene plassert i en ring rundt en vifte, som blåser vannet ut i luften. Viftekanonen har større justeringsmuligheter, og er derfor valgt til bruk videre i denne oppgaven.

Granåsen er Trondheims hovedarena for langrenn. Her produseres snø for å sikre tidlige og stabile skiforhold. Utstyret som brukes til snøproduksjon er gammelt og manuelt. Derfor skal denne oppgaven vurdere hvordan et slikt anlegg kan automatiseres for å bedre effektiviteten.

For å kunne utarbeide en algoritme for optimal produksjon av snø fra flere kanoner, må kjennskap til systemet innhentes. I dette inngår sammenhengen mellom de ulike faktorene som påvirker snøproduksjonen og hvordan snøproduksjonen påvirker lokalklimaet. For å finne disse sammenhengene har måleutstyr for vann- og lufttemperatur, luftfuktighet og vind blitt plassert ut på ulike steder i anlegget. Hovedsakelig har målingene blitt foretatt i og nær nedfallet fra snøkanonene.

Resultater fra disse målingene viser at det ikke er noen endring i temperaturen som følge av snøproduksjonen. Luftfuktigheten har en økning gjennom nedfallsområdet, men det er liten påvirkning utenfor nedfallsområdet. Vind ser ut til å ha en generell påvirkning av luftfuktigheten i hele anlegget, men forholdet mellom produksjonsenheten og nedfallsområdet endres lite. Under dette prosjektet har det blitt testet med 2 snøkanoner, noe som er omtrent 19% av anleggets kapasitet. Det er sannsynlig at det er en større påvirkning med en større produksjon.

Én kanon kan automatiseres etter Tabell 12. For at dette skal kunne fungere selvstendig må kanonen utstyres med en værstasjon med målinger for luftfuktighet, lufttemperatur og vanntemperatur. I tillegg må de manuelle kranene endres til motorer, som kan styres automatisk. Med de endringene kan kanonen fungere selvstendig.

For en optimal produksjon med flere kanoner er det noe mer komplisert. Metoden beskrevet over vil fungere også med flere individuelle kanoner, men dette er ikke et optimalt nettverk. Det er en rekke faktorer som påvirker en slik styring. Denne oppgaven har ikke kartlagt alle disse, men hvor mange produksjonsenheter og hvor tett disse står antas å være avgjørende for hvor stor produksjon som er mulig. I tillegg til dette antas vinden å ha en større betydning da det foregår produksjon i større deler av anlegget.

Abstract

Global warming is about to destroy ski tracks and slopes all over the world. In order for skiing activities to continue, snow production will be an important contributor. Even for artificial snow, there are some climatic limitations to the production, as the most widely used snow production methods are temperature dependent. This technique works by distributing small water droplets into the air, and the water is dependent on climatic conditions to freeze to ice. Factors that are important for these production methods are air- and water- temperature, humidity and wind.

The equipment used for temperature dependent snow production is mainly two different types, fan guns and lances. The lance is the simplest, and consists of nozzles for air and water, most often placed at the top of a small tower. The fan gun is much more complex and has the highest production potential, but is more expensive to buy and more expensive to run. A fan blows water from nozzles, placed in a circle around the fan, into the air. The fan gun has greater adjustment possibilities and is therefore our choice for further use in this task.

Granåsen is Trondheim's main cross-country skiing area. Producing snow is a way to ensure early and consistent skiing for this area. The equipment used for snow production is old and manually. Therefore, this task consider ways to improve the plants efficiency through automation.

In order to develop an algorithm for optimal snow production from several guns, knowledge of the system has to be obtained. This includes the connection between the various factors involved in production of snow and the way snow production affects the local climate. Water- and air- temperature, humidity and wind measured at various locations in the plant helps establishing these connections. Mostly, the measurements are in and near the deposition area of the snow guns.

Results from these measurements show that there is no change in temperature due to snow production. Humidity has a slight increase through the deposition area, but there is little impact outside the deposition area. Wind appears to have a general impact on humidity throughout the plant, but the ratio between the production unit and the deposition area changes little. Two fan gun snowmakers, which is about 19% of the plant's capacity where used in this research. It is likely that larger production will have a greater impact.

A single fan gun automated according to Tabell 12 will work well. In order for this to work independently, the cannon must be equipped with a weather station with measurements of air humidity and air- and water- temperature. In addition, the manual valves need to be changed to motors that can be controlled automatically. With those changes, the cannon should work independently.

For optimal production with more fan guns, it is somewhat more complicated. The method described above will also work with several individual guns, but this is not an optimal network. Several factors affect an optimal automation. This task has not mapped all of these, but how many production units and the distance between them assumes decisive for how much production is possible. In addition to this, the wind assumes to be of great importance as production takes place in larger parts of the plant.

Metode

Denne oppgaven består av fire deler, hvor forskjellige metoder har blitt benyttet i hver del. Den første delen er et litteraturstudie, for å skaffe oversikt over hvilke teknologier som finnes, og hvilket arbeid som har blitt gjort tidligere. Hovedvekten av litteraturen har blitt oppsøkt på NTNU bibliotekets nettsider, via søkemotoren Oria. Resten av søkene har blitt gjort på hjemmesidene til leverandører av snøproduksjonsutstyr. Noe av kunnskapen i denne delen har også blitt hentet gjennom intervjuer og samtaler med ansatte i Trondheim Bydrift.

Del 2 omhandler datainnsamling. Her har temperatur, luftfuktighet og vind blitt registrert over lengre perioder, både med og uten snøproduksjon. Flere ulike målere har blitt brukt, for å dekke ulike behov. I tillegg har den rent praktiske biten av snøproduksjon blitt undersøkt grundigere i forbindelse med disse målingene. Testing av snøkvalitet og hvordan snøkanonene blir påvirket av værforholdene, og hvordan snøkanonene påvirker det lokale klimaet har også vært en stor del. Denne delen av oppgaven har bestått av store mengder praktisk arbeid, som veiing av snø og oppsyn med måleutstyr.

Del 3 omhandler analyse av data samlet i del 2. Her har hovedsakelig Microsoft Excel blitt benyttet, da dette er et format som alle målerne kan levere data til. Alle grafer som beskriver snøproduksjonen og forholdene omkring den er produsert i Excel.

Siste del omhandler utvikling av en algoritme for snøproduksjon. For å utvikle denne algoritmen har resultatene fra denne oppgaven blitt lagt til grunn. Disse resultatene og kjennskap om hvordan snøproduksjonen bør styres har blitt kombinert med reguleringsteori.

Innhold

Forord.....	iii
Sammendrag	iv
Abstract	v
Metode.....	vi
Innhold	vii
Figurliste	x
Tabelliste	xi
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Motivasjon.....	1
1.3 Spesielle utfordringer	1
1.4 Begrensninger.....	2
1.5 Bidrag.....	3
1.6 Disposisjon av oppgaven	3
2 Litteraturstudie.....	5
2.1 Temperaturavhengig snøproduksjon (TAS).....	5
2.1.1 Faktorer som påvirker snøproduksjonen	5
2.1.2 Forskjellen på kunstsne og natursne.....	7
2.1.3 typer TAS	10
2.1.4 Moderne anlegg	13
2.2 Temperaturuavhengig snøproduksjon (TUS)	14
2.2.1 Produsenter og anlegg	16
2.3 Fremtidige måter for snøgaranti	19
2.4 Snøkvalitet og bruksområder	20
2.5 Oppsummering av litteraturstudiet	21
3 Hypoteser for god snøproduksjon og måter for uttesting av disse	22
3.1 Hypoteser for god snøproduksjon.....	22
3.1.1 Automatiseringens effekt på snøproduksjon og snøkvalitet	22
3.1.2 Snøproduksjonens effekt på luftfuktigheten i nærheten av produksjonspunktet.....	22
3.1.3 Snøproduksjonens effekt på temperaturen i nærheten av produksjonspunktet	22
3.1.4 Vindens påvirkning av temperatur og luftfuktighet i produksjonspunktet.....	23
3.2 Hvordan disse hypotesene bør testes ut.....	23
3.2.1 Automatiseringens effekt på snøproduksjon og snøkvalitet	23
3.2.2 Snøproduksjonens effekt på luftfuktigheten i nærheten av produksjonspunktet.....	24
3.2.3 Snøproduksjonens effekt på temperaturen i nærheten av produksjonspunktet	24

3.2.4 Vindens påvirkning av temperatur og luftfuktighet i produksjonspunktet.....	24
4 Testing av hypoteser	25
4.1 Granåsen som testarena	25
4.1.1 Granåsenområdet generelt	25
4.1.2 Testområde	26
4.2 Utstyret benyttet i testingen.....	28
4.2.1 Lenko Northwind 450.....	28
4.2.2 Værstasjoner	28
4.2.3 EXTECH RHT 10	29
4.2.4 Målebeger	30
4.3 Praktisk utførelse av testingen	31
4.3.1 Testperiode 1, tidlig i februar	31
4.3.2 Testperiode 2, tidlig mars.....	36
4.4 Hvordan finne sammenhengen mellom snøkvalitet og andre variabler som inngår i snøproduksjon.....	36
4.5 Testing av hvordan snøproduksjonen påvirker seg selv og eventuelle nærliggende produksjonspunkt.....	38
4.5.1 Måling av luftfuktighet i nedfallsområdet.....	39
4.5.2 Måling av luftfuktighet i umiddelbar nærhet utenfor produksjonsområdet	40
4.5.3 Registrering av endringer i luftfuktigheten ved endringer i produksjonen.....	40
4.5.4 Måling av temperatur i nedfallsområdet	41
4.6 Testing av vindens påvirkning på våtkuletemperaturen	41
5 Resultater fra testingen.....	43
5.1 Forholdet mellom snøkvalitet etter egendefinert skala og andre variabler	43
5.2 Hvordan snøproduksjonen påvirker seg selv	44
5.2.1 Luftfuktighet i nedfallsområdet.....	44
5.2.2 Luftfuktighet i produksjonens umiddelbare nærhet.....	46
5.2.3 Hva skjer med luftfuktigheten ved endringer i produksjonen	46
5.2.4 Temperatur.....	48
5.3 Hvordan vinden påvirker snøproduksjonsforholdene	50
5.3.1 Vindmålinger under oppstart av snøproduksjon	50
5.3.2 Vindmålinger under målingene gjennom nedfallsområdet.	52
5.3.3. Vindmålinger for hele produksjonsperioden	52
6 Vurderinger og kommentarer til resultatene.....	54
6.1 generelle betraktninger.....	54
6.2 Forholdet mellom snøkvalitet etter egendefinert skala og andre variabler	54

6.3 Luftfuktighet	55
6.3.1 Figur 23: Luftfuktighet i nedfallsområdet.....	55
6.3.2 Figur 24: Luftfuktighet i forskjellige avstander fra produksjonen	56
6.3.3 Figur 25: Oppstart av snøproduksjon i upåvirket anlegg	56
6.3.4 Figur 26: Kort stans i produksjonen etter lang kontinuerlig produksjon	57
6.4 Temperatur.....	57
6.5 Vind.....	57
6.5.1 Figur 29: Luftfuktighet og vindhastighet ved oppstart av produksjon.....	58
6.5.2 Tabell 13: Sammenlikning av testserier og vindretning og -hastighet.....	58
6.5.3 Figur 32: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 1.....	59
6.5.4 Figur 33: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 2.....	59
6.6 Oppsummering av vurderingene, og betraktninger om optimal produksjon av snø.....	60
7 Utvikling av en algoritme for optimal snøproduksjon med flere kanoner	62
7.1 Reguleringssteknikk	62
7.2 Optimal snøproduksjon med en kanon	63
7.2.1 Oppsettet for snøkanonen	63
7.2.2 Styring av snøkanonen	63
7.3 Optimal snøproduksjon med et nettverk av kanoner	64
8 Konklusjon	66
9 Videre arbeid	67
Referanseliste.....	69
Vedlegg.....	70
Vedlegg 1: Vanntemperaturer for Leirsjøen	70
Vedlegg 2: Driftslogg Snøproduksjon 2017	71
Vedlegg 3: Våtkuletemperatur for værstasjoner 01.02.2017 til 31.03.2017	73

Figurliste

Figur 1: Klassifiseringssystem for snøkrystaller(Fauve et al., 2002)	8
Figur 2: Massetetthet nysnø(Fauve et al., 2002).....	8
Figur 3: Snøproduksjon fotografert med IR-kamera	9
Figur 4: Samme bilde som Figur 3, men med vanlig kamera	10
Figur 5: Eksempel på lanse. Denne er liten, og enkel, og egner seg godt for produksjon i mindre anlegg, og smale traseer (Sundby, 2015)	11
Figur 6: Eksempel på viftekanon. Lenko Northwind, under produksjon i Granåsen	12
Figur 7: Energi- volum forhold for lanse og viftekanon for negative T_v .(Vagle, 2016).....	13
Figur 8: Produksjonspotensial for lanse og viftekanon for negative T_v (Vagle, 2016)	13
Figur 9: Flakismaskin(Graham et al., 1993)	15
Figur 10: Plateismaskin(Graham et al., 1993)	15
Figur 11: Snowfactory i forskjellige konfigurasjoner(TechnoAlpin)	17
Figur 12: Skisse av SnowMagic produksjonsenhet. 31: Vannbeholder 33: Produksjonsenhet 34: Kjøleelement 35: Transportskrue 36: Patentert kvern 45: Nyprodusert snø(Katayama, 2000)	18
Figur 13: Skjematisk tegning av VIM100 Snowmaker2go(technologies, 2013)	18
Figur 14: SnowGen (SnowTec, 2017).....	19
Figur 15: Oversiktskart over Granåsen, værstasjoner og snøproduksjonsområdet. Utsnittet viser hvor produksjonen foregikk og pilen beskriver produksjonsretningen.	26
Figur 16: To Lenko Northwind 450 under produksjon ved snølageret.	27
Figur 17: Værstasjon til venstre og RHT 10 til høyre	29
Figur 18: Målebeger, isboks med plastikkpose.	31
Figur 19: Delvis nedsnødd måler, etter 13 timer uten tilsyn	32
Figur 20: Testvekt fra kl.09.51, 1103g tilsvarer kvalitet 6, og det ble produsert med 3 ringer.....	33
Figur 21: Utgravd område fra leting etter måler på 20m.....	35
Figur 22: Forhold mellom T_v og snøkvalitet for ulikt antall ringer.....	43
Figur 23: Luftfuktighet i nedfallsområdet	45
Figur 24: Luftfuktighet i forskjellige avstander fra produksjonen	46
Figur 25: Oppstart av snøproduksjon i upåvirket anlegg	47
Figur 26: Kort stans i produksjonen etter lang kontinuerlig produksjon	48
Figur 27: Temperatur i nedfallsområdet.	49
Figur 28: Temperatur i nedfallssonen uten test 3 og 4	50
Figur 29: Luftfuktighet og vindhastighet ved oppstart av produksjon.....	51
Figur 30: Vindrose målepunkt Nord, grafen viser antall målinger for hver retning, uten nullverdier ..	51
Figur 31: Vindrose målepunkt Vest, grafen viser antall målinger for hver retning, uten nullverdier ...	51
Figur 32: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 1	53
Figur 33: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 2	53
Figur 34: Værstasjon Nord montert i tre etter kraftig snøfall	60
Figur 35: Tilbakekoblet reguleringsløyfe.....	62
Figur 36: Tilbakekoblet reguleringsløyfe med estimator til bruk i snøkanon.....	62
Figur 37: Sky over snøproduksjon. Foto: Ole P. Tangnæs, Trysilfjell Hytter	64

Tabelliste

Tabell 1: Konverteringstabell fra RH og lufttemperatur til våtkuletemperatur, med snøkvalitetsindikator (SnowatHome).....	7
Tabell 2: Sammendrag av ulike temperaturavhengige snøproduksjonsmetoder.....	12
Tabell 3: Snøkvalitet(Industries, 2015).....	20
Tabell 4: Snøkvalitet(Gjerland and Olsen, 2014).....	20
Tabell 5: Spesifikasjoner RHT10.....	30
Tabell 6: Snøkvalitet(Gjerland and Olsen, 2014) og masse av målebeger.....	32
Tabell 7: Protokoll ført under testingen.....	33
Tabell 8: Forhold mellom T og antall ringer.....	37
Tabell 9: Snøkvalitetsskala beregnet for kunstsne.....	38
Tabell 10: Oversikt over tidspunkt for ulike tester.....	39
Tabell 11: Tidspunkt og posisjon for målerne. 20m(27xx) 1min og Noname 30sek svarer til navnet på måleren og samplingsintervallet.....	40
Tabell 12: Forhold mellom T_v , antall ringer og snøkvalitet.....	44
Tabell 13: Sammenlikning av testserier og vindretning og -hastighet.....	52
Tabell 14: Forhold mellom T_v , antall ringer og snøkvalitet.....	66

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Granåsen skisenter ønsker å arrangere VM i nordiske grener i nærmeste framtid. Søknaden for 2021 ble avslått, men en ny søknad for 2023 er under utarbeiding. I den forbindelse må anlegget kunne garantere snø. Vintrene de siste årene har blitt stadig mildere og naturlig snø er ikke lengre noen selvfølge (Schlaupitz, 2014, Vagle, 2016). Derfor må anlegget kunne produsere kunstsne i så store mengder at et mesterskap kan gjennomføres utelukkende på kunstsne. Dette er en stor oppgave, ettersom anlegget i Granåsen har en del utfordringer. Klimaet i anlegget er et typisk kystklima, med relativt milde vintre, og stor luftfuktighet, noe som er en utfordring for snøproduksjonen. I tillegg tappes vannet som brukes fra et naturlig vann i nærheten. Vanntemperaturen er også påvirket av klimaet, og holder derfor ofte en relativt høy temperatur. Dette er faktorer som ikke er gunstige for snøproduksjonen. Med disse faktorene til grunn er det i dag ikke mulig å produsere snø på temperaturer høyere enn -5°C . I 2015 var det registret 32 dager der temperaturen på ett tidspunkt i løpet av dagen var under -5 grader på Saupstad værstasjon, noen km fra Granåsen (Eklima, 2016). Derfor må det produseres mest mulig snø på de dagene det er mulig å produsere. Tidligere har dette ønsket om å produsere mest mulig snø ført til at luften i anlegget har blitt mettet med fuktighet og snøproduksjon har måttet stanse inntil luften naturlig har blitt skiftet ut.

Dette problemet ønsker denne oppgaven å løse. Tidligere ble snøkanonene styrt manuelt, med hovedsakelig lufttemperatur som styringsparameter og det ble produsert for fullt helt til produksjonspotensialet ble overskredet og anlegget måtte stoppes. Ved å automatisere produksjonen bør det være mulig å styre snøproduksjonen etter flere parametere, slik at produksjonsstopp kan unngås. Dette vil gi en mer effektiv snøproduksjon. En mer nøyaktig kontroll av snøproduksjonen vil også gi bedre muligheter for å produsere snø i marginale forhold.

For å kunne automatisere produksjonen av snø må sammenhengen mellom alle parameterne som inngår i produksjonen kartlegges. Store deler av oppgaven har derfor blitt viet til måling og kartlegging av disse parameterne. Avslutningsvis har det blitt lagt fram et forslag til styring, men ingen programmering er med i denne oppgaven.

1.2 Motivasjon

Tidligere har snøkanonene til Trondheim Bydrift blitt styrt manuelt, ut fra lufttemperatur med kontroller med relativt varierende tidsrom. I et område der temperaturen endres raskt kan dette føre til at snøen som blir produsert ikke holder ønsket kvalitet, eller at produksjonskapasiteten ikke utnyttes fullt ut. Derfor er det ønskelig å automatisere disse snøkanonene, slik at styringen blir mer optimal. Dette kan føre til at det produseres mer snø med ønsket kvalitet. Behovet for bemanning vil også reduseres, da kanonen kan regulere seg selv i større grad.

1.3 Spesielle utfordringer

Som de fleste oppgaver har også denne bygd på en rekke utfordringer. En stor forskjell fra mange andre oppgaver er at her foregår all testing utendørs, og rådende værforhold setter føringer for arbeidet. For å kunne utføre tester på snøproduksjonen er kuldegrader nødvendig. Dette har vært den største utfordringen. Ettersom det er få dager som er kalde nok til å produsere snø i området, har det vært meget viktig å utnytte disse. Derfor har det vært nesten umulig å planlegge arbeidet med

testingen. Periodene med kulde er vanskelig å forutse, og umulig å påvirke. Dette har resultert i at testingen har foregått både kveld og helg i de periodene det har vært kaldt nok.

Det at alt foregår utendørs og åpent for publikum har også gitt noen utfordringer. Ved tunge snøfall har snøen lagt seg på værstasjonene, slik at vindmåleren har blitt for tung til at vinden kan påvirke den. Dermed har snøen måtte fjernes fra målerne etter store snøfall. Vind har også gitt noen problemer. Flere av målerne har veltet som følge av vind. Andre problemer som har blitt oppdaget ved at målingene har vist rare verdier er inngrep av forbigående. Fallende spenningsnivåer har flere ganger vært forårsaket av at ladekabelen har blitt koblet ut. Det har også vært problemer med at målerne av en ukjent grunn har sluttet å sende signaler. Alle problemer nevnt overfor krever at man tar en tur opp i Granåsen for å sjekke. Det at anlegget ligger litt unna, kombinert med at det er viktig med kontinuerlige data har gjort at mye tid har gått med til kontroll av systemet. Dette skiller seg fra mange oppgaver som er mer labbasert og behovet for kontinuerlige målinger er ikke så stort.

En annen utfordring er at mange av målingene har foregått inne i nedfallet fra kanonene. Dermed er det et stort snøfall over målerne. Til tross for at de har vært plassert på 1,5m høye bambuspinner har disse flere ganger snødd ned. For å unngå dette har de vært behov for oppsyn hver 12. time under produksjonen. Noen ganger har det blitt strukket over 12 timer, og da har målerne vært nedsnødd. Dette har ført til graving og mye ekstra arbeid.

Snøproduksjon er vann sprutet ut i luft i minusgrader. Dette er heller ikke spesielt hyggelige forhold å arbeide under. For å måle kvaliteten på snøen må målingene skje inne i nedfallsområdet, og som nevnt over er det her et snøfall på anslagsvis 3 m pr. døgn. Å bevege seg inne i dette nedfallet gjør at man blir våt nesten umiddelbart. Produksjonen foregår som nevnt i minusgrader, så mye av klærne fryser til is, og blir ubehagelig kalde etter hvert. Derfor har det å kle seg rett også blitt en forutsetning for å kunne gjennomføre testingen på en ikke alt for kald måte.

1.4 Begrensninger

Tidligere erfaringer viser at det er mulig å mette anlegget med påvirket luft fra snøproduksjonen. Dette er noe som bør unngås i fremtiden. Derfor er denne oppgaven blitt igangsatt. Dessverre har ikke slike forhold blitt registrert under testingen i denne oppgaven. Dette har ført til at hva som skjer under en slik metning fortsatt ikke er kartlagt. Grunnen til at anlegget ikke har blitt mettet denne gangen kan være at det ikke har blitt produsert i store nok mengder. Da testingen startet lå det allerede snø i anlegget, så produksjonen var utelukkende for supplering. Dermed var det ikke behov for like store mengder.

Andre forhold som ikke har kunnet bli kartlagt er vanntemperaturen. Den har vært konstant, og tilnærmet optimal, under hele testingen. Dette har ført til at vi ikke har kunnet finne sammenhengen mellom vanntemperatur og våtkuletemperatur for en gitt snøkvalitet. Litteraturen tilsier at en høyere vanntemperatur vil gi en lavere snøkvalitet for en gitt våtkuletemperatur. Dette kommer til å bli nevnt under utviklingen av algoritmen, men hvor mye det må kompenseres for økt vanntemperatur er ikke kjent.

Hvordan forholdene endres med høyde over bakken er heller ikke kjent. Alle målinger av har foregått på bakkeplan. Det er mulig at forholdene endres høyere opp, og disse endringene har ikke blitt plukket opp. Optimalt burde det vært en måler i 30-40m høyde over produksjonsområdet, men dette har ikke latt seg gjøre rent praktisk.

Det er også en rekke forhold som ikke har latt seg teste grunnet korte perioder med produksjon, og Trondheim kommunes ønske om å produsere mest mulig snø. Hadde det vært en lengre periode med stabile produksjonsforhold hadde det vært mulig å skaffe enda bedre og sikrere målinger. Produksjon med få ringer i kalde temperaturer, for å produsere best mulig kvalitet har ikke blitt prioritert. Dette kunne gitt noen forskjellige resultater, og er kommentert senere i oppgaven. Likevel har oppgaven samlet inn tilfredsstillende mengder data til å kunne trekke konklusjoner.

1.5 Bidrag

Tidligere har snøproduksjonen blitt styrt manuelt, og hovedsakelig ut fra lufttemperaturen. Det nye som har blitt gjort i denne oppgaven er å undersøke hvordan snøproduksjonen påvirker området rundt. Både temperatur, luftfuktighet og hvordan vinden henger sammen med dette har blitt undersøkt. Dette gir en mulighet til å bedre forutse hvordan snøproduksjon vil endre produksjonsforholdene i nærmeste framtid. Analyser av vind vil også gi innsikt i muligheter for å utnytte vinden til å øke anleggets produksjonskapasitet.

Automatisering av snøproduksjonen ut fra våtkuletemperatur er ikke noe nytt, men det å ta hensyn til vind og hvordan produksjonsenheter vil påvirke hverandre har ikke blitt gjort. Det er derfor noen helt nye styringsparametere som blir vurdert og tatt med i denne oppgaven.

1.6 Disposisjon av oppgaven

Oppgavebeskrivelsen og overskriften fokuserer mye på automatisering av snøproduksjonen. For å kunne gjøre det må en grunnleggende forståelse av snøproduksjonen ligge til grunn. Det har derfor blitt lagt stor vekt på målinger og utvikling av sammenhengen mellom de ulike parameterne. Ut fra dette har det blitt utviklet en algoritme for snøproduksjon. Ettersom store deler av oppgaven har blitt viet til å kartlegge produksjonens påvirkning, har automatiseringen blitt noe nedprioritert. Nedenfor følger en oversikt over alle kapitler og hva de inneholder.

2 Litteraturstudie

Dette er et kapittel som oppsummerer ulike snøproduksjonsmetoder. Det inneholder beskrivelse av ulike metoder, utstyrsmodeller og hvilke forhold de kan operere under.

3 Hypoteser for god snøproduksjon og måter for uttesting av disse

Her presenteres en rekke hypoteser, som resten av oppgaven forsøker å bekrefte. Metoder for å teste dette presenteres også.

4 Testing av hypoteser

Dette kapittelet beskriver hva som har blitt gjort i de ulike fasene av prosjektet, med beskrivelse av hvorfor testingen har blitt utført på den bestemte måten.

5 Resultater

Her presenteres alle resultatene fra testingen. Alle resultater er grafisk framstilt og godt beskrevet.

6 Vurderinger og kommentarer til resultatene

Kapitlet inneholder vurderinger av resultatene som ble framstilt i kapittel 5. Faktorer som resultatenes troverdighet, feilkilder og annen påvirkning blir kommentert her.

7 Utvikling av en algoritme for optimal snøproduksjon med flere kanoner

Litt kort om reguleringsteknikk vurdert opp mot det spesifikke problemet denne oppgaven beskriver. Deretter følger en strategi for styring av en enkelt snøkanon samt hvordan et nettverk av slike bør settes sammen.

8 Konklusjon

I dette kapitlet kommer konklusjonen av hele oppgaven. Hvordan ting henger sammen, og om hypotesene stemmer eller ikke.

9 Videre arbeid

Siste kapittel er viet til å beskrive de funnene som har blitt gjort i denne oppgaven, men som ikke har blitt undersøkt videre. Begrensinger i tid er hovedgrunnen til at disse funnene ikke har blitt undersøkt grundigere. Her er det gode muligheter for å finne andre interessante oppgaver å bygge videre på.

2 Litteraturstudie

Produksjon av snø er ikke noe nytt fenomen, men blir stadig mer aktuelt, ettersom vintrene blir mildere. (Schlaupitz, 2014) Allerede på 1940-tallet ble det produsert kunstig snø ved en tilfeldighet. I et forsøk på å simulere ising i en jetmotor ble det dannet snø og ikke is. Snøproduksjon var ikke formålet med forsøket, og det ble derfor ikke tatt noen patent på en snømaskin. Det ble gitt ut et vitenskapelig tidsskift, om hvordan snø ble produsert ved å fordele vannpartikler ut i kald luft. (Bellis, 2016) Det første patentet på en snømaskin kom i 1954 og tilhørte Wayne Pierce. Han var deleier av en skiprodusent, som ble hardt rammet av en varm vinter, og ønsket å løse dette problemet. Dermed ble den første snømaskinen laget. Dette var en innretning av slanger, dyser og kompressorer, som fordelte vannpartikler ut i den kalde luften. Siden den gang har det vært en stor utvikling i snøproduksjonsutstyr, og her kommer et sammendrag. Først blir den tradisjonelle snøproduksjonsmetoden beskrevet, deretter følger et delkapittel om temperaturavhengig snøproduksjon. Avslutningsvis kommer en beskrivelse av snøkvalitet og et kort sammendrag.

2.1 Temperaturavhengig snøproduksjon (TAS)

Som navnet tilsier er dette en snøproduksjon som er avhengig av klimatiske forhold. Dette er den mest utbredte snøproduksjonsmetoden, og snøen produseres ved at vann i små dråper sprutes ut i luften og blir kjølt av lufta. Derfor må lufta være under frysepunktet for at vannet skal kunne omdannes til snø. Derav navnet temperaturavhengig.

2.1.1 Faktorer som påvirker snøproduksjonen

Det er mange faktorer som påvirker snøproduksjonen, og alle påvirker hvor fort vannet kan fryse til is. For at et krystallisk materiale, som vann, skal kunne størkne må varme fjernes til temperaturen er under frysepunktet. For vann er dette 0°C. Det er likevel ikke tilstrekkelig å kjøle vannet til under frysepunktet. Det er også behov for partikler i vannet, som iskrystallene kan starte utfellingen på. Det er derfor ikke ideelt å bruke drikkevann i produksjon av snø da dette er rensed for disse partiklene. Derfor bør vannet tappes fra innsjøer eller liknende. Det finnes også produkter, som Snowmax, som kan tilsettes for å øke utfellingen av krystaller i vannet.

Masse og varme kan overføres ved fordampning og konveksjon. Konveksjon er overførsel av varme, altså hvor fort varme kan fjernes fra vannet og overføres til lufta rundt. Forutsatt at det er tilstrekkelig med partikler i vannet for utfelling, er alle faktorer basset på konveksjon eller fordampning. Faktorer som inngår i konveksjon er lufttemperatur, vanntemperatur, vindhastighet, dråpestørrelse, falltid og temperaturen i bakken. Hvor fort vannet vil fryse er naturlig nok avhengig av temperaturen både på vannet og luften. For å kjøle ned vann trengs 2,1 kilojoule/(kilogram*Kelvin) ved en vanntemperatur på 0°C. I tillegg må ytterligere 332 kilojoule/kilogram fjernes for at frysingen skal skje. Dette er en stor mengde energi, som overføres til lufta i produksjonsområdet. (Fauve et al., 2002). Derfor er det optimalt med så lave temperaturer som praktisk mulig både for vann og luft. Dermed er det minst mulig varmeenergi som må overføres fra vannet til luften og luften kan lett ta opp denne energien, i form av oppvarming.

Vindhastigheten er også en viktig faktor i Snøproduksjonen. Vinden vil sette luften bevegelse, slik at luften i produksjonsområdet, som må ta til seg energien avgitt i overgangen fra vann til snø, kan byttes ut. Derfor er moderate vindhastigheter gunstig for en mest mulig effektiv produksjon. Bli det for mye vind vil derimot snøen drive vekk fra produksjonsområdet, og lande på uønskede steder. Her finnes det et skjæringspunkt, som enda ikke er kartlagt. Temperaturen i bakken der snøen lander er

også en faktor som må tas med. Hvis det ikke er frost i bakken, vil snøen starte smeltingsprosessen i det den lander. Dermed blir det et stort tap i produksjonen.

Dråpestørrelsen er en meget viktig faktor. Overføring av varme mellom materialer skjer via overflaten. Dermed er det ønskelig å ha et forhold mellom overflate og energi som er så stort som mulig. Dette kan oppnås ved å minske dråpestørrelsen mest mulig. Dråpestørrelsen påvirker også falltiden til dråpene. En dråpe med størrelse 100 μm har en fallhastighet på om lag 0,3 m/s, mens en dråpe med størrelse 700 μm har en fallhastighet på om lag 3 m/s (Chen and Kevorkian, 1971). En mindre fallhastighet vil gi lengre tid til å utveksle energi med lufta omkring, men den blir mer sårbar for vind. Dermed er dråpestørrelsen et kompromiss mellom avkjølingshastighet og robusthet i forhold til ikke kontrollerbare forhold. En optimal dråpestørrelse ansees derfor å være i området 200-700 μm .

Falltiden er ikke bare påvirket av dråpestørrelsen, men også av høydeforskjellen på produksjonsenheten og hvor snøen lader. Det er derfor en fordel å kunne produsere fra så store høyder som mulig, men dette blir ofte i praksis vanskelig. Ved en økt falltid vil også vinden spille en større rolle. Dette er faktorer som optimalt sett bør justeres etter vindforholdene.

Av faktorer som ikke bidrar med konveksjon er relativ luftfuktighet. Denne bidrar til fordampning. Relativ luftfuktighet er et mål for hvor mye fuktighet lufta inneholder relativt maksimal fuktighet for et gitt trykk og temperatur, og beskriver hvor mye fuktighet som kan fordampe. Ved 100% er luften mettet, og fordampning kan ikke lengre skje uten at noe luft kondenserer til dråper. Derfor kalles dette punktet Duggpunkt. Ved fordampning vil det skje en nedkjøling. For å omdanne vann til damp kreves en transformeringsenergi på 2260 kilojoule/kilogram. Dette er da energi som trekkes ut av lufta i form av varme, og det blir kaldere i lufta. Dette gir igjen økt konveksjon.

Det er som sagt mange faktorer som spiller inn i snøproduksjonen, men bare noen av dem endres raskt nok til å kunne anses som variabler. Faktorer som vanntemperatur, dråpestørrelse, bakketemperatur, partikler i vannet og falltid kan anses som konstante under produksjonen. Dermed er lufttemperatur, luftfuktighet og vindhastighet de mest varierende faktorene. Hvordan vind påvirker produksjonen er lite undersøkt, og er en stor del av denne oppgaven. De to andre faktorene derimot er meget godt behandlet tidligere. Sammen dekker disse både konveksjon og fordampning, slik at en felles verdi vil kunne gi en indikasjon på muligheten for snøproduksjon. Denne felles verdien kalles våtkuletemperatur og beregnes ut fra lufttemperatur, relativ luftfuktighet og trykk. Denne temperaturen kan måles ved å surre en våt klut rundt et termometer. Termometeret vil være påvirket av både fordampning fra kluten og konveksjon fra lufta rundt. Derav navnet våtkuletemperatur. Som nevnt tidligere vil det ikke foregå fordampning ved 100% luftfuktighet. Dermed er T_v og T like ved 100% luftfuktighet, og T_v avviker mer fra T jo lavere luftfuktigheten blir. (Stull, 2011, Snowmakers).

Tabell 1: Konverteringstabell fra RH og lufttemperatur til våtkuletemperatur, med snøkvalitetsindikator (SnowatHome)

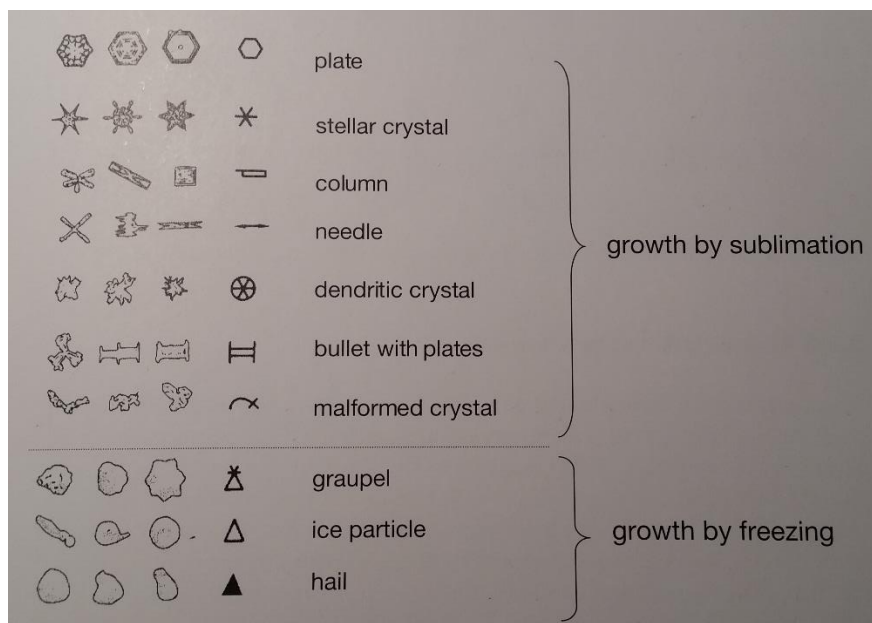
Temp C	Good Snow Quality					Poor Snow Quality							No Snowmaking							
	Humidity	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
-9	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-9	-9
-8	-12	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8
-7	-10	-10	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-7
-6	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6
-5	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5
-4	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4
-3	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3
-2	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2
-1	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1
0	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0
1	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1
2	-4	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	1	2	2
3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
4	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4

Tabell 1 viser en konverteringstabell fra temperatur og luftfuktighet til T_v , satt opp av SNOWatHOME. Ved å følge temperaturen i °C (rød) og luftfuktigheten (blå) kan man finne T_v (svart). Rutene er også markert med turkis, lilla eller rødt. Dette indikerer snøkvaliteten ved de forskjellige temperaturene. Ved overgang fra turkis til lilla vil snøen gå fra tørr til våt. Snøkvalitet er i denne sammenhengen brukt som snøens innhold av fuktighet, og lavere fuktighetsinnhold vurderes som høyere kvalitet. Dette er en generell betraktning, og varierer med hva snøen skal brukes til. Se kapittel 2.4 Snøkvalitet og bruksområder.

2.1.2 Forskjellen på kunstsne og natursne

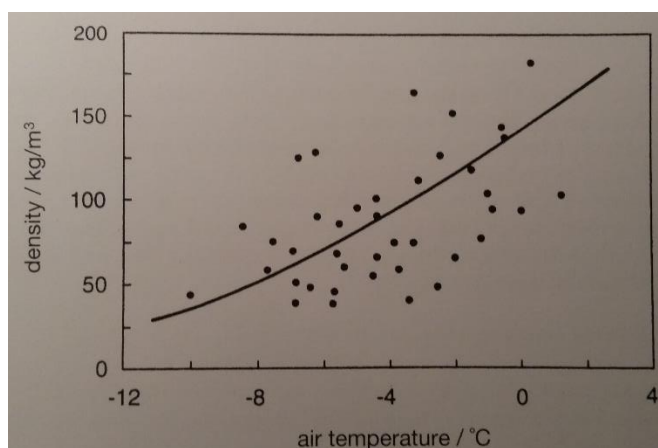
I utgangspunktet starter utviklingen av både kunstsne og natursne på samme måte. Vann kjølt under frysepunktet binder seg til små partikler i lufta og blir til en kjerne med is. For at dette skal skje på en naturlig måte må noen krav være oppfylt. Temperaturen må være under vannets frysepunkt, 0°C, små støvpartikler som vannet kan binde seg til må være til stede og det må være tilstrekkelig høy luftfuktighet. Som nevnt tidligere vil vann feles ut av lufta ved 100% luftfuktighet. Noe av det vannet som felles ut vil forbli vann, som er underkjølt, grunnet mangel på partikler for utfelling. Noe av vannet vil felles ut til is på de partiklene som er til stede. Skyer består derfor av vanddamp, underkjølte vanndråper og ispartikler, hvis temperaturen er lav nok. Herfra kan det dannes to typer sne. Krystallvekst via frysing eller via sublimasjon. Sne skapt via frysing skjer ved at de underkjølte dråpene i lufta kommer i kontakt med ispartiklene og fryser umiddelbart. Denne typen sne er mye mer avrundet, og har ikke de karakteristiske stjerneformene. Se nederste del av Figur 1 (Fauve et al., 2002)

Sne dannet via sublimasjon skjer ved at vanddamp fra underkjølt vann og små ispartikler sublimerer til iskrystaller på de større ispartiklene. Snekrystaller vil ikke bestå av kun det ene eller andre, men være en blanding av frysing og sublimasjon.



Figur 1: Klassifiseringssystem for snøkrystaller (Fauve et al., 2002)

Tettheten til naturlig snø varierer mye etter forholdene. Generelt kan man si at jo kaldere det er, jo lavere er tettheten til snøen. Nyfalle snø varierer ifølge Figur 2 med temperaturen. Typisk fra under 50kg/m^3 til opp mot 300kg/m^3 . Gammel naturlig snø kan derimot variere mye mer ut fra hva den har vært utsatt for. Varme temperaturer gjør at snøkrystallene smelter fra kantene og blir mindre i utstrekning, dermed kan de pakkes tettere og tettheten økes. Det samme gjelder fokksnø, der vinden har komprimert snøen. I slike situasjoner kan snøvekten for naturlig snø komme opp i 400kg/m^3 (Lippestad, 2009)

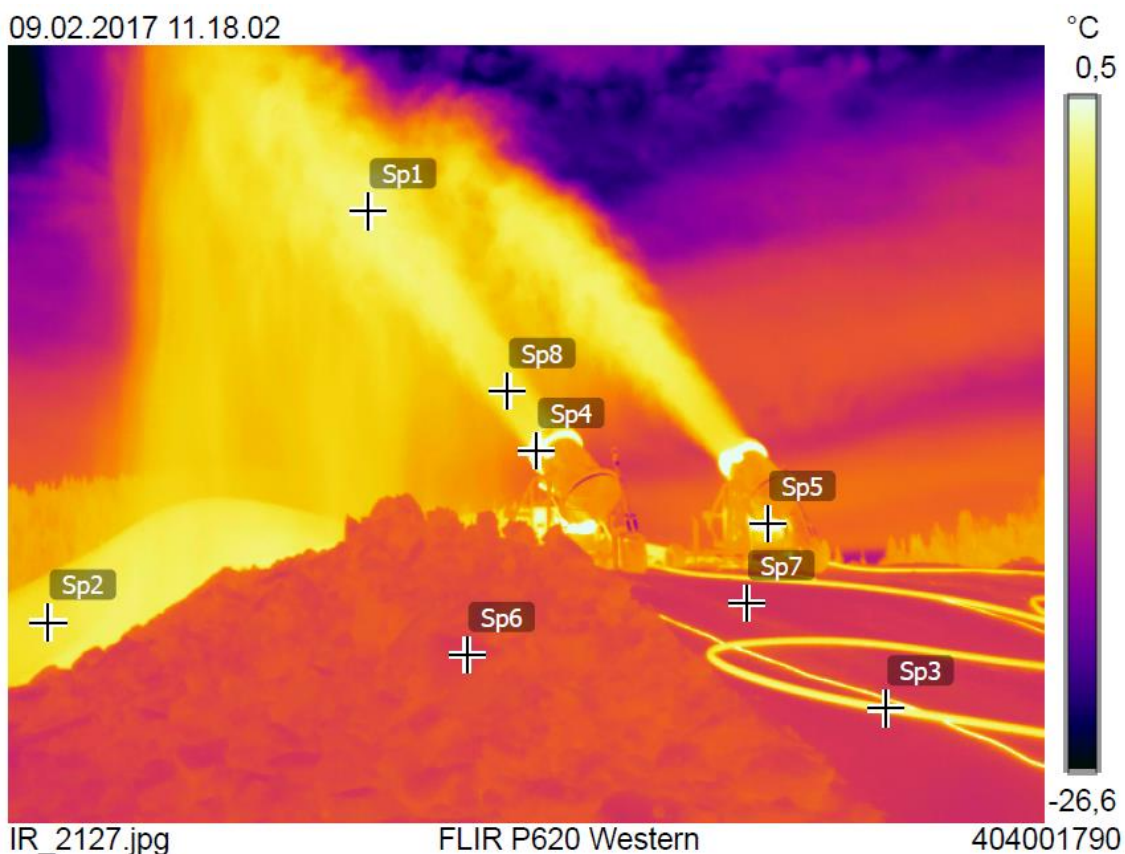


Figur 2: Massetetthet nysnø (Fauve et al., 2002)

Kunstig snø skiller seg en del fra den naturlige snøen. Den kan minne noe om naturlig snø skapt via frysing, men med litt forskjellige egenskaper. Der naturlig snø skapt via frysing starter som en liten ispartikkel, for så å bygge på lagvis utover har kunstig snø et litt annet frysingsforløp. Her er det hele dråper som settes ut i den kalde luften. Frysingsprosessen starter også her ved at vannet først fryser i nærheten av små partikler. Deretter vil dråpen fryse gradvis utenfra og innover. Dette fører til at trykket inne i dråpen øker, ettersom vann utvides ved frysing. Dette trykket fører til at hele dråpen som oftest sprekker. Dette skaper små skarpe isflak, som er årsaken til at kunstsnø bindes så godt sammen.

Tettheten til kunstig snø er også mye høyere enn naturlig snø ettersom snøflakene er mye mer kompakte, og kan pakkes tettere. Nyfallen kunstig snø har tetthet mellom 300 og 500kg/m³. Grunnen til denne variasjonen er hvor mye vann som forbrukes i forhold til temperaturen. De fleste snøkanoner kan justere mengden vann, for å kompensere for endringer i temperatur, slik at tettheten til snøen blir som ønsket.

I behandlingen av snøen er det også noen forskjeller. Der naturlig snø kan behandles med løypemaskiner og annet bearbeidingsutstyr direkte, må kunstsnøen ligge minimum noen timer før behandling. Grunnen til dette er at alt vannet ikke fryser direkte. Noe av vannet vil blande seg inn mellom snøkrystallene, og noe vil fortsatt være væske innerst i snøkrystallene. Hvis denne snøen blir bearbeidet direkte vil vannet som er stengt inne i krystallene og vannet som er mellom krystallene trenge inn i snøen og fryse til is. Dermed blir overflaten meget hard og isete, og lite egnet for skiaktiviteter. Derfor er det viktig at snøen får hvile tilstrekkelig tid, slik at all snøen holder minusgrader før den bearbeides. For at minusgrader skal opptre i hele haugen på vannet som er igjen også fryse. Da dette vannet fryser avgis det en stor mengde varme. Derfor vil temperaturen i den nyproduserte snøen alltid ligge omkring 0°C. Dette kan også sees i Figur 3. Figuren viser tydelig forskjeller i temperatur på den gamle snøen som kanonene står på, og den nyproduserte snøen i haugen bakenfor. Snøen som kanonene står oppstilt på har vært lagret i flere dager. Figur 4 viser hvordan området ser ut med vanlig kamera.



Figur 3: Snøproduksjon fotografert med IR-kamera



DC_2128.jpg

Figur 4: Samme bilde som Figur 3, men med vanlig kamera

2.1.3 typer TAS

Temperaturavhengig snøproduksjon kan deles inn i 4 forskjellige produksjonsmetoder egnet for skiaktiviteter (Industries, 2015). En kort oversikt finnes i Tabell 2

- **Luft/vann systemer**

Dette er den opprinnelige produksjonsmetoden som Pierce tok patent på. Vann og luft under trykk sprutes ut gjennom dyser. Disse dysene er plassert på et tårn eller en kjelke, og kan flyttes rundt. Normalt har disse mellom 2 og 20 dyser. Disse systemene produserer relativt mye snø og fungerer godt i marginale forhold. Likevel er de i ferd med å bli faset ut, og lanser overtar for disse systemene. Grunnen til dette er at forbruket av trykkluft er meget stort. Dette skaper både et stort energibehov og mye støy sammenliknet med en lanse.

- **Lavenergi luft/vann systemer (lanser)**

Lansene benytter samme prinsipp som luft/vann systemene, men har et modifisert system for levering av trykkluft. Dette gjør at forbruket av luft er 70-75% lavere. Dette fører til lavere energiforbruk og lavere støynivå. Forskjellen på lanser og luft/vann systemet er at luftstrømmen er stupet til et minimum. Dette gjør at vandrdåpene får en lavere hastighet ut fra produksjonsenheten. For å kompensere for dette er lansene formet som lange stenger, slik at høyden som vannet sprutes ut fra øker falltiden. Dermed vil en lanse sprute snøen kortere enn luft/vann. Dette er en fordel med tanke på eksakt plassering av snøen. I tillegg til at den er liten lett og enkel å håndtere, se Figur 5. Dette gjør at lanser er meget populære for bruk i smale løyper og mindre anlegg. Den reduserte falltiden gjør at lanser ikke fungerer like optimalt i marginale temperaturer som luft/vann, men ved lavere temperaturer har den en like god produksjonskapasitet.



Figur 5: Eksempel på lanse. Denne er liten, og enkel, og egner seg godt for produksjon i mindre anlegg, og smale traseer (Sundby, 2015)

- **Vannsystemer**

Dette er den enkleste formen for snøproduksjon. Her sprutes vann under trykk ut i kald luft. Fordelene med dette er enkelheten, lavt energiforbruk og lavt støynivå. For å kompensere for mangel på luft til å akselerere vannet er disse alltid montert i tårn. Det kreves også lave temperaturer for å produsere snø på denne måten.

- **Viftekanoner**

Der de tre forrige metodene bruker det samme prinsippet, og ser mer eller mindre like ut, skiller viftekanonen seg totalt fra disse. Den benytter en vifte til å gi vannpartiklene fart i stedet for trykkluft. Viften er plassert i en sylinder, som kan tiltes og roteres for å kontrollere kaste- retning og –høyde, se Figur 6. Derav navnet snøkanon. Vannet fordeles ut i luftstrømmen fra viften via dyser som sitter i periferien av sylindere, rundt viften. Antall dyser på en viftekanon skiller seg også fra de andre produksjonsmetodene. På eldre typer vifter er det ikke unormalt med opp mot 400 dyser. Dette for at vannmengden enklere kan justeres og tilpasses temperaturen. Etersom dyseteknologien har blitt utviklet de seneste årene har viftekanonene fått færre dyser, men med bedre mulighet for å regulere disse. Viftekanonene trenger ikke tilførsel av luft, men i stedet strøm, i tillegg til vann under trykk. Denne strømmen driver viften samt en luftkompressor som leverer luft. Denne luften har egne dyser rundt vandysene. Hensikten er å skape små iskjerner, som kan starte frysingsprosessen. Denne kompressoren i tillegg til viften gjør at viftekanonen er stor og tung, og krevende å flytte rundt. Den er derfor best egnet for å produsere på store åpne områder, der den lage kasterekevidden og store produksjonskapasiteten kommer til sin rett. Kompressoren er også meget avgjørende for lydnivået på kanonen. De nyeste viftekanonene har et meget lavt lydnivå.

Ulempene med viftekanoen er at den har et meget stort strømforbruk, og har mange bevegelige deler, så den krever mye mer vedlikehold enn de andre løsningene.

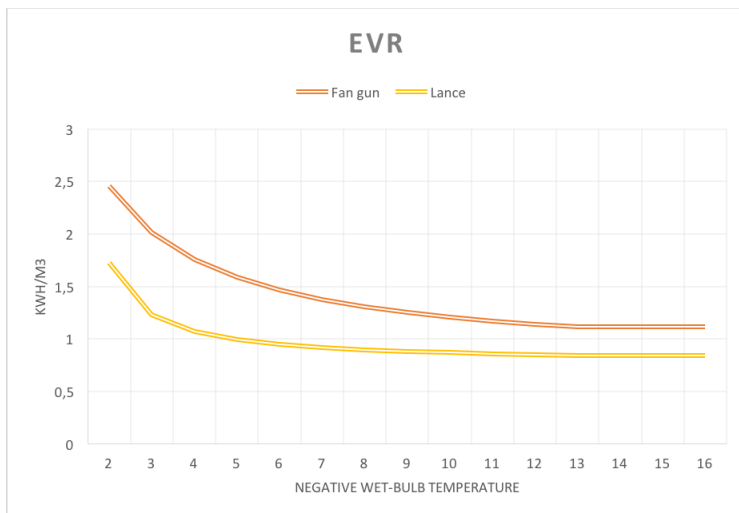


Figur 6: Eksempel på viftekanon. Lenko Northwind, under produksjon i Granåsen

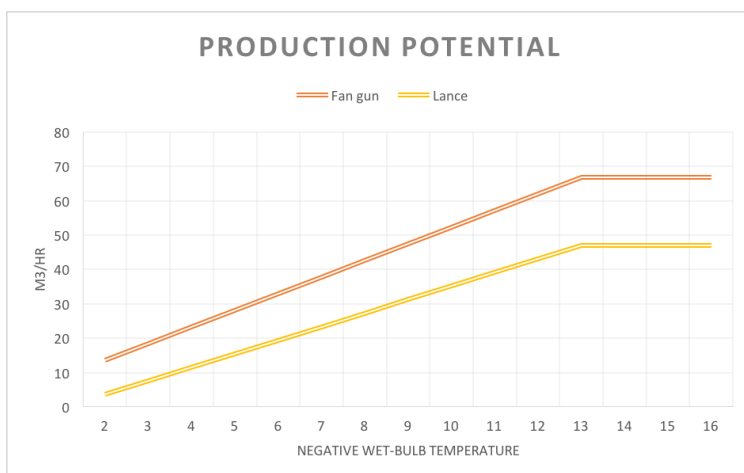
Tabell 2: Sammendrag av ulike temperaturavhengige snøproduksjonsmetoder

	Fordeler	Ulemper	Behov
Luft/ vann	<ul style="list-style-type: none"> -Fungerer godt i marginale forhold -Pumper og kompressorer kan plasseres innendørs unna produksjonen -Ingen bevegelige deler, enkelt vedlikehold 	<ul style="list-style-type: none"> -Høyt energiforbruk -Høyt støynivå 	Vann og luft under trykk
Lanser	<ul style="list-style-type: none"> -Energieffektiv -Lavt støynivå -Pumper og kompressorer kan plasseres innendørs unna produksjonen -Ingen bevegelige deler, enkelt vedlikehold 	<ul style="list-style-type: none"> -Middels produksjonsmengde -Følsom for vind 	Vann og luft under trykk
Vann	<ul style="list-style-type: none"> -Energieffektiv -Kun behov for vann under trykk -Lavt støynivå -Pumper kan plasseres innendørs unna produksjonen -Ingen bevegelige deler, enkelt vedlikehold 	<ul style="list-style-type: none"> -Fungerer kun i lave temperaturer -Følsom for vind -Lav produksjonsmengde 	Vann under trykk
Viftekanoner	<ul style="list-style-type: none"> -Meget stor produksjonsmengde -Lavt støynivå (for nyere modeller) -Store justeringsmuligheter gjør at den egner seg godt for marginale forhold. 	<ul style="list-style-type: none"> -Energikrevende -Stor og tung, vanskelig transport. -Vedlikeholdskrevende 	Vann under trykk og strøm

Av typene nevnt over er det lansen og viftekanonen som er de absolutt mest brukte metodene. Begge har sine fordeler og ulemper som vist i tabellen overfor. Hva som velges i nye anlegg varierer med hva som er viktigst for hvert enkelt anlegg. Lansen er, som Figur 7 viser, mer energioekonomisk og har enklere vedlikehold, men som Figur 8 viser har viftekanonen et større produksjonspotensial.



Figur 7: Energi- volum forhold for lanse og viftekanon for negative T_v . (Vagle, 2016)



Figur 8: Produksjonspotensial for lanse og viftekanon for negative T_v (Vagle, 2016)

2.1.4 Moderne anlegg

Snøproduksjon blir stadig mer vanlig, og i dag produseres det snø i alt fra barnehager til OL anlegg. (Riaz, 2014, Snowmakers, 2014). Dette gjør at det er store forskjeller på anleggene. Noen kan klare seg med et lite system av høytrykkspyler, kompressor og en liten lanse. Andre trenger et større anlegg. Med stadig varmere vintre og mindre snø er kunstsnøproduksjon en økende industri. Dette fører til at muligheten for individualisering blir større. Anlegg bygges etter behov og økonomi. For de minste anleggene, som små langrennsanlegg og liknende, er det mest vanlig med den manuelle metoden. Rørgate for vann og luft er lagt ut langs løypa og lanser flyttes rundt, ettersom hvor snøen skal produseres. Dette er en billig løsning, men den krever en del manuelt arbeid, slik som flytting av utstyr, oppkobling ved produksjon, nedkobling når anlegget ikke er i bruk, og ikke minst kontinuerlig overvåking av temperatur, for å finne muligheter for snøproduksjon.

Større anlegg kan bygges mye mer effektivt enn dette, men da til en større kostnad. De mest moderne anleggene er helautomatiske og regulerer produksjonen ut fra temperatur og ønsket snøkvalitet. For å få til dette er det en del faktorer som må være på plass. For å unngå frost når produksjonen stopper, grunnet for høye temperaturer, tappes anlegget for vann. Uttak for vann, luft og strøm er lagt frostfritt under bakken rundt i anlegget, med store frostfrie påkoblingskummer, der produksjonsutstyr kan kobles til midlertidig eller det er fastmontert. Ved å ha varme i disse kummene reduseres faren for frost i utstyret. Den delen av utstyret som må stå over bakkenivå er utstyrt med automatisk tappekran, slik at denne kan stoppe og starte av seg selv. Dermed er det ikke behov for bemanning til å koble til og fra kanonene og tømme systemet for vann.

Styringen av systemet sitter sentralt, sammen med pumper. Hver enkelt produksjonsenhet er utstyrt med målinger for vær og kontrolleres individuelt. En slik type anlegg gir en stor besparelse i antall arbeidstimer, og det er lettere å produsere i marginale forhold, og i korte perioder med kuldegrader. (Snowmakers, 2014)

Et viktig punkt i utforming av anlegget er vanntilførselen. Luft og strøm er relativt enkelt å legge til rette for. Vann er derimot vanskeligere å frakte over avstander og høydemeter. For langrennsanlegg er dette et mindre problem, da det ofte ikke er veldig store høydeforskjeller. Uansett bør som nevnt tidligere vannet tappes fra en ferskvannskilde i nærheten. I alpinanlegg der det er større høydeforskjeller bør vannkilden velges litt mer gjennomtenkt. Pumping av vann oppover fjellsidene er meget energikrevende, og trykket faller med omtrent 1bar pr. 10høydemeter. For å oppnå et ønsket trykk på 30-40 bar i hele anlegget må det flere trykkøkingsstasjoner til. Derfor kan det være gunstig å lage kunstige dammer lengre opp i fjellet, slik at ikke alt vannet må pumpes nedenfra og opp under produksjonen, da energiforbruket allerede er høyt.

2.2 Temperaturuavhengig snøproduksjon (TUS)

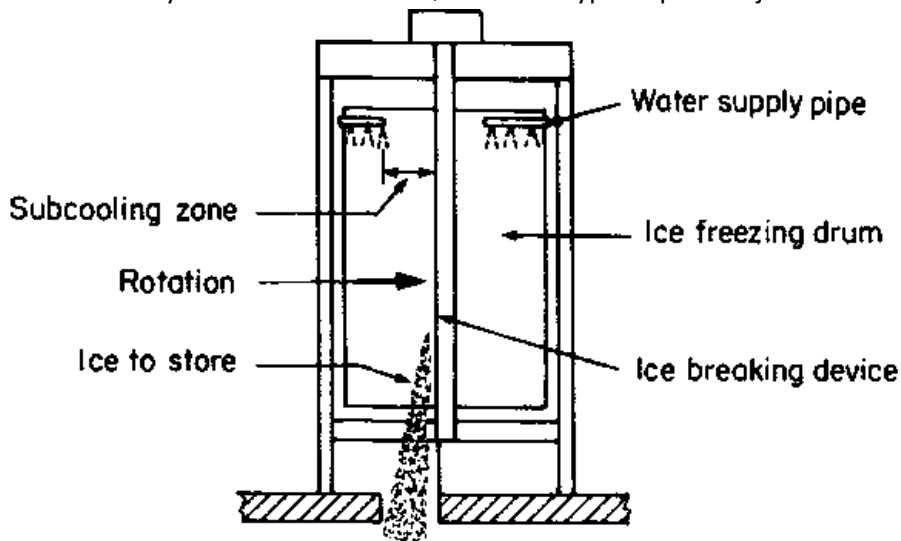
I motsetning til TAS, som beskrevet over kan snø også produseres uavhengig av temperatur. Disse anleggene er prinsipielt helt forskjellige fra TAS, og baserer seg på isproduksjon. Dette er en mye mindre utbredt form for snøproduksjon. Hovedgrunnen er at den er mye mer energikrevende. Den første TUS ble utviklet i 1993, og det er i dag minst fire produsenter av slike maskiner. Snøen fra disse maskinene skiller seg mye fra natursnø, og også en del fra snø produsert med TAS. Her produseres små ispartikler, men disse blir betydelig større enn det som er normalt for TAS. Funksjonen til de forskjellige anleggene er litt forskjellig, men alle kjøler vann til is. For å beskrive prosessen bedre må isproduksjon beskrives.

Norge har vært og er fortsatt i dag en stor eksportør av is. Tidligere var det naturis, som ble saget i blokker vinterstid og lagret i isolerte lagerhus. Denne isen ble benyttet til kjøling av matvarer. Høsting av naturis har i dag blitt overtatt av produksjon av is. Dette gir større frihet i forhold til årstider, mindre lagringsbehov og mer hygienisk is. Produksjon av is foregår på to konseptuelt forskjellige måter. Blokkis produseres ved kjøling av store volum vann til en stor blokk på typisk 25-200kg. Småis, som er det som brukes til snø, har flere mulige produksjonsmetoder, og gir små isbiter i terninger, sylindere eller andre uregelmessige former. (Lortentzen, 2015)

Flakis

Flakis er to til tre millimeter tykk, og flakene er vanligvis 100 – 1000mm² store. Produksjonen skjer ved at en sylinder med kjøleelementer blir sprayet med vann. Dette fører til at det dannes et tynt lag med is utenpå sylindere. Denne isen skraperes av sylindere med en skrape. Litt avhengig av type maskin roterer enten sylindere eller skrapere rundt. Dette kan skje enten i horisontal- eller

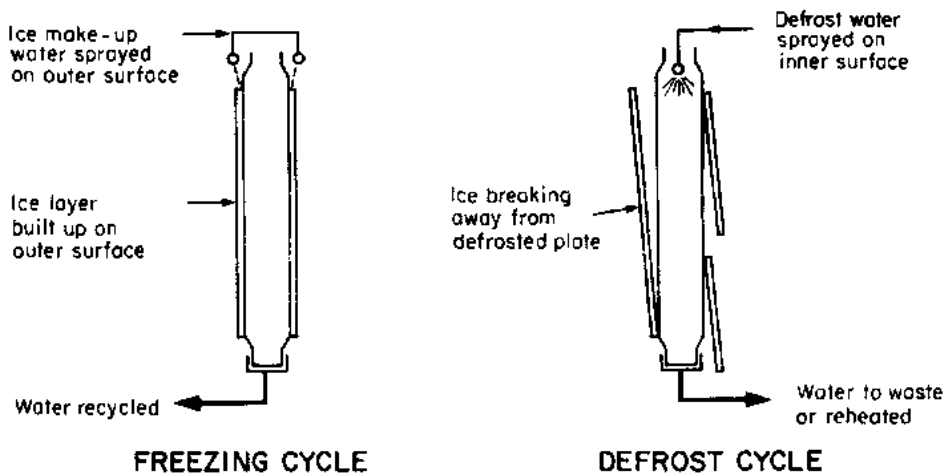
vertikalplanet, og er avhengig av type maskin. Like før skrapingen skjer stoppes dysene, slik at alt vannet har fryst. Flakisen er derfor tørr. Denne typen isproduksjon er illustrert i Figur 9.



Figur 9: Flakismaskin(Graham et al., 1993)

Plateis

Plateis lages ved at vann sprayeres på en rekke store horisontale plater med kjøling. Dette fører til at det dannes et islag på disse platene. For å avise veksles temperaturen i kjøleelementet, slik at det innerste laget med is tiner, og den fryste plata med is slipper taket. En typisk plate er 10-12mm tykk før den avises. Isplatene faller ned mellom kjøleelementene, hvor de enten lagres direkte eller fraktes bort via et samleband. Disse platene må gjennom en isknuser for å bli til brukbar størrelse. Denne typen is er også tørr. Figur 10 viser oppbygningen av en slik maskin



Figur 10: Plateismaskin(Graham et al., 1993)

Issørpe

Denne maskinen fungerer etter samme prinsipp som flakismaskinen. Forskjellen er at flakismaskinen skrapes yttersiden av et kjøleelement mens kjøleelementet i issørpemaskinen er et rør, der skrapingen skjer på innsiden. Vanligvis er det en skrue som skrapes innsiden av røret. En annen forskjell er at hele røret er fylt med vann. Dermed fryser det ytterste laget, før det blir skrapet av og blandet med resten av vannet. Dette blir en våt is, som er en blanding av is og vann. Denne maskinen likner mye på en oppskalert slush/BrainCooler maskin som er vanlig i kiosker. Etter produksjon kan isen og vannet skilles mekanisk, slik at denne isen også blir tørr.

2.2.1 Produsenter og anlegg

Det finnes minst fire kjente produsenter av TUS. De ulike anleggene benytter ulik teknologi, og det er variasjon i mobiliteten. Felles for alle er at de trenger tilgang på vann og elektrisitet.

TechnoAlpin

Snowfactory er en TUS fra firmaet TechnoAlpin, som ble lansert i 2014. Den er basert på produksjon av flakis. Isflakene faller ned i en kvern etter skraping og blir kvernet til rett størrelse. Snowfactory kan arbeide døgnet rundt, og trenger lite tilsyn. Den finnes i forskjellige modeller avhengig av produksjonskapasitet og mobilitet. Produksjonsenheten er plassert i en container, og er derfor standardiserte størrelser og relativt enkel transport. Noen forskjellige konfigurasjoner vises i Figur 11(TechnoAlpin)



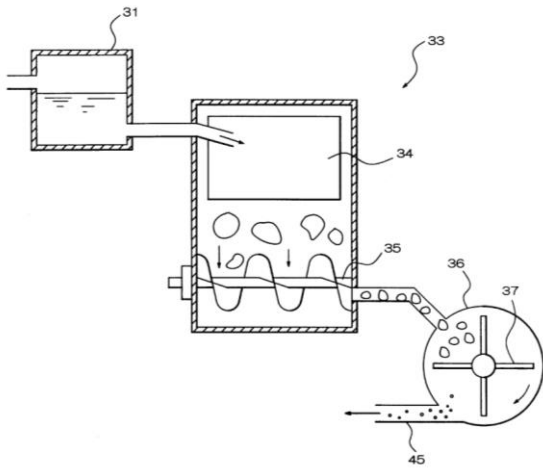
SNOW+
FACTORY

Snow without limits.

Figur 11: Snowfactory i forskjellige konfigurasjoner(TechnoAlpin)

SnowMagic Inc.

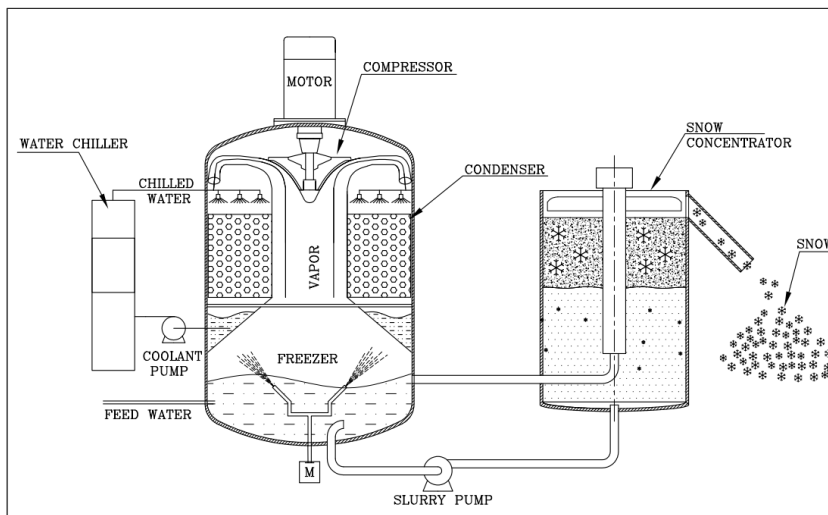
Dette er en snømaskin som baserer seg på plateis. Etter at isen har sluppet fra kjøleelementet blir den kunst ved hjelp av en patentert kvern, slik at alle flakene har passelig størrelse. Hele prosessen er beskrevet i Figur 12. Disse maskinene finnes også i ulike størrelser, men er ikke like transportable som Snowfactory. (Katayama, 2000)



Figur 12: Skisse av SnowMagic produksjonsenhet. 31: Vannbeholder 33: Produksjonsenhet 34: Kjøleelement 35: Transportskrue 36: Patentert kvern 45: Nyprodusert snø (Katayama, 2000)

IDE Technologies Ltd.

IDE Technologies utviklet i 2005 en vakuumbasert issørpemaskin for snøproduksjon. Etter dette har snømaskinene blitt utviklet både med tanke på produksjonsmengde og energiforbruk. I 2013 lanserte de VIM100 Snowmaker2go. Snowmaker2go lager issørpe, for deretter å separere vann og is mekanisk. Snøen blir sendt ut av anlegget, og det resterende vannet tilbake til kjøling. Hele systemet er meget enkelt i transport og gir god snøkvalitet. Figur 13 viser en skjematisk oppbygning av VIM100 Snowmaker2go (technologies, 2013)



Figur 13: Skjematisk tegning av VIM100 Snowmaker2go (technologies, 2013)

SnowTec

SnowGen er en mobil produksjonsenhet fra firmaet SnowTec som også baserer seg på issørpe og separering av vann og snø. Produksjonsenheten er en lastebilhenger, som kan sees i Figur 14. separasjonstårnet som sees i bakgrunn må transporteres separat. (SnowTec, 2017)



Figur 14: SnowGen (SnowTec, 2017).

Snøproduksjon uavhengig av temperatur kan høres ut som en meget god løsning på marginale snøproduksjonsforhold, men sammenliknet med TAS er ikke denne snøproduksjonsmetoden særlig effektiv. TUS bruker 16 ganger mer energi enn gjennomsnittlig TAS og produksjonshastigheten er under en femtedel. (Vagle, 2016)

2.3 Fremtidige måter for snøgaranti

Den siste tiden har det kommet en rekke oppslag om at SINTEF og NTNU skal sikre snø for kommende generasjoner. (Nersgå, 2017) Dette er et prosjekt som går parallelt med denne oppgaven, og skiller seg fra denne i at målet er å utvikle ny teknologi, mens denne oppgaven ønsker å optimalisere den eksisterende temperaturavhengige. Problemet med den temperaturavhengige er at den er nettopp temperaturavhengig, og uansett hvor mye den optimaliseres er den avhengig av negativ T_v . Det er ikke lengre noen selvfølge. Derfor er det mest aktuelle for å sikre snøproduksjon i fremtiden å basere seg på temperaturuavhengige metoder. At disse har en lavere produksjonshastighet er et problem, men det kan kompenseres for med flere enheter. Det største problemet er energibehovet. TUS krever meget store mengder energi til kjøling, og dette vil igjen øke miljøpåvirkningen av snøproduksjon.

Dette problemet forsøker SINTEF og NTNU å løse i samarbeid med Norges Skiforbund, Norges Skiskytterforbund og Trondheim Kommune. Metodene beskrevet i 2.2 Temperaturuavhengig snøproduksjon er utgangspunktet for dette prosjektet. Teknologien i slike anlegg blir i dag brukt til isproduksjon i for eksempel fiskeriindustrien. Noe av denne teknologien er godt fungerende, og derfor godt egnet til å benytte i snøproduksjon. Utfordringen er derimot ikke bare å lage snø, men på en mindre energikrevende metode. Derfor skal muligheten for energigjenvinning vurderes. Biproduktet av kjølingen i disse anleggene er varme, og i dag slippes denne rett ut. Prosjektet skal derfor se på mulighetene til å benytte denne varmen til eksempelvis oppvarming av bygninger og liknende. Dette har også sine utfordringer, ettersom det største behovet for varme sjelden sammenfaller med behovet for temperaturuavhengig snø. (Prosjektsøknad, 2016)

En annen metode som stadig blir mer populær er sommerlagring av snø. Dette er en relativt enkel og lite energikrevende prosess. Snø lagres i store hauger, tildekkes med sagflis og lagres over sommeren, for bruk neste vinter. Denne prosessen har mange fordeler, men også noen ulemper. Den

største er at snøen sjelden kan lagres der den skal brukes. Det er derfor knyttet store kostnader og utslipp til å frakte snøen til skiløypene. Noen av fordelene er at snøen som lagres kan produseres gjennom hele vinteren, da forholdene tillater det. Dermed er det ikke det akutte behovet for å produsere store mengder på kort tid. Denne lagringsmetoden kan også garantere snø, og er relativt billig, både i form av investeringer og i bruk. Dette er den foretrukne måten for fremtidig drift i Granåsen (Vagle, 2016)

2.4 Snøkvalitet og bruksområder.

Det sies at ingen snøflak er like. Dette tilsier også at ingen snøflak har samme egenskaper. Derfor gir det mening å snakke om snøens kvalitet. Dette gjelder både for kunstig og naturlig snø. Det finnes flere forskjellige skalaer å bedømme snøkvalitet etter. Felles for alle er at vanninnholdet eller massetettheten er faktoren som måles. Ratlink Industries bruker en enkel praktisk metode vist i Tabell 3, for å bedømme kvaliteten. Denne er ment for bruk utelukkende på kunstsne. Kulturdepartementets veileder for snøproduksjon og snøpreparering (Gjerland and Olsen, 2014) benytter en skala fra 1-9 hvor 1 er pudder, 5 er kramsnø og 9 er nesten regn. Egenvekt på kvalitet 5 er 300-400kg/m³. Denne skalaen er ment for både kunstsne og vanlig nyfallen snø, da kvalitet 5-6 tilsvarer gjennomsnittlig produsert snø, men tilsvarer meget våt nyfallen natursne. Denne verbale beskrivelsen kan overføres til verdiene i Tabell 4. Typisk for kunstsne er 300-500 kg/m³. Dermed er den nedre delen av skalaen utelukkende beregnet på natursne.

Tabell 3: Snøkvalitet(Industries, 2015)

Snøkvalitet	Beskrivelse
1	Snøen kan ikke pakkes, pudder
2	Snøen kan kun pakkes til en løs ball, som faller fra hverandre
3	Snøen kan bli pakket til en ball, som kan som kan brytes
4	Snøen kan pakkes til en tett ball, som ikke endrer farge under trykk
5	Snøen kan pakkes til en tett ball, som endrer farge under trykk, men drypper ikke
6	Snøen kan pakkes til en tett ball, som drypper under trykk.

Tabell 4: Snøkvalitet(Gjerland and Olsen, 2014)

snøkvalitet	1	2	3	4	5	6	7	8	9
kg/m ³	0-50	50-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700+

Egenskapene til snøen er meget forskjellige i de ulike kvalitetene. For natursne spiller dette liten rolle, da kvaliteten på den ikke kan reguleres, men med kunstsneproduksjon kommer det muligheter for å variere snøkvaliteten etter bruksområde. Måten snøkvaliteten kan reguleres på er ved å endre mengden vann som går gjennom kanonen. Dermed vil snømengden også øke ved å øke vannmengden. Dette påvirker snøkvaliteten negativt, slik at snøen blir tyngre. Det kan da bli en avveining om man skal produsere mest mulig snø med litt lavere kvalitet, eller satse på høyere kvalitet og mindre produksjon. Hvilken strategi som her bør benyttes avhenger av hva snøen skal brukes til. Ved supplering av snø i områder der det allerede ligger snø, men det er litt lite, bør kvaliteten være så lik den snøen som ligger der som mulig. Dette betyr som oftest at denne snøen bør produseres tørr. Dermed kan den også bearbeides nærmest umiddelbart.

2.5 Oppsummering av litteraturstudiet

Snø kan produseres på ulike måter, og under forskjellige forhold. Den mest vanlige måten er såkalt temperaturavhengig snøproduksjon. Små vanndråper fordeles ut i luften og disse fryser som en følge av naturlig kjøling. I denne prosessen er temperatur og luftfuktighet de viktigste faktorene, men vanntemperatur, vind og andre faktorer spiller også inn i denne teknikken. Utstyret som brukes er hovedsakelig to forskjellige typer, viftekanoner og lanser. Viftekanonen har størst produksjonspotensial, men er dyrere både i drift og innkjøp. Oppsett er noe enklere, da disse kun har behov for vann under trykk og strøm. Lansene er enklere og billigere, men har behov for trykkluft i tillegg til vann under trykk. Det gjør at disse krever noe mer infrastruktur.

Snø kan også produseres uavhengig av temperatur. Disse anleggene baserer seg på produksjon av is, for så å knuse denne til passelig størrelse. Disse anleggene er mye mer omfattende enn TAS, men kan produsere snø kun med tilgang på vann og strøm. TUS har et mye større energibehov pr. m³ snø, og er dyrere.

Begge disse anleggene produserer snø som skiller seg fra naturlig snø. Naturlig snø dannes ved at vanddamp går direkte over til fast fase, mens kunstsnø er flytende vann som går over til fast fase. Dette gjør at kunstsnø består av små isklumper, mens natursnø er stjerneformede krystaller. Kunstsnøen kan også tilpasses til ulike behov. Det er derfor naturlig å snakke om snøkvalitet for kunstsnø. Dette er et mål for massetettheten til snøen, altså hvor våt den er.

3 Hypoteser for god snøproduksjon og måter for uttesting av disse

Som beskrevet i litteraturstudiet er det flere faktorer som påvirker snøproduksjonen og snøkvaliteten. Noen av disse faktorene antas at også blir påvirket av snøproduksjonen, slik at produksjonsforholdene blir endret med produksjonen. Det overordnede målet for denne oppgaven er å utvikle en reguleringsalgoritme for snøproduksjon. For å kunne regulere snøproduksjonen på en god måte må sammenhengene mellom de ulike parameterne kartlegges. Dette kapitlet beskriver noen hypoteser om hvordan disse sammenhengene er, og hvordan det er mulig å teste disse hypotesene.

3.1 Hypoteser for god snøproduksjon

Presentasjon av hypotesene, med beskrivelse.

3.1.1 Automatiseringens effekt på snøproduksjon og snøkvalitet

Som nevnt tidligere avhenger snøkvaliteten av en rekke faktorer, som vanntemperatur, lufttemperatur, luftfuktighet og vind. Hvordan disse faktorene påvirker snøproduksjonen er noe beskrevet i litteraturstudiet, men dette er ikke sammenliknet med produksjonsmengden til snøkanonen. Det burde derfor være mulig å styre snøkanonen mer optimalt med tanke på disse faktorene. Tidligere har produksjonen i Granåsen blitt styrt manuelt med sporadisk oppfølging av snøkvalitet og produksjonsparametere. Dette fører til at snøkvaliteten kan falle utenfor det som er ønsket, eller produksjonen ikke utnyttes til det fulle.

Hypotese: snøproduksjonen kan styres mer effektivt enn tidligere ved en automatisk styring som tar hensyn til vindhastighet, vindretning, luftfuktighet, lufttemperatur og vanntemperatur.

3.1.2 Snøproduksjonens effekt på luftfuktigheten i nærheten av produksjonspunktet

Luftfuktigheten er en faktor som spiller en stor rolle i forbindelse med fordampningsavkjøling. Når vi vet at en stor del av kjølingen kommer som følge av fordampning er det naturlig å tro at det er en økt lokal luftfuktighet omkring produksjonsenheten. Derfor er det viktig å kartlegge hvordan denne påvirker snøproduksjonsprosessen, og hvordan snøproduksjonsprosessen påvirker luftfuktigheten i umiddelbar nærhet til produksjonen. Det er naturlig å tro at denne forhøyde luftfuktigheten er å finne i et område rundt produksjonen. Hvor stor denne sonen med forhøyet luftfuktighet er, er ukjent. Størrelsen på dette området er interessant med tanke på hvor nært hverandre produksjonsenheter kan plasseres.

Hypotese: Snøproduksjonen fører til en forhøyet luftfuktighet i et område rundt produksjonspunktet, som er ugunstig med tanke på produksjonen og også for nærliggende produksjonspunkter.

3.1.3 Snøproduksjonens effekt på temperaturen i nærheten av produksjonspunktet

På samme måte som med luftfuktigheten er det naturlig å anta at temperaturen blir påvirket av at store mengder vann med temperatur over null grader blir fordelt ut i luft med temperatur under null grader. Ettersom noe av vannet vil fordampe og skape fordampningsavkjøling kan det tenkes at temperaturen ikke er like følsom for endring som luftfuktigheten. Likevel spiller temperaturen en

større rolle en luftfuktigheten i beregningen av T_v , og derfor er det hensiktsmessig å undersøke hvordan snøproduksjonen påvirker temperaturen.

Hypotese: Snøproduksjonen fører til en forhøyet temperatur i et område rundt produksjonspunktet, som er ugunstig med tanke på produksjonen og også for nærliggende produksjonspunkter.

3.1.4 Vindens påvirkning av temperatur og luftfuktighet i produksjonspunktet

Vind er en faktor som er lite beskrevet i litteraturen om snøproduksjon. Derfor er dette den mest interessante faktoren å undersøke nærmere. Vi vet at vinden påvirker hvor snøen lader og at den også har en indirekte påvirkning på dråpestørrelsen. Det er derimot ikke disse faktorene som blir vurdert i denne oppgaven. Det har tidligere vært problemer med at luften i anlegget mettes med fuktighet, og produksjonen har måttet stanse, for å la den påvirkede luften i anlegget byttes ut. Ettersom vind er luft i bevegelse er det naturlig å tro at luften skiftes ut raskere med økt vind. Derfor er det interessant å se hvor mye vinden har å si for produksjonskapasiteten i anlegget.

Hvordan vinden påvirker den antatte økte fuktigheten og temperaturen er et viktig element i plasseringen av nærliggende produksjonspunkter. Hvis den påvirkede luften følger vindretningen kan det være ugunstig å plassere produksjonseenheter i samme retning som vinden i forhold til andre produksjonseenheter. Det er derfor spesielt viktig å vurdere effekten av vind hvis det er ønske om å produsere med flere enheter i nærheten av hverandre.

Hypotese: Vind vil sirkulere luften, slik at ved vind vil den antatte effekten av økt luftfuktighet og temperatur bli påvirket, og den påvirkede sonen kan flyttes mot andre produksjonseenheter.

3.2 Hvordan disse hypotesene bør testes ut.

Dette kapitlet framlegger forslag til hvordan testingen av hypotesene bør utføres. Den praktiske utførelsen er ikke tatt med, bare et teoretisk oppsett.

3.2.1 Automatiseringens effekt på snøproduksjon og snøkvalitet

Med tanke på snøkvaliteten er det mange av de aktuelle faktorene som ikke kan kontrolleres, slik som vind, temperatur og luftfuktighet. Vanntemperatur kan til en viss grad kontrolleres ved hjelp av kjøling, hvis den ikke er optimal. Den mest kontrollerbare faktoren er vannmengde. Dette bestemmer også hvor mye snø kanonen produserer, og gir gode muligheter for regulering. For å kunne automatisere produksjonen er det viktig å ha en god forståelse for hvordan de ulike parameterne påvirker snøkvaliteten, og hvordan produksjonen påvirker produksjonsforholdene. Løsningen for å kunne etablere en sammenheng blir derfor å måle de parameterne som ikke kan styres, og registrere de styrbare parameterne underveis. Ved å gjøre dette kan man styre snøkanonen manuelt for å forsøke å oppnå forskjellige snøkvaliteter ved forskjellige forhold. I denne styringen er det meget viktig å ha kontroll på tid. Alle målinger er assosiert med et tidspunkt. Dermed kan alle data i etterkant settes sammen, og hele sammenhengen mellom alle parametere kan avdekkes. Dette burde gi en god oversikt over hvilke T_v , vindhastigheter, vanntemperaturer og kanoninnstillinger som gir en gitt snøkvalitet.

Videre må resultater fra funnene beskrevet over benyttes til å utvikle en Algoritme for optimal snøproduksjon. Først når denne er på plass kan hypotesen testes til sitt fulle. Det er flere metoder å verifisere en slik algoritme på, blant annet ved testing og modellering. Begge disse metodene byr på

en rekke utfordringer i forhold til denne oppgaven. For å kunne teste en snøproduksjonsalgoritme er det nødvendig med forhold for snøproduksjon. Det kommer ikke til å inntreffe i slutfasen av dette prosjektet. Dermed er denne metoden utelukket.

En annen metode er ved modellering. Her modelleres systemet matematisk, og reguleringen skjer på modellen. Dermed kan testingen skje rent teoretisk. Likevel er dette en metode som er enda mer krevende enn ved testing. For å kunne modellere systemet kreves meget stor forståelse av hvordan systemet er bygget opp. Noe av denne forståelsen har denne oppgaven som mål å etablere, men for at modellen skal bli nøyaktig nok til å kunne brukes i verifikasjon kreves en enda større forståelse av systemet. På bakgrunn av dette kommer ikke algoritmen til å bli verifisert.

3.2.2 Snøproduksjonens effekt på luftfuktigheten i nærheten av produksjonspunktet

For å kunne bestemme hvordan snøproduksjonen påvirker luftfuktigheten må den måles over lang tid, og over et stort område. Hypotesen sier at: «Snøproduksjonen fører til en forhøyet luftfuktighet i et område rundt produksjonspunktet, som er ugunstig med tanke på produksjonen og også for nærliggende produksjonspunkter». Derfor bør dette området undersøkes. Det naturlige er å starte med nedfallsonen til snøen. Der er luften tydelig påvirket i form av at det er fallende snø. Målinger bør plasseres rundt i dette feltet for å finne ut om det er forskjeller gjennom nedfallsområdet. Produksjonsenheten står noe utenfor nedfallssonen, så det kan være naturlig å tenke at det er noe lavere fuktighet der. Likevel er det gunstig å bruke dette som et referansepunkt. Ved å bruke dette som et referansepunkt kan man utvikle en beskrivelse av luftfuktigheten i en radius rundt produksjonsenheten. Denne beskrivelsen kan fortelle noe om hvordan området er påvirket av produksjonen, og hvor langt unna man må for å ikke lengre være påvirket av produksjonen. Det vil også være gunstig å ha punkter så langt unna produksjonen at de helt sikkert ikke er påvirket, og bruke disse som en referanse.

3.2.3 Snøproduksjonens effekt på temperaturen i nærheten av produksjonspunktet

Temperaturen er den viktigste faktoren for snøproduksjon, men også den som har størst naturlige dagsvariasjoner. Dette fører til at det er enda vanskeligere å dokumentere endringer. Derfor er det viktig å ha gode referanser, der forholdet mellom punktene er godt kartlagt uten produksjon. Deretter kan data fra perioder med produksjon sammenliknes med perioder uten. Igjen blir det viktig å ha kontroll på tidssynkroniseringen, slik at alle målinger kan sammenliknes for samme tidspunkt. Området som undersøkes bør være i samme størrelsesorden som for fuktighet. Utførelsen kan gjøres felles, da måleinstrumentene måler både temperatur og fuktighet.

3.2.4 Vindens påvirkning av temperatur og luftfuktighet i produksjonspunktet

For å kunne vurdere hvordan vinden påvirker luftfuktigheten, må vinden måles i samsvar med luftfuktigheten. Også her er tidssynkronisering meget viktig. Dermed kan målinger av vind og luftfuktighet vurderes opp mot hverandre, og samtidig vurderes opp mot det som skjer med snøproduksjonen. Vindforhold er ikke noe som kan styres. Derfor er det ikke mulig å velge ut eksakte forhold, og så lete etter sammenhenger ut fra dette. Derimot kan det tas utgangspunkt i uregelmessigheter i luftfuktigheten, og forsøke å se sammenhenger mellom disse uregelmessighetene og vindforholdene.

4 Testing av hypoteser

Dette kapitlet beskriver oppsettet som har blitt brukt for å teste ut hypotesene, og hvorfor testingen har blitt gjort på denne måten.

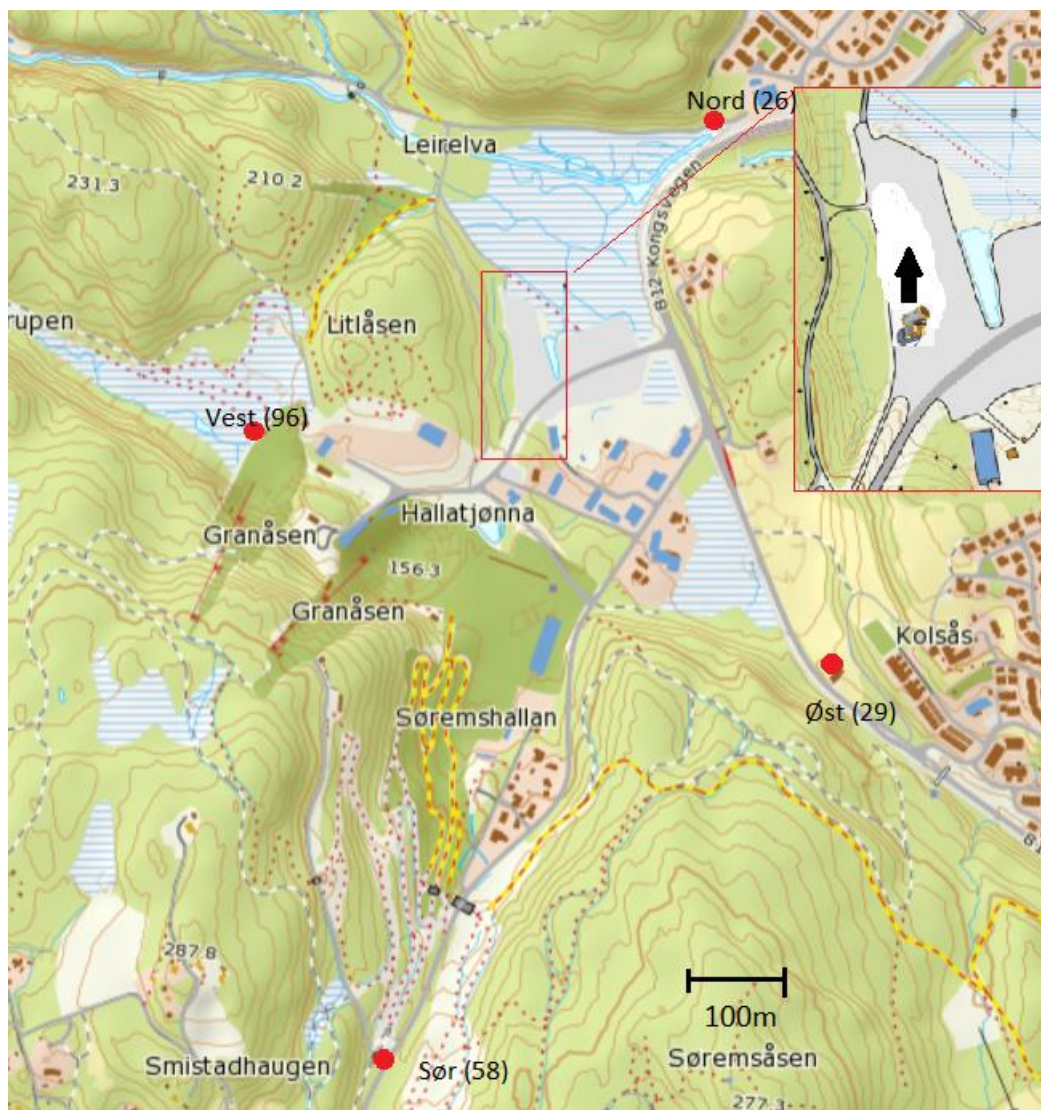
4.1 Granåsen som testarena

Granåsen er Trondheims hovedarena for langrenn, hopp og kombinert, og det arrangeres årlig worldcup i hopp og kombinert. Det er også skiskytterarena og rulleskiløype i anlegget, og mye av områdets skiløyper tar utgangspunkt i Granåsen. Anlegget ble bygget til VM i nordiske grener i 1997 og det er planlagt en større oppgradering i nærmeste framtid.

4.1.1 Granåsenområdet generelt

Granåsen skiarena ligger omtrent 180moh. i Trondheim kommune. Området er preget av et typisk kystklima, med relativt varmt og fuktig klima. Snøen kommer ofte i store mengder, og ved temperaturer rundt 0°C. Klimaet er noe av utfordringen med å produsere snø i dette området. Det er sjelden lange perioder med stabilt lave temperaturer. Som Figur 15 viser er det også relativt store høydeforskjeller i anlegget. Disse høydeforskjellene er med på å skape store forskjeller i temperatur innad i anlegget. Og det kan være kort vei fra der det er mulig å produsere snø til der det ikke lengre er mulig (Berg, 2016). Disse høydeforskjellene er også med på å skape fire daler som fører inn og ut av anlegget. Dette gjør at luftstrømmene er ganske konsekvente, og kommer stor sett langs en av disse dalene. Derfor er det plassert ut en værstasjon i hver dal. Slik kan temperatur, vindretning og vindhastighet på all lufta som kommer inn og forsvinner ut av anlegget registreres. Alle disse punktene er merket med navn og id nr. i kartet i Figur 15.

I forbindelse med rulleskiløypa er det også lagt ned vann og luftposter for snøproduksjon med lanser rundt hele løypa. Dette nettverket består av kummer med 50m mellomrom der det er mulig å koble på vann og luft. Dette rørsystemet forsynes av et sentralt pumpehus. Vannet inn til dette pumpehuset tappes fra Leirsjøen og går via en matepumpe før det når inn til pumpehuset. Dette pumpehuset forsyner også systemet med luft. I tillegg er det et eldre pumpehus, som forsyner hoppbakken. Dette systemet kan forsyne hoppbakken med både vann og luft, men kun luften er koblet felles med pumpehuset for langrenn. Dette er et eksempel på at anlegget er bygget i mange faser, uten en overordnet strategi, men bare kortsiktige utbedringer av flaskehalsen.



Figur 15: Oversiktskart over Granåsen, værstasjoner og snøproduksjonsområdet. Utsnittet viser hvor produksjonen foregikk og pilen beskriver produksjonsretningen.

4.1.2 Testområde

Figur 15 viser en oversikt over anlegget, med et forstørret bilde av testområdet. Dette ligger på parkeringsplassen ca. 20m lavere enn selve stadion. Området har opprinnelig blitt benyttet til parkering, men fra vinteren 2016 har Trondheim Bydrift benyttet denne delen av parkeringen som snølager. Her lagres snø fra vår til høst, slik at skisesongen kan startes før det er mulig å produsere kunstsne. Ettersom dette er et relativt flatt område, som ligger skilt fra stadion med et høydedrag er det naturlig å tenke at lufta som passerer testområdet ikke trekker opp til stadion, men holder seg nede i dalen mellom punktene Øst og Nord. Dette gir et noe enklere bilde i forhold til hvordan lufta beveger seg i dette område. I denne dalen ligger målepunktene Nord (26) og Øst (29). Hhv. 400 og 560m fra produksjonsområdet. Nord har omtrent samme høyde, mens Øst ligger omtrent 15m høyere. I tillegg til det er de to andre punktene (Sør og Vest) hhv. 930 og 380m unna og 50 og 10m høyere enn Snølageret. Selv om Vest er det nærmeste punktet, ligger dette bak en ås, så det antas å være ganske skjernet fra produksjonen.

Området var opprinnelig en parkeringsplass, men grunnet mangel på andre muligheter ble området brukt som snølager for sommeren 2016, og vil også bli benyttet sommeren 2017. Dette området egner seg godt for dette formålet. Det er en plan grusplass, men ganske god drenering, godt skjermet fra sol, og i ett av de lavereliggende kalde områdene i anlegget. Dette er faktorer som vil redusere svinn av snø over sommeren.

Snøen lagres i en haug som blir formet som en halv ellipsoide. Denne formingen skjer mekanisk med maskiner, men det er likevel en fordel å forsøke å produsere snøen i mest mulig korrekt form, slik at minst mulig bearbeiding kreves. Derfor har snøkanonene blitt plassert og flyttet med tanke på dette. Flyttingen og plasseringen av kanonene er det Trondheim Bydrift som har hatt ansvar for. Tidlig ble det produsert en liten haug helt sør i området som var tiltenkt for lagring. Deretter ble kanonene plassert oppe på denne haugen slik at snøen skulle få lengst mulig falltid. Etter hvert måtte området planeres litt og kanonen ble flyttet opp på den nye haugen. Slik ble hele området stadig høyere, og kanonene ble flytt etter behov. Selv om kanonene ble flyttet har de hele tiden produsert i samme retning. Haugen ligger i nord/sør retning, og produksjonen har hele tiden foregått i nordlig retning, som pilen viser. Det har blitt produsert med to viftekanoner. Disse har vært plassert med omtrent 10m mellomrom, og hovedsakelig sprutet parallelt i nordlig retning. Målet har vært at nedfallet fra kanonene skal være separat, slik at de påvirker hverandre minst mulig. Stort sett har dette vært tilfellet, men grunnet vind har det blitt noe overlapp. Som Figur 16 viser er det to tydelig separate hauger, noe som viser at det er to forskjellige nedfall.



Figur 16: To Lenko Northwind 450 under produksjon ved snølageret.

4.2 Utstyret benyttet i testingen.

Hvordan testingen og utstyret er plassert rent geografisk er beskrevet i kapitelet over, men litt mer teori om det forskjellige utstyret som har blitt brukt beskrives under.

4.2.1 Lenko Northwind 450

Snøkanonene som har blitt benyttet er modellen Northwind 450 av leverandøren Lenko. Det var et svensk firma, som i 2011 ble kjøpt opp av det italienske firmaet Leitner, som er en stor utstyrsleverandør for alpinanlegg. Snøkanonene produseres i dag under navnet DemacLenco(Svensson, 2011)

Northwind 450 (NW450) er en viftekanon og trenger dermed tilgang på vann under trykk og strøm. Kjennetegnet til en viftekanon er viften i midten og dysene i ringer rundt. NW450 har fire ringer à 82 dyser. Hver ring med dyser kan stenges og åpnes individuelt, ved hjelp av kraner. Kanonen fire innstillinger, 25, 50, 75 og 100%. Totalt gir dette 328 dyser. Kranene har tappefunksjon og varme, slik at det ikke skal fryse. Dysene har også et innebygget varmeelement. Dysene skal ha et vanntrykk mellom 8 og 35bar, hvor et høyere trykk gir mer snø. Dette gir en vannmengde på opptil 482l/min. Medregnet svinn og fordampning regnes det et forhold på 1 : 1,8 vann : snø. Dette tilsvarer 868l/min eller 52 m³/time med snø.

Det er ikke uttak til vann fra pumpehuset nede ved snølageret, derfor var det behov for en ekstern pumpe til dette formålet. Denne ble koblet til i vannforsyningen fra Leirsjøen i en kum like ved lageret. Dette var før matepumpen, så påkoblingen skjedde på lavtrykksiden. Trykket levert fra pumpen lå på omlag 30bar, noe som er tilnærmet ideelt. Kanonen er også utstyrt med et filter, som filtrerer ut partikler som kan tette dysene. Dette filteret er ikke tettere enn at partikler som danner iskjerner slipper gjennom. Filteret er oppgitt til 20µm.

Kanonene har også behov for 400v trefase strøm. Den ble hentet fra et strømskap i nærheten. Strømmen brukes til å drive kompressor, viftemotor og varmeelementer. Kompressoren er av typen Atlas Copco SNOW-LE, trekker 4,0kW strøm og gir 7,1l luft/s, opp til 10bar. Motoren til viften trekker 12,5kW og varmeelementene som skal hindre frysing trekker 5kW. Dette gir et totalt energiforbruk på 21,5kW.

I tillegg til å kunne justere antall ringer, kan kanonen også justeres i tilt og rotasjon. Tiltingen skjer ved å rotere et gjenget stag som sitter mellom rammen og viftehuset. Ved å tilte kanonen oppover oppnås lengre falltid. Det negative med større vinkel er at snøen lettere faller tilbake på kanonen, og dermed blir trukket inn i viften bakfra. Dette kan i verste fall føre til at isklumper dannes. Disse kan enkelt ødelegge viften. Kanonen kan også roteres 360°. Dette bestemmer hvor snøen lader. Vinden kan ta med seg snøen ut fra retningen kanonen peker, men uten vind kan snøen plasseres ganske presist.

4.2.2 Værstasjoner

Som en del av denne oppgaven ble det skaffet værstasjoner. Disse måler vindretning og vindstyrke, temperatur, luftfuktighet og trykk. Disse værstasjonene kan brukes med batteri, eller kobles til nettstrøm. Behovet for strøm gav en utfordring med tanke på plassering. Den oppgitte batterilevetiden var omtrent 20 dager og opplading måtte skje via en batteribank eller direkte strømtilkobling. Det viste seg imidlertid at batterilevetiden var mye lengre enn 20 dager. En av de har

stått i nesten to måneder uten problemer. Solcellepanel var også en annen mulighet. Dette ble testet ut på en av stasjonene, og fungerte med stort hell. Derfor ble det standarden for alle værstasjonene.

Samplingsintervallet på disse kan justeres fritt, men er satt til 10 minutter på grunn av batterilevetiden. Overføring av data skjer via GSM, og værstasjonen med solcelle kan derfor fungere helt trådløst. Brukergrensesnittet er basert på Microsoft Power BI, og måldata kan fremstilles etter eget ønske i forskjellige grafer, og som tallverdier, eller eksporteres til andre formater.

Det er plassert 4 slike værstasjoner rundt om i Granåsen. Alle er plassert i daler som leder inn eller ut av anlegget. Disse er anset som innganger og utganger for all luften som passerer gjennom anlegget.(Berg, 2016)

Figur 17 viser en værstasjon, som er satt opp på et stativ, med solcelle. Denne stasjonen er helt trådløs, og kan plasseres etter eget ønske.



Figur 17: Værstasjon til venstre og RHT 10 til høyre

4.2.3 EXTECH RHT 10

EXTECH RHT 10 er den enkleste loggeren vi har brukt og er basert på manuell innhenting og lagring av dataene. Dette er trådløse loggerer, som lagrer datapunkter over et forhåndsgitt tidsintervall og lagrer de internt. Fordelen med denne loggeren er at den er enkel, trådløs, billig, har lang levetid, og kan stilles til å ha en relativt lang minnetid også. Ulempen med den er at denne ikke kan benyttes til kontrollsystemer, ettersom den baserer seg på kontinuerlig logging og lagring, men ikke kontinuerlig dataoverføring. Dermed må denne tømmes når den er full. Enheten har en kapasitet på 16000 datapunkter, hvor ofte den må tømmes avhenger derfor av samplingsintervallet. Det har blitt benyttet hovedsakelig ett minutt intervall, noe som gir litt over 11 dager minne. I noen tilfeller har også 30 sekunder blitt brukt, for noe hyppigere målinger, men dette er kun i perioder der målingen kommer til å pågå under 5 dager.

Til høyre i Figur 17 vises en RHT 10. Denne er liten og enkel å plassere ut på alle ønskelige plasser. Under mesteparten av testingen har den blitt teipet fast til en brøytestikke, slik at den er enklere å se, og kommer litt opp av snøen. Dermed vil den heller ikke snø ned så raskt.

Tabell 5: Spesifikasjoner RHT10

Relativ luftfuktighet	Måleomfang	0 -100%
	Nøyaktighet (0 til 20 og 80 til 100%)	± 5.0%
	Nøyaktighet (20 til 40 og 60 til 80%)	± 3.5%
	Nøyaktighet (40 til 60%)	± 3.0%
Temperatur	Måleomfang	-40 til 70°C
	Nøyaktighet (-40 til -10 og 40 til 70°C)	± 1°C
	Nøyaktighet (-10 til 40°C)	± 2°C

Som vi ser av Tabell 5 viser er det noe usikkerhet knyttet til dataene fra RHT10 målerne. Ettersom mesteparten av målingene har blitt gjort med disse målerne er det noe usikkerhet forbundet med målingene. Dette vil bli kommentert og vurdert i senere kapitler.

Data kan framstilles i en egen programvare, som fritt kan lastes ned fra leverandørens hjemmesider, ellers kan datapunktene eksporteres til andre filformater, som .xls og .txt.

4.2.4 Målebeger

For å kunne bestemme tettheten til et materiale må volum og vekt måles. I denne oppgaven er det tettheten til den fallende snøen som skal bestemmes. Den ekleste måten å løse dette på er å ta utgangspunkt i ett gitt volum, for så å veie dette. Måten dette skulle gjøres på var at målebegeret skulle settes ut i snøproduksjonen og fylles til randen, for så å veies. Vanlig litermål ble foreslått, men disse er ganske dype og smale, slik av ved naturlig fylling fra oven ville dette ta meget lang tid å fylle. Derfor ble det valgt en isboks fra produsenten Diplomis. Denne har lavere kanter og større grunnflate enn Sørlandsis sin boks. Isboksen ble kontrollmålt til 2,5l og 61g. Det ble deretter beregnet tetthet ut fra massen til boksen med snø.

Etter litt testing viste det seg at det tok for lang tid å fylle boksen da det var lav produksjon. Dermed burde forholdet mellom areal og høyde forbedres ytterligere. Problemet med et større areal og lavere kanter er at det blir vanskeligere å vurdere om overflaten er plan, og om den er helt full. Løsningen ble å modifisere isboksen med en plastikkpose som vist i Figur 18. Denne ble skåret opp og teipet fast i isboksen, slik at all snøen som falt på plastikkposen enkelt kunne ledes ned i boksen. Dermed kunne snø tas fra området i umiddelbar nærhet til boksen, uten at snø fra forrige produksjonsperiode ble med. Vekten til posen ble ansett som ubetydelig, og 61g ble brukt videre for enkelhetens skyld.



Figur 18: Målebeger, isboks med plastikkpose.

4.3 Praktisk utførelse av testingen

Dette kapitlet beskriver hva som ble gjort i begge testperiodene, beskrivelser av problemer som har dukket opp underveis, og måter for å løse disse.

4.3.1 Testperiode 1, tidlig i februar

Produksjonen ble startet formiddagen tirsdag 7. februar. Store deler av anlegget ble satt i gang, men denne testingen og analysen foregikk kun ved snølageret. Det ligger relativt skjermet fra resten av produksjonen, slik at vi kan anta at det ikke var noen påvirkning fra resten av snøkanonene. To viftekanoner av typen Lenko Northwind 450 produserte snø ved snølageret. Disse ble justert etter temperaturen i området, for å produsere mest mulig snø. Ettersom denne snøen skal lagres, og skal ligge i ro lenge kan snøen produseres noe våt, altså med noe lav kvalitet. For å undersøke hvordan snøproduksjonen påvirket det lokale klimaet ble RHT 10 målere, som logger temperatur og relativ luftfuktighet, satt ut omtrent kl. 17.00 tirsdag 7. februar. Optimalt sett burde disse vært på plass da produksjonen startet, slik at vi kunne se hvordan det endret seg ved oppstart, men produksjonen startet før avtaler om målingene ble inngått.

Målerne ble plassert i 0, 10, 20, 30 og 50m avstand fra snøkanonen. For å ha kontroll på hvilken RHT 10 som var hvor ble de plassert etter stigende serienummer, med lavest i 0m. Litt avhengig av vindretningen var det største snøfallet mellom 10 og 20m fra kanonene. I starten av målingene var det noe vind, men denne stilnet i løpet av testingen. For å så best mulig måling av nedfallsområdet, ble målerne plassert midt inne i snøfallet. Dette gav visse utfordringer, som at det måtte være

oppsyn minst to ganger i døgnet, slik at ikke målerne snødde ned, slik vi ser i Figur 19



Figur 19: Delvis nedsnødd måler, etter 13 timer uten tilsyn

Produksjonen ble hovedsakelig styrt av Trondheim Bydrift, men i perioder med kvalitetstesting av snøen ble produksjonen styrt med tanke på oppgaven. Torsdag 9 begynte veiingen av snøen, for å bedømme kvalitet. Snøkvaliteten er direkte proporsjonal med tettheten, og dermed kunne kvaliteten bestemmes ved å veie et bestemt volum med snø. Målet med dette var å finne en sammenheng mellom våtkuletemperatur, vannmengden gjennom kanonen og snøkvaliteten. I tillegg skulle disse målingene vurderes opp mot relativ luftfuktighet.

Målebegeret ble valgt til en isboks. Denne ble kontrollmålt til 2,5liter, og de forskjellige snøkvalitetene ble beregnet om til massen av snøen sammen med massen til boksen. Dette forholdet kan sees i Tabell 6.

Tabell 6: Snøkvalitet(Gjerland and Olsen, 2014) og masse av målebeger

kvalitet	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kg/m ³	0- 50	50 -100	100- 200	200- 300	300- 400	400- 500	500- 600	600- 700	700+
g/boks	0- 186	186- 301	301- 561	561- 811	811- 1061	1061- 1311	1311- 1561	1561- 1811	1811+

Testingen startet fra kl. 8 torsdag 9. februar. Isboksen ble satt ut i nedfallsområdet, og da denne var full ble den veid. (Se Figur 20) Snøkvaliteten ble bedømt ut fra vekten på snøen. Ut fra dette ble vannmengden på snøkanonen justert. Etter hver veiing ble det vurdert om innstillingene på kanonen skulle endres. Alle veiinger og justeringer ble grundig notert ned i et skjema tilsvarende Tabell 7. Denne målemetoden fungerte meget bra, og gav hyppige resultater ved kalde temperaturer og stor produksjon. Midt på dagen da temperaturen var på sitt høyeste gav det derimot noen problemer. Ved produksjon med 1 og 2 ringer tok det over 30 minutter å fylle boksen, slik at det ble veldig lenge mellom hver måling.

Tabell 7: Protokoll ført under testingen

Tid	Antall ringer	Snøvekt inkl. boks
08.00	4	1364
08.20	4 justerer til 3	1360
08.35	3	1094
08.40 -08.50	Stans, flyttet 3m bakover	
09.05	3	1127
09.30	4	1060 noe luft
09.41	4 justerer ti 3	1235
09.51	3	1103

Som vi ser av Tabell 7 var det også en produksjonstopp for å flytte kanonene til en mer gunstig posisjon. Det var 2 slike stopp i løpet av dagen. Disse stoppene burde kunne oppdages på målingene av relativ luftfuktighet. Under den ene stansen ble det gjort en liten tabbe. Etersom snøhaugen skulle bearbeides av maskiner måtte målerne fjernes. Disse ble lagt bak i en bil, og dermed ble forholdene i denne bilen målt i den perioden. Målerne ble først satt tilbake etter at snøproduksjonen igjen var i gang, slik at denne perioden antagelig vis ikke kan brukes med tilstrekkelig sikkerhet videre i analysen.



Figur 20: Testvekt fra kl.09.51, 1103g tilsvarer kvalitet 6, og det ble produsert med 3 ringer.

Problemet med for lite areal for snøfangning ble justert til dag 2. En plastikkpose ble montert på boksen, slik at snøen ble samlet opp fra et større område, men kunne enkelt legges opp i boksen. Dermed ble det et fysisk skille mellom den snøen som lå på bakken og snøen som falt i denne målingen. Dette gjorde at snø produsert med tidligere innstillinger ikke havnet i denne målingen. Den modifiserte boksen kan sees i Figur 18. Denne løsningen gav mye hyppigere målinger for samtlige innstillinger. Ved én ring aktiv ble tiden redusert fra 30-40minutter til 15minutter. Målingene denne dagen ble avsluttet noe tidlige enn dagen før, da temperaturen var relativt høy hele dagen. Dermed var det ingen hensikt i å ta mange målinger hele dagen med samme antall ringer og tilnærmet samme temperatur. Det ble gjort forsøk med 2 ringer, men snøen ble så våt at det ble avsluttet med en gang. Ved å endre fra én til to ringer økes vannmengden med 100%, noe som gir store utslag, da

dette er i et område der marginale endringer betyr mye. Dette er lite gunstig med tanke på at det viktigste området å optimalisere produksjonen er rundt null grader. Ved å endre fra tre til fire ringer økes vannmengden bare med 33%, og når produksjonen er så høy er et allerede godt med kuldegrader, og behovet for finjustering er ikke så stort.

Fredag 10. februar kl. 12 ble målingene avsluttet og målerne ble ansett for å stå plassert slik at det kunne produseres ganske mye snø før det ble problemer. I løpet av natten snudde derimot vindretningen, og snøen la seg i området som sensorene var plassert. Dette førte til at noen av sensorene snødde ned. Lørdag 11. kl. 13 ble det oppdaget at to av sensorene (10 og 20m) hadde snødd ned. Søk ble straks iverksatt og det ble gravd i snøen for å finne sensorene. 10m ble funnet relativt raskt, men 20m var fortsatt ikke å se etter 2 timer graving. Videre søk ble utsatt til det var mer interessante forhold for kvalitetsmåling.

Senere på kvelden var temperaturen i ferd med å synke, og prognosene var at det skulle være mulig å øke antall ringer utover kvelden, men likevel holde kvaliteten oppe. Målingene ble gjenopptatt kl. 17, sammen med søket etter måleren på 20m. Noen bilder, og plasseringen (20m fra kanonen) gjorde at søkeområdet var noe begrenset, men det hadde kommet mye snø i løpet av natten. Nærme kl. 20 ble søket avsluttet og måleren og dataene ble ansett som tapt. I denne perioden hadde anslagsvis 6-8m³ blitt håndmåket. Resultatet av gravingen kan sees i Figur 21. I tillegg til at sensoren ble ansett som tapt gjorde også noen tekniske problemer med lagringen av målingene fra kvelden, at

også disse dataene gikk tapt. Området ble forlatt like før kl. 20. Snøproduksjonen var planlagt avsluttet dagen etter, så det ble antatt at målerne nå ville klare seg uten å snø ned.



Figur 21: Utgravd område fra leting etter måler på 20m

Fasen der produksjonen ble stoppet er interessant i forhold til målinger. Forskjeller mellom de lokale målerne og målere som ligger litt lengre unna skal i teorien utjevnes da produksjonen stopper. Den siste natta ble det også produsert mer enn forventet, slik at da produksjonen ble stoppet hadde 10m snødd ned på nytt og målte temperaturen og fuktighet inne i snøhaugen. Denne ble funnet raskt og dataene ble reddet. Data fra 0 og 30m var også meget gode, men måleren på 50m hadde ikke registrert noen data. Om dette er en feil ved måleren eller en brukerfeil er uvisst. Data herfra er i alle fall tapt.

Resultatet av disse målingene er dermed om lag 35 målinger av snøkvalitet, med tidspunkt og antall ringer. Målinger fra tre målere i produksjonsområdet (0, 10 og 30m) av temperatur og relativ luftfuktighet målt over tid.

Etter denne perioden ble hele oppsettet og testingen evaluert. For testing av snøkvalitet fungerte metoden med det modifiserte målebegeret meget bra. Det ble derfor besluttet at denne metoden skulle være med videre. Målingene av temperatur og luftfuktighet inne i nedfallsområdet var et

annet punkt som ble vurdert. Her hadde en måler gått tapt, og mye tid gikk med til leting etter flere av målerne. Derfor ble det vurdert tiltak for dette. Det viktigste tiltaket skulle være hyppig tilsyn for å unngå at de snødde ned. Det ble også vurdert tiltak for enklere søk da uhellet først var ute. Ett alternativ som ble vurdert var snøskredsøkeutstyr. Dette utstyret reflekterer signaler sendt fra en håndholdt søker. Dermed ville det være enklere å finne målere som var nedgravd i snøen. Dette tiltaket ble likevel vurdert som unødvendig, da utstyret som ble brukt ikke hadde veldig høy verdi, og eventuelle tap av noen data ble ikke sett på som kritisk for oppgaven.

4.3.2 Testperiode 2, tidlig mars

Produksjonen startet igjen tidlig i mars. Denne perioden var ikke like stabilt kald som forrige, så det ble bare produsert om natten. Torsdag 2. mars ble det startet opp igjen, og det ble produsert natt til 3., 4. og 6. Denne perioden var det kaldere enn antatt i Granåsen, og produksjonen kom litt brått på. Det ble derfor ikke gjort noen målinger ved snølageret i begynnelsen av perioden. Tirsdag 7. mars ble det satt ut målere på 0, 10, 20m. En av målerne ble som kjent borte i den tidligere testingen og en av de lagret ikke data, derfor ble det noen færre målepunkter denne gang. Dagtemperaturen gjorde at det ikke var mulig å produsere snø på dagtid, men produksjonen startet opp ved 17. tiden, samtidig som målerne ble satt opp. Veiingen av snøen startet ikke før 19.40. Denne kvelden var meget kald, og det ble produsert med 4 ringer hele tiden. Dette gav gode muligheter til å se hva som skjedde med snøkvaliteten med samme produksjonsrate, men med synkende temperaturer. I teorien burde snøen bli lettere utover kvelden. Testingen foregikk på samme måte som tidligere, med målebegeret og notering av tidspunkt og vekt. Målingene ble avsluttet ved 22 tiden, og 8 nye målinger ble resultatet. Registreringen av luftfuktighet fortsatte og målerne ble værende i produksjonssonen.

Dagen etter, onsdag 8. mars ble det besluttet at antall målinger av snøkvalitet var nok, men at temperatur og luftfuktighet skulle måles videre. Ved sjekk av målerne viste det seg at enda en hadde snødd ned. Denne gangen var det måleren på 10m som var borte. Dette viser at nedfallsområdet endrer seg litt med vind, og hvordan kanonene er stilt inn. Denne måleren lot seg dessverre ikke finne, og disse dataene gikk tapt.

Med resultatene fra målingene inne i nedfallsområdet for hånd ble oppsettet justert noe. Målet denne gangen var å se hvordan luftfuktigheten var i området utenfor nedfallssonen. Nærmere bestemt i ulike radier rundt produksjonsenheten. For å undersøke dette måtte målerne flyttes rundt på forskjellige plasser. Ut fra et system forbered på forhånd ble målerne plassert ut på bestemte plasser og flyttet ved bestemte tidsintervaller.

Dette var siste kveld med snøproduksjon i anlegget for denne sesongen. I løpet av disse to periodene har det blitt produsert omkring 15 000m³ snø for lagring til neste sesong.

4.4 Hvordan finne sammenhengen mellom snøkvalitet og andre variabler som inngår i snøproduksjon

Det er mange parametere som inngår i snøproduksjonen. Noen av disse er gitt av forholdene i naturen, og noen kan kontrolleres. Det som er kontrollerbart er vannmengde, dråpestørrelse og falltid. Faktorer som er gitt fra naturens side er temperatur, luftfuktighet, vind og vanntemperatur. Hvor fort disse endres spiller en stor rolle med tanke på hvordan de påvirker snøproduksjonen, og hvordan det er å måle parameterne, og fastslå sammenhenger. Vanntemperatur er en faktor som endres sakte i naturlige omgivelser, slik vi har her. Under testingen har temperaturen på Leirsjøen vært tilnærmet konstant 2°C. Dermed har det ikke vært mulig å undersøke hvordan andre

temperaturer påvirker snøkvaliteten. Derfor har vanntemperaturen blitt utelatt fra analysene videre. Litteraturen tilsier at økt vanntemperatur gir lavere snøkvalitet for en gitt T_v .

Noen faktorer som kan kontrolleres har også blitt utelatt. Dette er falltid og dråpestørrelse. Dråpestørrelsen er gitt av snøkanonen, og kan ikke endres. Dermed er det ikke hensiktsmessig å vurdere denne. Hvordan dråpestørrelsen påvirker snøkvaliteten er beskrevet i 2.1.1 Faktorer som påvirker snøproduksjonen. Falltiden er en annen faktor som har blitt vurdert bort fra disse analysene. For å kunne vurdere falltidens betydning må alle andre faktorer, som vind, temperatur og fuktighet holdes stabile, og så foreta målinger ved ulike høyder. Dette er et forsøk som ikke lar seg gjøre i denne oppgaven. Måling av falltidens betydning på andre måter vil være en meget unøyaktig, og tilføre mer usikkerhet enn økt forståelse. Falltiden er også en faktor som vil endre seg kontinuerlig, ettersom snøen som blir produsert lander i haug, og dermed endres høyden. Generelt bør lengst mulig falltid etterstrebtes.

Kanonens vinkel i forhold til faktisk nedfallssted har heller ikke blitt vurdert. Ved å sammenlikne vindens retning og hastighet i forhold til kanonens vinkel i forhold til nedfallssted burde det være mulig å kontrollere hvor snøen lander. Dette har ikke en direkte innvirkning på snøkvalitet eller hvordan temperaturen og luftfuktigheten endrer seg i forhold til produksjonen. Derfor har kanonens vinkel ikke blitt vurdert i denne oppgaven. Vinden antas også å ikke ha noen direkte innvirkning på snøkvaliteten annet enn at den kan påvirke T_v . Dermed kan snøkvaliteten bestemmes som en funksjon av T_v og vannmengde, uten å ta hensyn til vind.

Det vi da sitter igjen med er temperatur, luftfuktighet og vannmengde. Dette er to faktorer som vi ikke kan kontrollere, men måle, og en som kan kontrolleres. Dette er forhold som Trondheim Bydrift ut fra tidligere erfaringer har laget en oversikt over. Dette er opp gitt i Tabell 8. Denne tabellen er meget grov, og tar ikke hensyn ønsket snøkvalitet. For å kunne bestemme dette forholdet nærmere måtte snøkvaliteten måles og sammenliknes med T_v .

Tabell 8: Forhold mellom T og antall ringer

T	Antall ringer
-5 til -7°C	1
-7 til -8°C	2
-8 til -9°C	3
Kaldere enn -10°C	4

Snøkvalitet er oppgitt i Tabell 3, Tabell 4 og Tabell 6 i litt forskjellige konfigurasjoner og definisjoner. Ulempen med noen av disse er at de tar med alle snøtyper, og derfor blir kunstsne lite nyansert ut fra disse skalaene. Kunstsne har en tetthet mellom 300 og 500kg/m^3 dette faller utelukkende innenfor kvalitet 5 og 6. Dette stemte også god med målingene vi gjorde av snøen. Erfaringer viste at ettersom nesten all snøen falt innenfor kvalitet 5 og 6 var det meget stor forskjell på snøen. Derfor var denne måten å oppgi snøkvalitet lite hensiktsmessig. Tabell 3 gir et bedre bilde av hvordan snøen er, men dette er en mer subjektiv vurdering.

Under analysene har derfor en ny skala, beregnet på kunstsne blitt tatt i bruk. Den gjengir kunstsne mye bedre, da denne har et mye mer begrenset omfang enn naturlig snø. Med utgangspunkt i målingene vi har, ble skalaen valgt fra 300 - 600kg/m^3 , med steg på 50kg/m^3 . Dette gir en kvalitetsskala med 6 trinn og en oppløsning på 50kg/m^3 . Tabell 9 viser en oversikt mellom kvalitet, tetthet og masse på målebegeret. Ut fra denne tabellen ble alle målingene av massen til målebegeret omregnet til snøkvalitet gitt skalaen i denne oppgaven. Denne snøkvalitetsskalaen blir brukt i resten

av oppgaven. Ved senere beskrivelser vil kvalitet 1 bli omtalt som den høyeste kvaliteten, og 6 som den laveste.

Tabell 9: Snøkvalitetsskala beregnet for kunstsne

Kvalitet	1	2	3	4	5	6
Kg/m ³	300-350	350-400	400-450	450-500	500-550	550-600
g/boks	811-936	936-1061	1061-1186	1186-1311	1311-1436	1436-1561

Denne skalaen med 6 trinn viste seg å stemme ganske godt overens med Tabell 3, som er gjengitt under.

Snøkvalitet	Beskrivelse
1	Snøen kan ikke pakkes, pudder
2	Snøen kan kun pakkes til en løs ball, som faller fra hverandre
3	Snøen kan bli pakket til en ball, som kan som kan brekkes
4	Snøen kan pakkes til en tett ball, som ikke endrer farge under trykk
5	Snøen kan pakkes til en tett ball, som endrer farge under trykk, men drypper ikke
6	Snøen kan pakkes til en tett ball, som drypper under trykk.

Når definisjonen av snøkvalitet og målingene var på plass måtte disse vurderes opp mot T_v . Alle målingene var knyttet til et bestemt tidspunkt, og dermed hadde vi om lag 40 målinger ved ulike produksjonsbetingelser. Med god kontroll på tiden kan det trekkes ut sammenhenger mellom T_v , snøkvalitet og antall ringer. Dette fremstilles grafisk og forklares i 5.1 Forholdet mellom snøkvalitet etter egendefinert skala og andre variabler.

4.5 Testing av hvordan snøproduksjonen påvirker seg selv og eventuelle nærliggende produksjonspunkt

Det er naturlig å tenke at ved å sprute store mengder med vann opp i lufta, vill dette påvirke lufta i området. Både i form av økt fuktighet, og temperatur. For å produsere snø må det være temperaturer under 0°C, mens vannet antas å holde over 0°C. Derfor er det naturlig å tenke at når vannet blir kjølt vil luften bli oppvarmet. Det interessante med denne påvirkningen er å se hvordan forholdene for snøproduksjon blir endret som følge av seg selv, og i hvor stort område denne mulige påvirkningen skjer. Størrelsen på dette området kan være med på å bestemme hvor det er gunstig å plassere nærliggende produksjonsenheter. Temperatur og luftfuktighet kan beregnes om til en felles verdi, T_v , men for å ha bedre oversikt over hva som skjer med hver enkelt av disse blir de analysert hver for seg.

Ettersom alle målerne som har blitt brukt måler både luftfuktighet og temperatur, kan disse vurderingene gjøres på samme måte, men med forskjellige verdier. Det mest naturlige for å finne et slikt område av påvirket luft er å starte nær produksjonen, og deretter måle lengre unna, for å forsøke å finne størrelsen på område.

For automasjon av snøkanonen er det naturlig å bruke kanonen som referanse for temperatur og fuktighet. Derfor ble det plassert en måler på produksjonsenheten, for så å vurdere hvordan forholdene her var sammenliknet med inne i nedfallsonen, og i den umiddelbare nærheten. Ettersom det er stort nedfall og omdannelse fra regn til snø midt inne i nedfallssonen er det naturlig å tro at

det er store påvirkninger av lufta her i forhold til der hvor det ikke faller snø. Derfor ble det plassert målere i ulike avstander fra produksjonsenheten. Målet for disse målingene var å avdekke eventuelle forskjeller i temperatur og luftfuktighet i nedfallsområdet i forhold til ved produksjonsenheten. Målere ble plassert på 10, 20, 30 og 50m. Grunnen til at disse posisjonene ble valgt, var at de dekket størsteparten av nedfallsområdet, og i tillegg lå 50m noe bortenfor der snøen landet, slik at det var naturlig å tenke at denne igjen skulle være mindre påvirket.

Data fra RHT 10 målerne ble importert over i Excel, for en enklere datahåndtering. Dermed kunne luftfuktigheten og temperaturen framstilles som en funksjon av avstanden fra produksjonsstedet.

4.5.1 Måling av luftfuktighet i nedfallsområdet

Hypotese: Snøproduksjonen fører til en forhøyet luftfuktighet i et område rundt produksjonspunktet, som er ugunstig med tanke på produksjonen og også for nærliggende produksjonspunkter.

For å teste ut denne hypotesen trengs det en rekke målinger. Utførelsen av målingene har blitt beskrevet tidligere. Dette kapitlet handler om hvordan data har blitt analysert. For å kunne sammenlikne målingene er det viktig at samme tidspunkt sammenliknes for alle målere. Luftfuktigheten endres naturlig med forholdene i atmosfæren, og derfor kan det være at snøproduksjonen ikke er den eneste påvirkningen. Derfor bør det sammenliknes med en eller flere punkter som antas å ikke være påvirket. Nord og Øst har blitt tatt med i målingene, som slike referanser. Periodene med snøproduksjon har blitt delt inn i ulike perioder, som utgjør de forskjellige testene.

Tabell 10: Oversikt over tidspunkt for ulike tester

Test	Start	Slutt
Test 1	07.02.2017 20:00	07.02.2017 23:00
Test 2	08.02.2017 00:00	08.02.2017 04:30
Test 3	09.02.2017 08:00	09.02.2017 11:17
Test 4	09.02.2017 11:34	09.02.2017 15:45
Test 5	10.02.2017 08:25	10.02.2017 11:44
Test 6	07.03.2017 19:40	07.03.2017 21:34
Referanse	25.03.2017 18:00	26.03.2017 02:00

Tabell 10 viser oversikten over når de forskjellige periodene har vært. Det er en god spredning over når på døgnet testene har blitt foretatt, men hovedvekten av målingene har blitt valgt til kveld, natt og tidlig morgen. Dette fordi solen ikke har innvirkning på målingene i disse periodene. Referansen er en periode uten snøproduksjon. Denne ble tatt med for å se om det er naturlige forskjeller i luftfuktigheten ved de forskjellige målepunktene uten snøproduksjon.

Innenfor hver periode har minst 9 ulike tidspunkt blitt plukket ut. For hvert av disse tidspunktene har luftfuktigheten i samtlige målepunkter blitt notert. Deretter har gjennomsnittet for hele perioden blitt lagt til grunnlag for å lage en kurve over perioden. Dette har ført til 6 ulike kurver, og en referanse med kun ett punkt i snølageret. Som en totalvurdering har et gjennomsnitt av alle disse målingene blitt framstilt. Dette gjennomsnittet inneholder ikke data fra målingene uten snøproduksjon. Resultatet er framstilt i Figur 23.

4.5.2 Måling av luftfuktighet i umiddelbar nærhet utenfor produksjonsområdet

Etter undersøkelser av hvordan luftfuktigheten i nedfallsområdet er, er det naturlig å vurdere hvordan snøproduksjonen påvirker et større område. Derfor bør det også måles utenfor nedfallssonen. For å få et godt bilde av situasjonen bør det måles med ulike avstander rundt produksjonsenheten, og i forskjellige vinkler. Det er naturlig å tro at retningen kanonen spruter har en innvirkning på hvordan luftfuktigheten fordeler seg i området rundt. Derfor ble kanonen også her valgt som referanse, og målingene ble foretatt i en halvsirkel omkring dette punktet. Ettersom det var lite vind under disse målingene ble det antatt at målinger i en halvsirkel, holdt. For å få et bedre bilde kan disse målingene speiles om kanonen.

Målet for disse målingene var å finne et område rundt produksjonen som var påvirket med en forhøyet luftfuktighet. Målingene ble tatt på 10, 20, 30 og 50m fra produksjonsenheten, i vinkler på 0, 45, 90, 135 og 180 grader fra produksjonsretningen. Det ble antatt at sonen som var påvirket var mindre enn 50m. Ideelt sett burde det ha vært mange nok målere til å måle alle steder samtidig, men det var det ikke tilgang på. Dette gir totalt 20 ulike målepunkter, i tillegg til en måler i referansen. Etter tapet av 2 av målerne var det 3 gjenværende. En av disse ble plassert på produksjonsenheten, som en referanse, de to andre ble flyttet rundt

Målingene ble foretatt over 20 minutter på hver plass, og posisjon og tidspunkt ble notert i Tabell 11. Som Tabellen viser er ikke alle målingene helt konsekvente i forhold til avstand. Dette kommer av rent praktiske grunner, at det ikke var mulig å plassere sensoren eksempelvis midt i en vei.

Tabell 11: Tidspunkt og posisjon for målerne. 20m(27xx) 1min og Noname 30sek svarer til navnet på måleren og samplingsintervallet.

Start	Slutt	20m (27xx) 1min		Noname 30sek	
		Vinkel (grader)	Avstand (m)	Vinkel (grader)	Avstand (m)
17:30	18:10	0	20	0	30
18:10	18:45	0	50	0	60
18:45	19:16	45	10	45	25
19:16	19:45	45	40	45	50
19:45	20:05	90	10	90	25
20:05	20:25	90	35	90	50
20:25	20:45	135	10	135	20
20:45	21:05	135	30	135	50
21:05	21:25	180	10	180	20
21:25	21:45	180	30	180	50

Informasjonen fra denne tabellen ble satt sammen med den gjennomsnittlige verdien for luftfuktighet i tidsperioden målt med RHT 10, og dermed ble det en tabell med de ulike luftfuktighetene i forskjellige posisjoner rundt produksjonen.

4.5.3 Registrering av endringer i luftfuktigheten ved endringer i produksjonen

Ved en påvirkning av luftfuktigheten burde den beste måten å se dette på være ved oppstart av produksjonen. Til nå har vi sett på hvordan luftfuktigheten forholder seg til målingene ved

produksjonsenheten. Dette avsnittet vurderer hvordan fuktigheten i produksjonspunktet varierer med endringer i produksjonen. Slike variasjoner er gode indikasjoner på at produksjonen har påvirkning på luftfuktigheten.

RHT 10 loggerne har stått ute under hele produksjonen. Disse lagrer alle data med tilhørende tidspunkt. Derfor kan endringer i produksjonen finnes igjen i målingene fra RHT 10. Det er to tilfeller som skal vurderes grundigere her.

07.02.2017

Oppstart av snøproduksjon. Dette er den første oppstarten vi har målt. Det hadde ikke vært kaldt på lenge, men det var en klar periode med mye vind. Målerne ble satt ut omtrent samtidig med starten av snøproduksjonen. Derfor er denne den beste indikatoren på hvordan luftfuktigheten vil øke ved produksjonsstart.

09.02.2017

Produksjonen har gått kontinuerlig i to dager, og det har bygget seg opp en betydelig snøhaug ved kanonene. For å forbedre falltiden, og plassere snøen mer gunstig, ble anlegget stanset i 15 minutter. I denne perioden ble begge kanonene flyttet 5m bakover. Alle målere ble flyttet tilsvarende, slik at målingene fortsatt skulle være konsekvente. Denne stansen er ikke på langt nær like lang som den forrige. Målinger fra denne stansen vil gi et innblikk i hvor fort lufta i produksjonsområdet vil bli skiftet ut.

4.5.4 Måling av temperatur i nedfallsområdet

Hypotese: Snøproduksjonen fører til en forhøyet temperatur i et område rundt produksjonspunktet, som er ugunstig med tanke på produksjonen og også for nærliggende produksjonspunkter.

Testingen av denne hypotesen har fulgt samme framgangsmåte som for 4.5.1 Måling av luftfuktighet i nedfallsområdet resultatene er framstilt i Figur 27

4.6 Testing av vindens påvirkning på våtkuletemperaturen

Vinden har en stor påvirkning på snøproduksjonen. Rent visuelt kan man se at snøen blir dratt med i vindretningen, og ikke faller rett ned. Dette kan være et stort problem ved produksjon i smale løyper, og resulterer ofte i stort svinn. Problemet er større med viftekanoner enn lanser, da disse har større kaste- og fallhøyde. Det er likevel ikke denne problematikken som skal undersøkes her.

Hypotesene sier at snøproduksjon vil føre til en økt luftfuktighet og temperatur i et lokalt område. Begge disse variablene er beskrivelser av luften i et avgrenset område nær måleren. Vind er luft i bevegelse og betegnes med en retning og en hastighet. Begge deler er viktige parametere i denne testingen. I motsetning til luftfuktighet og temperatur, som har relativt langsomme svingninger, endres vinden raskt.

Det er tidligere i oppgaven antatt at vinden ikke påvirker snøkvalitet direkte, men at den reduserer den antatt økte T_v . Forutsatt at den nye lufta som blir tilført holder lavere temperatur og luftfuktighet enn lufta i nedfallsområdet.

Hypotese: Vind vil sirkulere luften, slik at ved vind vil den antatte effekten av økt luftfuktighet og temperatur bli påvirket, og den påvirkede sonen kan flyttes mot andre produksjonsenheter.

Luften som er i bevegelse i form av vind vil bevege seg i rette linjer med mindre det er hindringer som landformasjoner i denne banen. Anlegget i Granåsen har en rekke daler og åser, som hindrer vinden å blåse fritt gjennom anlegget. Dette gjør at vinden blir tvunget til å følge dalene. Dette har blitt utnyttet i form av at vindmålerne er plassert ut i bunnen av dalen. Dermed burde all lufta som sirkulerer gjennom Granåsen bli fanget opp på en av de fire målerne. Vinden gjennom dalene er et mål for hvordan luften i hele anlegget skiftes ut. Det burde derfor være mulig å spore påvirkning fra snøproduksjon på disse målerne.

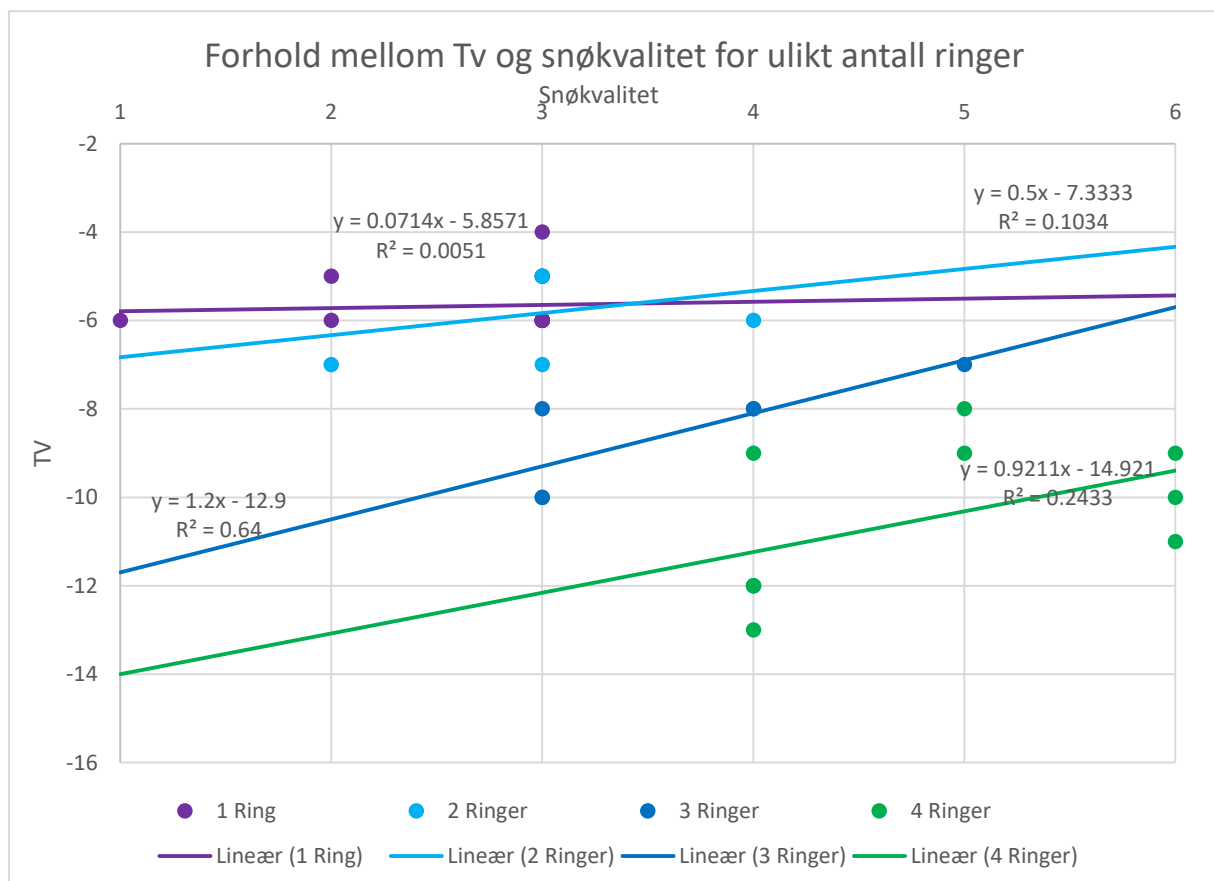
Etttersom vinden er en variabel som er umulig å kontrollere og endres raskt blir det vanskelig å ta utgangspunkt i ulike vindforhold og bedømme temperatur og luftfuktighet ut fra dette. Framgangsmåten blir derfor å se på uregelmessigheter i temperatur og luftfuktighet og forsøke å koble dette opp mot vind.

5 Resultater fra testingen

Dette kapitlet presenteres resultatene fra all testingen som har blitt gjort. Alle data har blitt konvertert til .xls filer, og analysert i Microsoft Excel. Alle grafene er beskrevet og forklart. Grundigere tolkninger og diskusjoner følger i kapittel 6 Vurderinger og kommentarer til resultatene.

5.1 Forholdet mellom snøkvalitet etter egendefinert skala og andre variabler

Framgangsmåten beskrevet i kapittel 4.4, gav en rekke punkter med data der antall ringer, snøkvalitet og T_v ved kanonen var verdiene for hvert punkt. Framstilt grafisk kan dette sees i Figur 22. Hver farge representerer et bestemt antall ringer, lilla: En; lys blå: To; mørk blå: Tre; grønn: Fire. Snøkvaliteten fra den egendefinerte skalaen er oppgitt på x-aksen og T_v på y-aksen. I tillegg til punktene som er satt inn, er det også satt inn lineære trendlinjer, med funksjonsuttrykk og R^2 . Som vi ser av trendlinjene er disse stigende. Dette stemmer godt overens med forventningene. For en gitt mengde vann vil snøkvaliteten synke med stigende T_v . Med unntak av én ring er det det også en relativt lik stigning på alle trendlinjene. For en gitt T_v kan det produseres snø med ulikt antall ringer, men da vil snøkvaliteten synke med flere ringer.



Figur 22: Forhold mellom T_v og snøkvalitet for ulikt antall ringer

Tabell 12 viser resultatene fra Figur 22 satt opp noe mer oversiktlig. Det er justert noe ut fra egne erfaringer i forhold til produksjon med en ring.

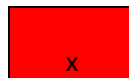
Tabell 12: Forhold mellom T_v , antall ringer og snøkvalitet

		Snøkvalitet							
Tv		1	2	3	4	5	6	7	8
-2	x	x	x	x	x	x	x	x	1
-3	x	x	x	x	x	x	x	1	2
-4	x	x	x	x	1	1	1	2	2
-5	x	x	x	1	1	1	2	2	3
-6	x	x	1	1	2	2	2	3	3
-7	x	1	1	2	2	2	3	3	3
-8	1	1	2	2	3	3	3	3	4
-9	1	2	2	3	3	3	3	4	4
-10	2	2	2	3	3	3	4	4	4
-11	2	2	3	3	3	4	4	4	4
-12	2	3	3	4	4	4	4	4	4
-13	3	3	4	4	4	4	4	4	4

Ringer:



Kan ikke produsere:



Det er viktig å merke seg at disse resultatene kun er gyldig for en vanntemperatur på 2°C. Ved høyere temperaturer vil sannsynlig vis temperaturen måtte være noe lavere for å få tilsvarende kvalitet.

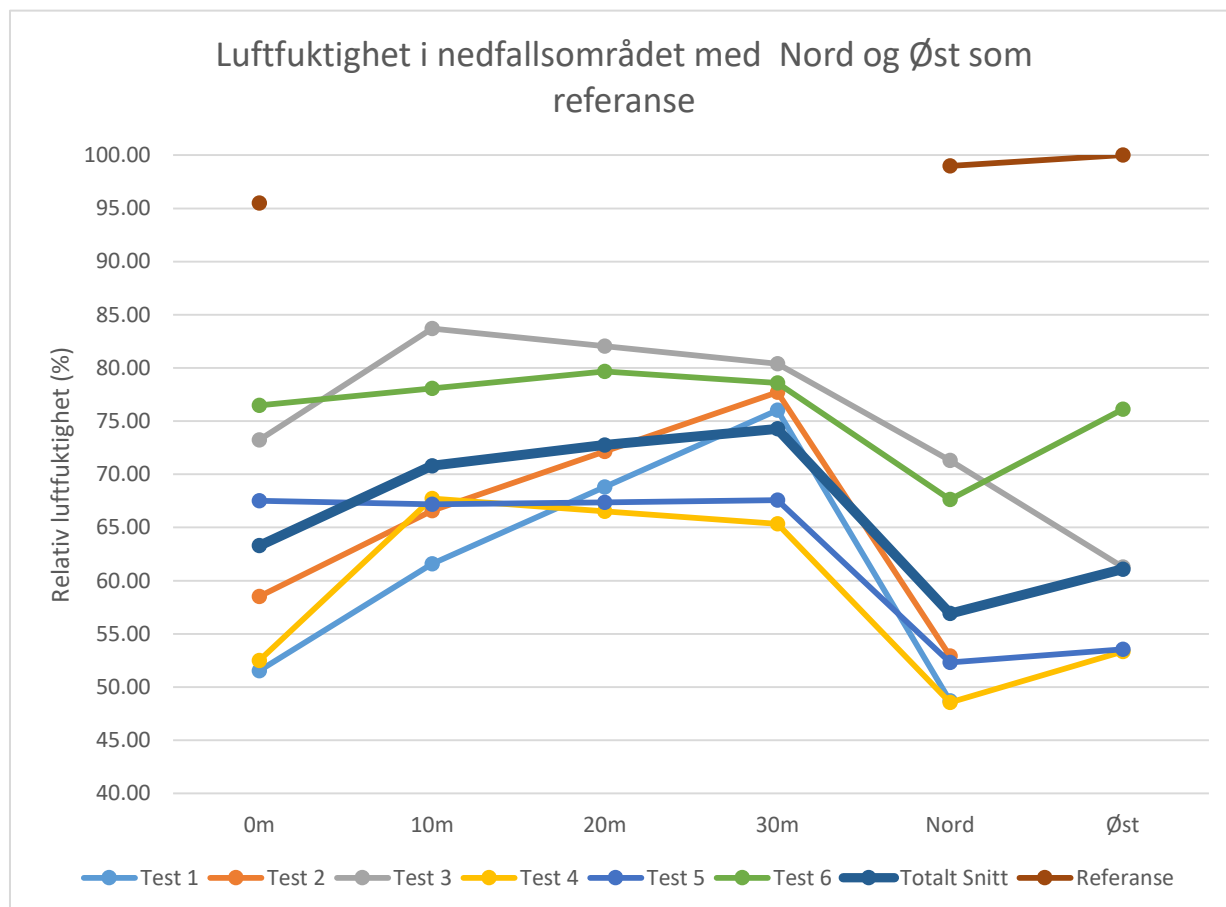
5.2 Hvordan snøproduksjonen påvirker seg selv

Hypotesene sier at snøproduksjonen vil føre til økt lufttemperatur og luftfuktighet i et lokalt område. Det er derfor naturlig å se på resultatene av målingene fra de forskjellige RHT10 målerne som ble plassert i nedfallsområdet. Den som ble plassert på 0m satt fast på produksjonsenheten, og var dermed ikke direkte påvirket av nedfallet. Målingene fra 10, 20 og 30m stod plassert i nedfallssonen, med direkte snøfall, og noen ganger også tildekking av snø. I perioder de var begravd i snøen ble resultatene målinger fra snøen, og ikke lufta. Dermed er disse målingene ugyldige, og fjernet fra resultatene.

5.2.1 Luftfuktighet i nedfallsområdet

Figur 23 viser hvordan luftfuktigheten forandrer seg gjennom nedfallsområdet. Som vi ser er den lavest i produksjonspunktet, men stiger litt gjennom produksjonssonen. Toppen virker til å være litt over 20m fra produksjonsenheten. Nord og Øst er to antatt upåvirkede målere, som ligger hhv. 400m nord og 500m sørøst for produksjonsenheten. Øverst til høyre i Figur 23 er den brune referansen, målt over en periode uten produksjon. Ettersom noen av målerne har forsvunnet under

produksjonen er det ikke alle data som er tilgjengelig. For å løse dette problemet har da gjennomsnittet mellom de to nærmeste punktene blitt brukt. Dette gjelder 10m test 6, og 20m test 1-5. Dette er ikke en optimal måte å gjøre det på, men for å få fremstilt resultatene på en visuelt god måte ble dette løsningen.



Figur 23: Luftfuktighet i nedfallsområdet

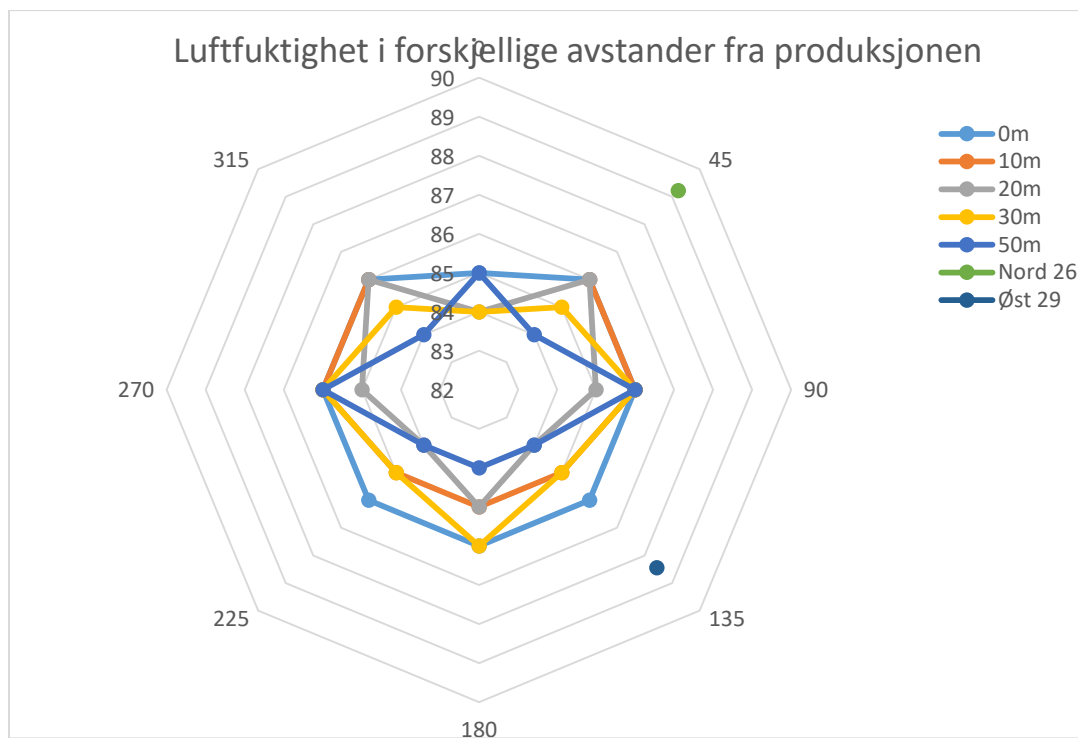
Den tykke blå linjen er snittet av alle målingene med produksjon. Her er det en tydelig topp som øker fra 0m og ut til 30m. Resultatene fra 50m hadde vært meget interessante å vurdere i denne sammenhengen, men disse gikk dessverre tapt. Dermed kan det virke som at det er en markant økning på over 10 prosentpoeng fra 0m til inne i nedfallssonen. En annen ting som bør kommenteres er at luftfuktigheten ikke er 100% i nedfallsområdet. Ved naturlig nedbør er luftfuktigheten som oftest 100%, men ikke under kunstig snøfall.

Hvis vi tar utgangspunkt i 0m, så er luftfuktigheten her en del lavere enn inne i nedfallet, men det er likevel 6 prosentpoeng høyere enn Nord og 2 prosentpoeng høyere enn Øst. Hvis vi sammenlikner dette med referansen så er det der motsatt, 0m er 3 og 4 prosentpoeng lavere enn hhv. Nord og Øst.

Hele grafen er meget konsekvent, med få avvik fra normalen. Unntaket er test 3. I alle de andre testene er Nord lavest, før det er en økning til Øst. Her er Nord høyere enn Øst, noe som avviker både fra snittet og referansen. Analyse av dette avviket kommer i 5.3 Hvordan vinden påvirker snøproduksjonsforholdene.

5.2.2 Luftfuktighet i produksjonens umiddelbare nærhet

Med fordelingen av nedfallsområdet beskrevet i forrige kapittel skal nå produksjonens påvirkning i et litt større område vurderes. Figur 24 viser fordelingen av luftfuktighet i nærheten av produksjonen, med Nord og Øst som uavhengige punkter som tidligere. Som tidligere nevnt foregikk produksjonen i en nordlig retning, noe som tilsvarer 0°. Derfor sammenfaller denne grafens 0° med retningen på produksjonen. Østlig himmelretning er 90° og så videre. Vinklene, som er oppgitt rundt åttekanten er ulike himmelretninger. Fargen tilsvarer avstanden, se forklaring i grafen. Verdiene i y-aksen er luftfuktighet, altså, jo lengre fra sentrum punket ligger jo høyere luftfuktighet.



Figur 24: Luftfuktighet i forskjellige avstander fra produksjonen

Målingene ble tatt i en periode der snøproduksjonen hadde gått i 2 dager. Vi kan anta at forholdene har nådd et stabilt nivå. Verdiene ligger veldig tett i hele området som ble målt. Alle målingene ligger mellom 84 og 86%. En ting som er verdt å merke seg er at under disse målingene var det ikke noen økning i fuktigheten ved 0°, som er området som ble analysert i forrige kapittel.

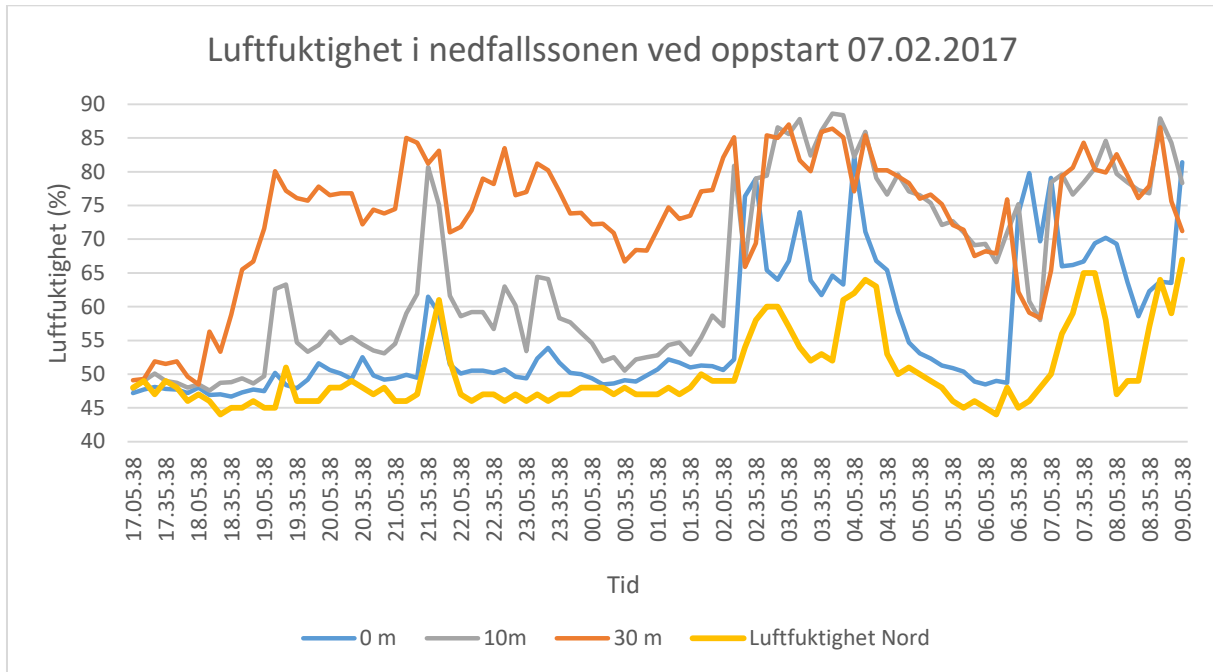
Punktene Nord og Øst har en noe høyere målt luftfuktighet enn målingene i umiddelbar nærhet til produksjonen. Her er det en forskjell på ca. 4 prosentpoeng. Dette er omtrent samme differansen som ble målt i referansen uten produksjon ref. Figur 23.

5.2.3 Hva skjer med luftfuktigheten ved endringer i produksjonen

Hva som skjer ved endringer i produksjon gir en god indikator på hvordan produksjonen påvirker områdene rundt.

07.02.2017

Dette er første oppstart av produksjonen. Det har ikke blitt produsert snø på flere uker, så anlegget er helt upåvirket av tidligere produksjon. Figur 25 viser hvordan luftfuktigheten ender seg etter produksjonsstart.

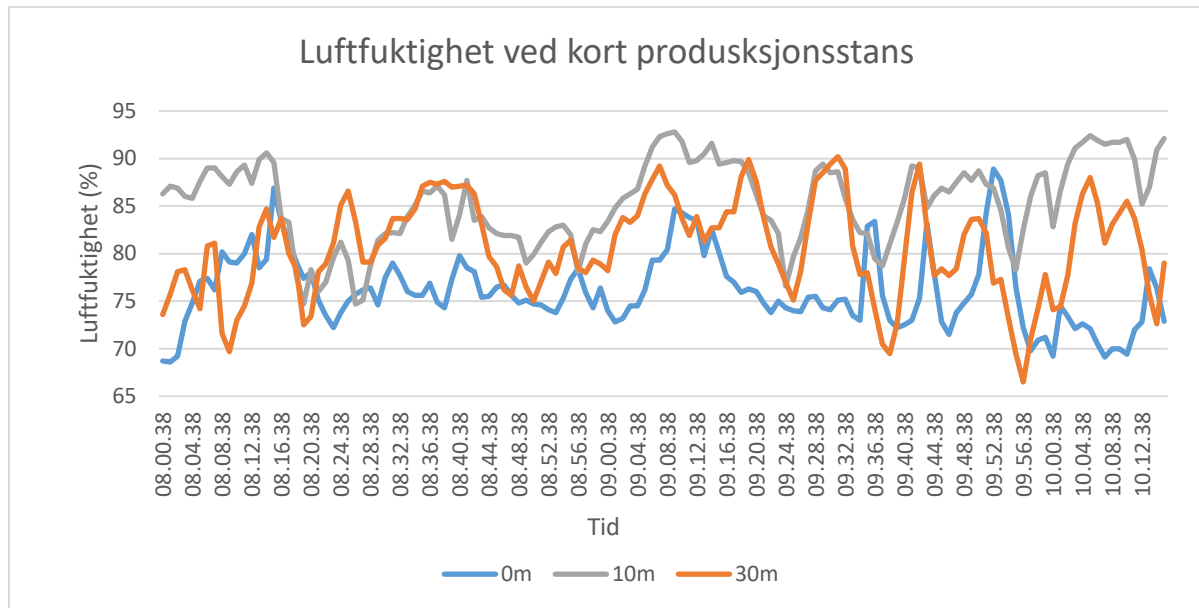


Figur 25: Oppstart av snøproduksjon i upåvirket anlegg

I denne fasen er det meget stor forskjell på 0 og 30m, 10m ligger et sted mellom, men likner mer på 0m enn 30m. Måleren som er plassert inne i nedfallet får raskt en mye høyere luftfuktighet enn det den opprinnelig hadde. 0m derimot har ikke den samme raske stigningen i luftfuktighet. Figur 23 viser at 30m skal ha noe høyere fuktighet enn 0m. Det er noen rare topper og daler i disse måleseriene. Det er disse variasjonene som er interessante. De vil bli grundigere analysert i 5.3 Hvordan vinden påvirker snøproduksjonsforholdene.

09.02.2017

Denne perioden var det en 15minutters kort stans i produksjonen etter lang kontinuerlig produksjon.

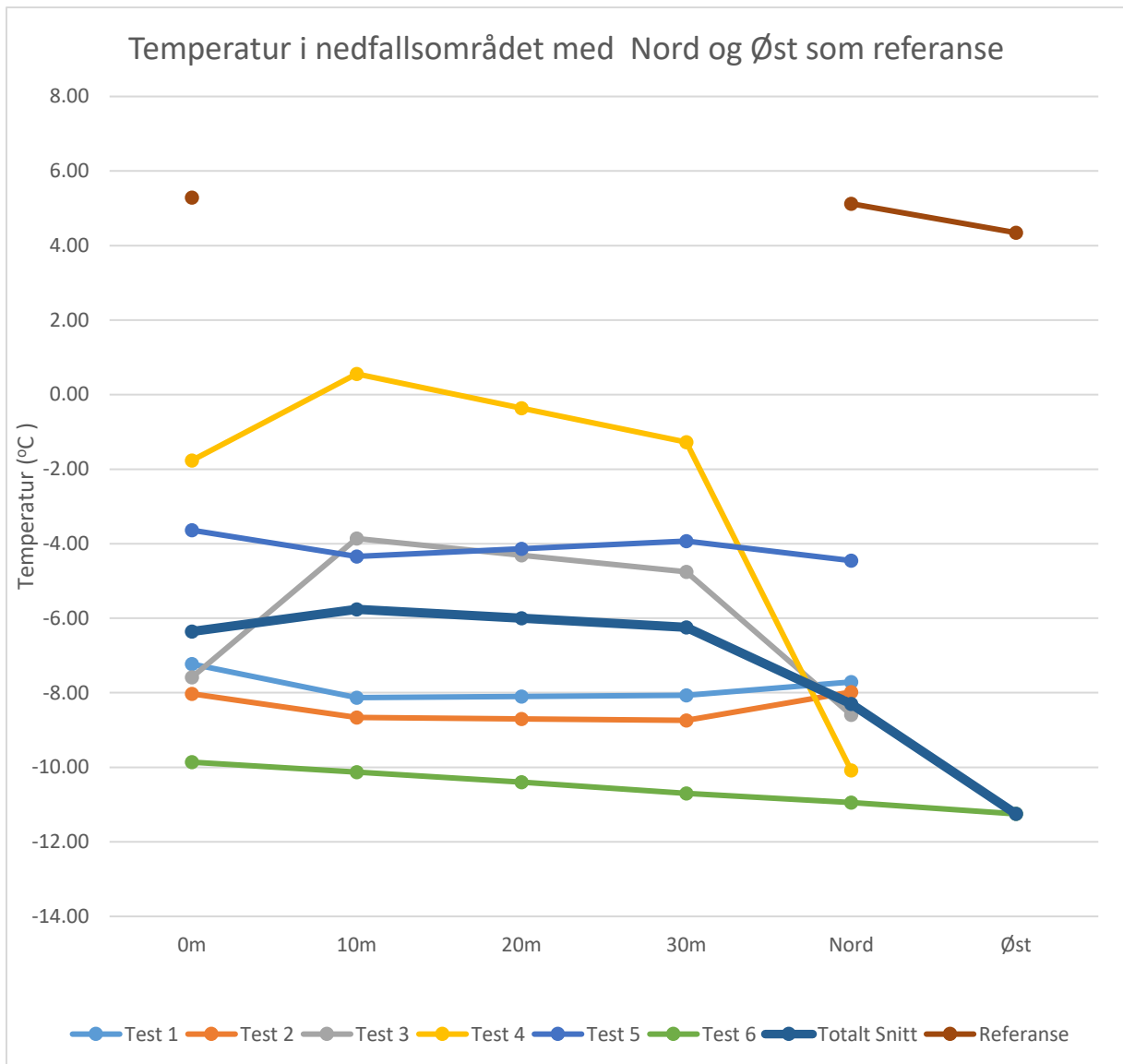


Figur 26: Kort stans i produksjonen etter lang kontinuerlig produksjon

Figur 26 viser en periode på litt over 2 timer mellom kl. 8 og 10.15. En produksjonsstans på 15min fant sted kl. 08.45. Det er ingen spesielle endringer å spore, mulig et lite fall på 30m, men det er flere tilsvarende fall i løpet av perioden avbildet. Dermed vil ikke en slik stans på 15min påvirke luftfuktigheten i målbar grad. Resultatene fra Figur 25 viser at det er en meget rask stigning ved produksjonsstart. Samme fallhastighet er ikke å spore her. Det kan derfor virke som at det er raskere å tilføre energi til lufta enn det er å fjerne den. Antageligvis vil utskiftningshastigheten variere med vinden. Forhold mellom vind og luftfuktighet vil bli presentert i 5.3 Hvordan vinden påvirker snøproduksjonsforholdene.

5.2.4 Temperatur

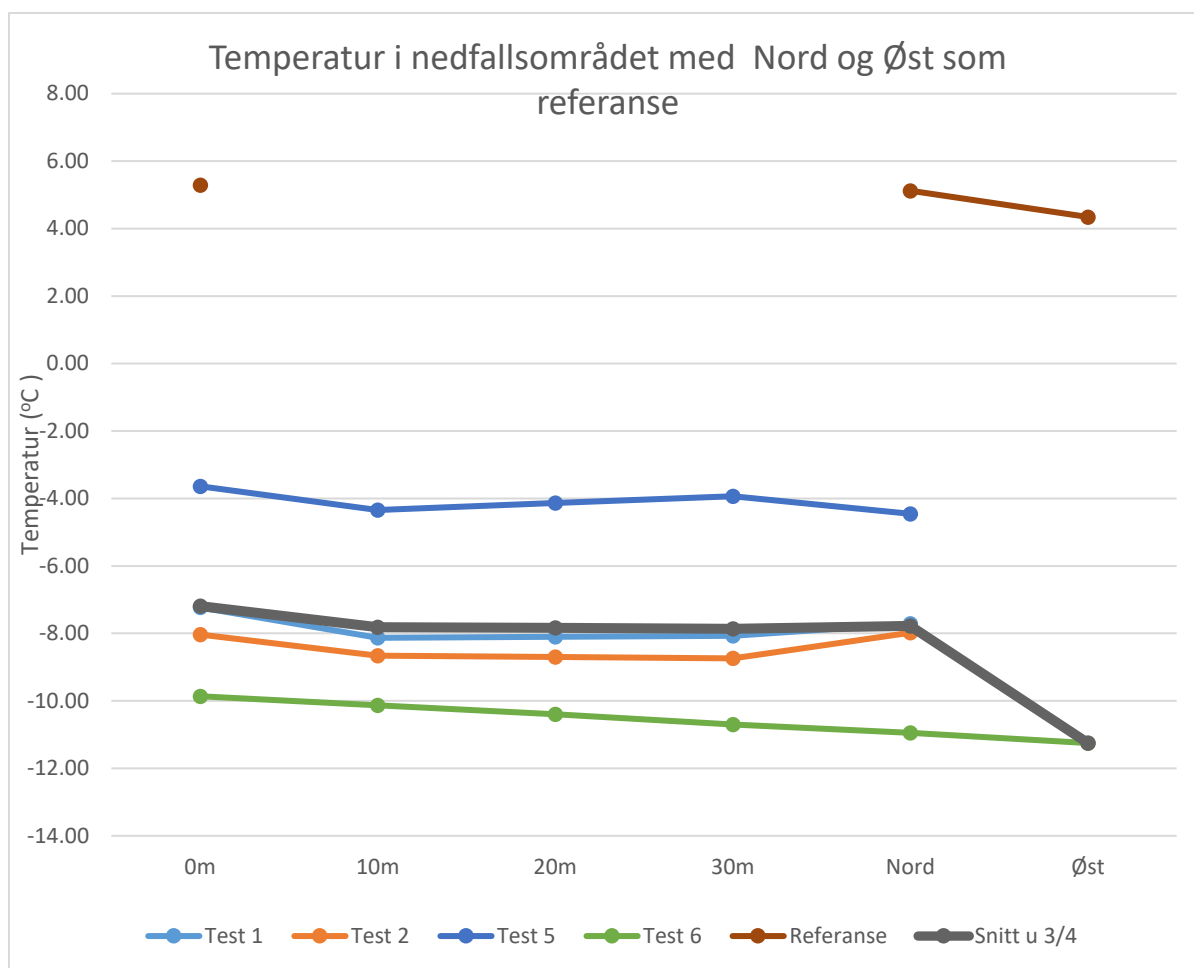
Temperaturen ble målt på samme måte som luftfuktigheten, og framstilt i Figur 27. Oppsettet er det samme som for luftfuktigheten, med de samme tilnærmingene med tanke på manglende verdier. Det er derimot noen store forskjeller. Det er ikke en like tydelig topp inne i nedfallssonen som for luftfuktigheten. Test 3 og 4 er de som har denne trenden, resten ser mer eller mindre upåvirket ut av produksjonen. Ved en grundigere undersøkelse av test 3 og 4 er disse tatt midt på dagen, ulikt resten, som er fra morgen, kveld eller natt. Noen av målingene som er med i disse seriene er unormalt høye, og det kan med stor sannsynlighet antas å være påvirkning av sol. Midt på dagen er det ganske mye sol i området snøen blir produsert. 0m som var montert på produksjonsenheten var litt skjermet av snøkanonen, men målerne som var plassert ute i nedfallssonen stod i direkte sollys. Punktene i Nord og Øst har hvit plastbeskyttelse i motsetning til RHT 10, som er grønn, derfor vil ikke disse bli like påvirket av direkte sollys.



Figur 27: Temperatur i nedfallsområdet.

Den blå tykke linjen er gjennomsnittet av alle målingene. Her ser vi en øking fra 0m til 10m, for så å ha fall hele veien. Test 3 og 4 er de eneste som har denne trenden. Spesielt test 4 er meget høy, og er med på å trekke gjennomsnittslinjen opp i alle punktene i umiddelbar nærhet. Som nevnt over er disse målingene mest sannsynlig påvirket av sollys, og derfor mindre riktige. Et annet punkt som gir litt feil inntrykk i denne grafen er mangel på målinger på punkt Øst. Denne værstasjonen var ikke operativ under første delen av testingen, og det finnes dessverre ikke pålitelige målinger fra denne perioden. Dermed tar gjennomsnittslinjen kun med målingen fra test 6, som er lavere ende andre. Derfor blir fallet fra Nord til Øst unaturlig stort for gjennomsnittslinjen. Test 6 og referansen har derimot tilnærmet likt fall fra Nord til Øst. Dette tyder på at målingene samsvarer godt, og at det naturlig er litt kaldere i punktet Øst enn punktet Nord.

For å kunne se en enda bedre sammenheng har test 3 og 4 blitt fjernet fra Figur 28. Her ser vi at temperaturen er tilnærmet uendret gjennom hele nedfallssonen, og det er derfor naturlig å tro at temperaturen ikke er direkte påvirket av snøproduksjonen.



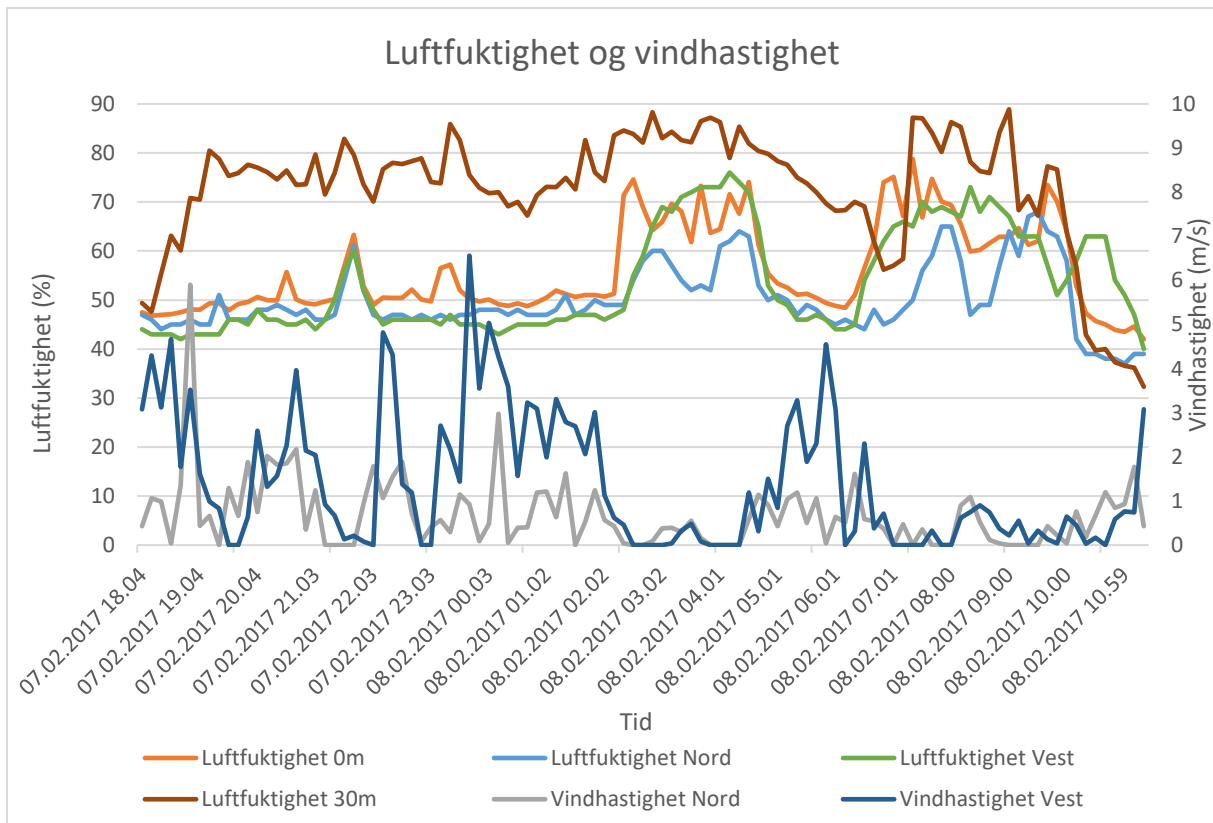
Figur 28: Temperatur i nedfallssonen uten test 3 og 4

5.3 Hvordan vinden påvirker snøproduksjonsforholdene

Til nå har en rekke resultater blitt presentert, og noen avvik kommentert. I dette kapitlet skal noen av disse avvikene settes i sammenheng med vind. Både retning og hastighet vil bli tatt med i resultatene.

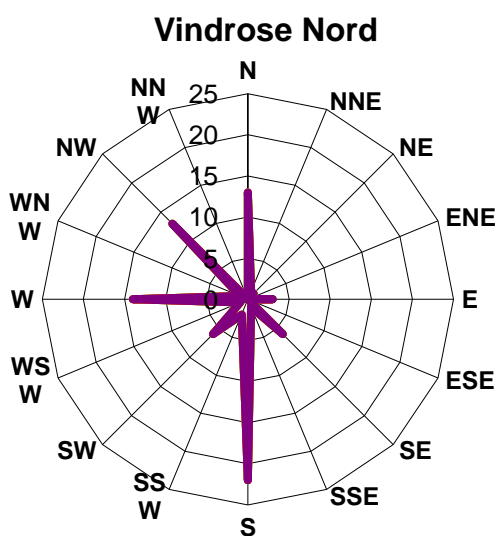
5.3.1 Vindmålinger under oppstart av snøproduksjon

Figur 25 viser en noe merkelig utvikling i luftfuktighet rett etter oppstarten av snøproduksjonen. Ved 30m stiger fuktigheten raskt, og er relativt stabil hele tiden. Ved 0m er den derimot veldig varierende. Derfor blir disse presentert på nytt (oransje og brun) i Figur 29, sammen med luftfuktigheten i Nord (lys blå) og Vest (grønn), som referanser. I tillegg er vinden for Nord (grå) og Vest (mørk blå) tatt med på en sekundær akse. Det er en tydelig sammenheng mellom mye vind og lav luftfuktighet for alle punktene utenom 30m. Alle målingene utenom 30m er også meget sammenfallende. I denne perioden var dessverre målepunkt Øst ute av drift.

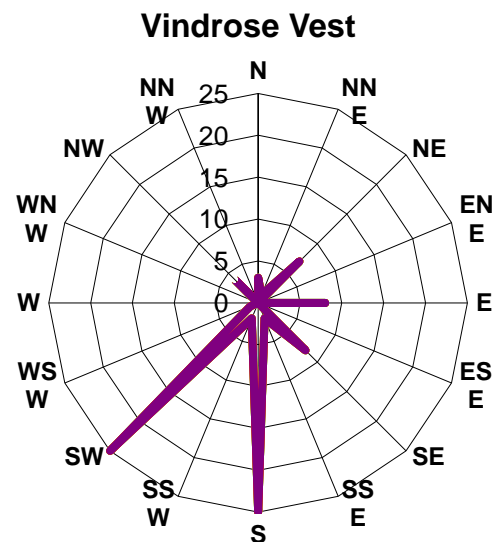


Figur 29: Luftfuktighet og vindhastighet ved oppstart av produksjon

For å få en total oversikt holder det ikke å bare bruke vindhastigheten. Vindretning er også meget viktig. Disse dataene er presentert som en vindrose. (Envirowere, 2007) I vindrosen presenteres antall målinger for hver retning. Alle målinger med 0m/s er fjernet. Grunnen til dette er at vi ikke vet om dette er retningen vinden blåste sist, eller bare en tilfeldig posisjon for retningsmåleren.



Figur 30: Vindrose målepunkt Nord, grafen viser antall målinger for hver retning, uten nullverdier



Figur 31: Vindrose målepunkt Vest, grafen viser antall målinger for hver retning, uten nullverdier

Begge vindrosene viser omtrentlig samme vindretning. Vinden ligger hovedsakelig i sydlig retning, men Målepunkt Nord har også en del målinger fra nord og nordvest

5.3.2 Vindmålinger under målingene gjennom nedfallsområdet.

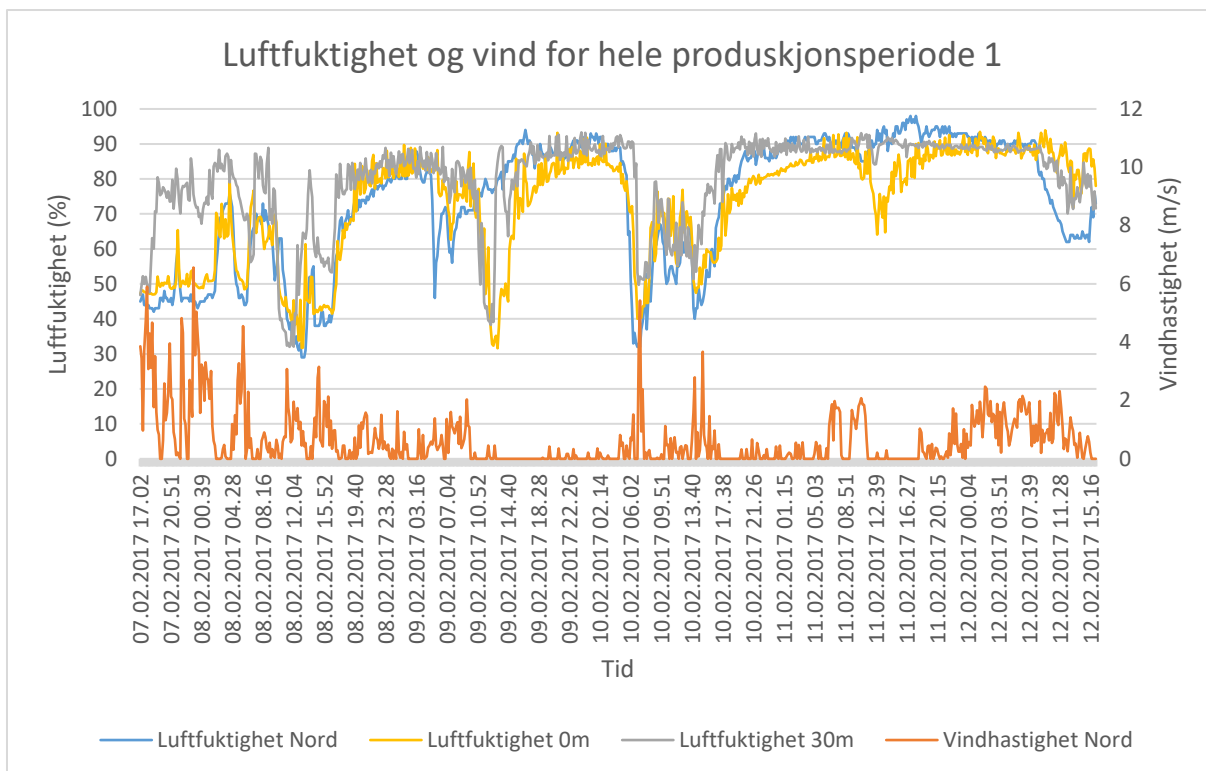
Figur 23 viser luftfuktigheten i nedfallsområdet. Her er de fleste verdiene samsvarende, bortsett fra punktet Nord i test 3. Her er målingen mye høyere enn forventet ut fra de andre målingene. For å undersøke dette ble vindens gjennomsnittlige hastighet og retning for hver periode kartlagt. For at vindretningen skal bli mest mulig rett er alle målinger med vindhastighet 0m/s fjernet fra gjennomsnittet. Resultatet av dette presenteres i Tabell 13. Som vi ser av tabellen er det noen forskjeller i vindretning. Noen skiller seg ut, og andre stemmer godt overens. Test 3 som var utgangspunktet for denne sammenlikningen skiller seg ikke spesielt ut fra de andre seriene.

Tabell 13: Sammenlikning av testserier og vindretning og -hastighet

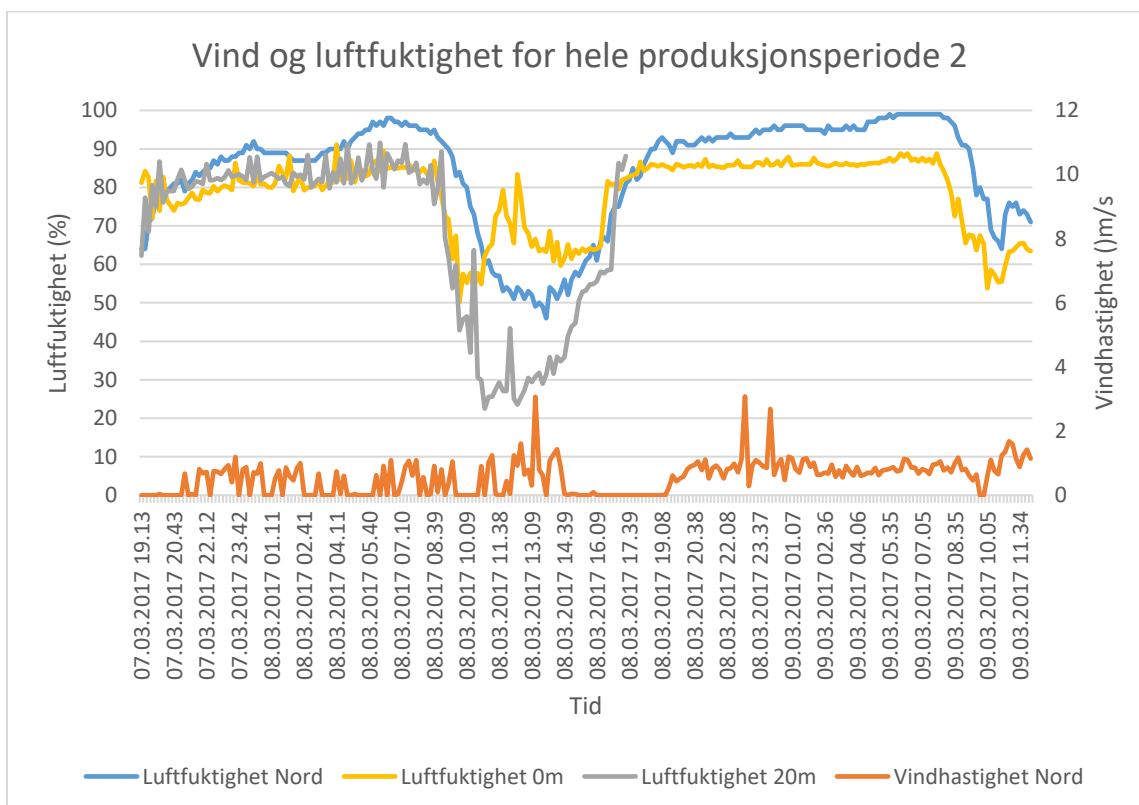
Testserie	Gjennomsnittlig vindhastighet (m/s)	Gjennomsnittlig vindretning (grader)	Gjennomsnittlig vindretning (himmelretning)
Test 1	1,45	183	Sør
Test 2	0,47	234	Sørvest
Test 3	0,19	172	Sør
Test 4	0,45	0	Nord
Test 5	0,35	113	Sørøst
Test 6	0,01	135	Sørøst

5.3.3. Vindmålinger for hele produksjonsperioden

For et mer helhetlig bilde er det interessant å vurdere målingene fra 30m opp mot vinden over en lengre periode. Dette er presentert i Figur 32. Her er luftfuktigheten i Nord (blå), 0m (gul) og ved 30m (grå) presentert sammen med vinden (oransje) i Nord. 30m har et fall 09.02.2017 kl. 14.00. Dette skyldes at måleren ble lagt bak i en bil under bearbeiding av haugen. Dermed er det ikke luftfuktigheten i nedfallsområdet som har blitt målt. 0m ble derimot ikke flyttet, men var plassert på kanonen hele tiden. Også den viser et tydelig fall i samme tidsrom. Fallet 10.02.2017 vises også tydelig på alle andre målere i anlegget. På dette tidspunktet hadde produksjonen i de øvre deler av anlegget blitt stanset, så det var ingen innvirkning fra den.



Figur 32: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 1



Figur 33: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 2

Figur 33 viser luftfuktigheten og vinden på samme måte som Figur 32 her er målinger fra 20m tatt med i stedet for 30m, da det var mangel på målere, slik at 30m ikke ble prioritert. Måleren for 20m ble også flyttet, slik at målinger for kveld nr. 2 ikke er gyldige, derfor er disse fjernet fra figuren.

6 Vurderinger og kommentarer til resultatene

Dette kapitlet tar for seg resultatene presentert i kapittel 5 Resultater fra testingen. Her vil alle resultatene bli kommentert og vurdert opp mot ulike utenforliggende faktorer, og hvordan de samsvarer med hypotesene.

6.1 generelle betraktninger

Det å si noe om hva som påvirker hva i forbindelse med disse resultatene er meget vanskelig. Været endres hele tiden. Derfor er det en utfordrende oppgave å skulle si noe om det er snøproduksjonen eller et værskifte som skaper forandringer. For å ha en større kontroll på dette har alle fire værstasjonen blitt sammenliknet med hverandre. Hvis det har vært en endring i målerne nede i produksjonsområdet, kan disse vurderes opp mot de stasjonære værstasjonene. Hvis ikke noen av de stasjonære viser utslag, kan vi anta at dette er en lokal endring. På samme måte kan vi si at hvis alle de fire målerne viser samme endring som målerne nede i produksjonsområdet, er det mest sannsynlig et værromslag.

En stor feilkilde som er viktig å ta med i forhold til plasseringene til målerne er høyde. Samtlige målere er plassert i omkring 1,5m høyde over bakken. Under snøproduksjon er det vanlig å se sky-/tåkeliknende formasjoner som stiger opp fra området. Ettersom alle målerne er på bakkeplan vil ikke denne avdriften bli fanget opp. Rent praktiske årsaker hindret plassering av en måler i dette området. For å få gode målinger over tid hadde det krevdes en værballong, noe som ikke var aktuelt.

Som kjent stiger varm luft, og varm luft kan holde på mer fuktighet enn kald luft. Derfor er det naturlig å tro at luften i dette området er varmere og har høyere fuktighet enn nede i produksjonssonen. Dannelse av tåken som beskrives er som følge av at luften er mett med fuktighet, og at noe fukt felles ut som vanndråper. Teoretisk sett skulle denne luften ha 100% luftfuktighet basert på dannelsen av tåke. Dette skiller seg fra målingene som ble gjort nede i produksjonsområdet, der ingen av målerne viste 100% fuktighet, tross nedbør i form av snø.

6.2 Forholdet mellom snøkvalitet etter egendefinert skala og andre variabler

Det første som bør kommenteres er forholdet mellom trendlinjene. Her er det tydelige avvik mellom linjene. 3 og 4 ringer har en stigende kurve, som sier at ved økende temperaturer synker snøkvaliteten. Dette stemmer meget godt over enes med funnene i litteraturstudiet. 2 ringer har også noe stigende kurve, men det er ikke like stor stigning som for 3 og 4 ringer. 1 ring har nesten ikke stigning i det hele tatt. Mellom snøkvalitet 3 og 4 skjærer linjene. Det tilsier at man kan produsere snø ved høyere temperaturer med 2 ringer enn med 1. Dette stemmer ikke, og som vi ser er R^2 verdien for denne også ekstremt lav. Det vil si at kurven er nærmest ubrukelig. Mest trolig kommer dette av mangel på målinger. For at trendlinjen til 1 ring skulle få større helning måtte det ha blitt registrert målinger i området mellom -4 og $-2^\circ\text{C } T_v$ og snøkvalitet 5-8. Under testingen var det ikke så stabilt høye temperaturer uten solpåvirkning at dette var mulig å teste.

Alternativt måtte målingene ha falt mellom -6 og $-8^\circ\text{C } T_v$ og kvalitet 1-3. Erfaringer fra testingen tilsier at målingene fra temperaturene det er snakk om ville gitt tilsvarende kvaliteter. Her er det mangel på testpunkter som setter begrensning for et tydeligere svar. Grunnen til dette er at etter Trondheim Bydrifts ønske om størst mulig produksjon, ble det ved kalde temperaturer prioritert å produsere mest mulig snø, i stedet for å teste få ringer og god kvalitet.

Ved å sammenlikne Tabell 8 og Figur 22 kan vi vurdere hvor godt funnene i denne oppgaven stemmer med hvordan produksjonen har blitt styrt tidligere. Generelt ligger målingene i fra denne

oppgaven noe høyere i temperatur enn det som har blitt brukt tidligere. Tabell 8 er oppgitt i lufttemperatur, mens Figur 22 er oppgitt i T_v . Dette gjør at forskjellene blir enda større enn det det ser ut som. Noe av dette kommer antagelig av at det bevisst har blitt produsert våt snø gjennom denne oppgaven. En annen ting som ikke er diskutert tidligere er vanntemperaturen. Gjennom hele testingen har temperaturen vært meget lav i forhold til normalen. Vanntemperaturen har ligget på omkring 2 °C. Tidligere har denne tidvis vært på over 5°C. Dette bidrar også til at snøkvaliteten blir bedre med det samme vannmengde.

En annen ting som bør nevnes er logging av tidspunkt for målingene. Tiden har blitt registrert når målebegeret har vært fullt og blitt tatt inn for veiing. Temperaturen og luftfuktigheten har blitt vurdert ut fra dette tidspunktet. Snøen har blitt produsert i en periode opp mot 30 minutter i forkant av dette. Noen avvik kan forekomme, som en konsekvens av dette. Grunnet små variasjoner i temperatur over tidsintervallene det er snakk om ble det antatt at målingene fra kun ett tidspunkt var gode nok, og at det ikke av nødvendig med et gjennomsnitt av hele perioden.

6.3 Luftfuktighet

Ettersom det er flere figurer og betraktninger om luftfuktigheten vil hver enkelt figur bli diskutert litt grundigere, med vurdering av feilkilder og andre omstendigheter.

En generell problematikk i forbindelse med luftfuktighet er at den varierer med temperaturen. Varm luft kan holde på mer fuktighet enn kald, og dermed blir den relative luftfuktigheten, som det her er snakk, om lavere. Disse variasjonene var meget tydelige på dager med sol. Dette har hatt noe innvirkning på målingene. Flere av dataene har tydelige variasjoner mellom dag og natt. Noe av dette har blitt løst ved å benytte målinger fra nattestid, da det ikke er sol. En annen løsning har vært å sammenlikne målingene med målinger fra andre målere, for å kunne se avvik.

6.3.1 Figur 23: Luftfuktighet i nedfallsområdet

Målingene gjennom nedfallsområdet gir en tydelig indikasjon på at det er en forhøyet luftfuktighet som følge av snøproduksjonen. Målinger på 50m hadde vært meget interessant, for å se om den stigende trenden mellom 10, 20 og 30m fortsatte eller om den hadde avtatt. Dette kunne sagt noe om størrelsen på området som har blitt påvirket.

Som nevnt under resultatene er de forholdsvis rette strekene mellom 10 og 30m et gjennomsnitt, grunnet mangel på data. Dette er ikke en helt optimal tilnærming, men test 6 inneholder resultater fra 20m. Ved å se på den er det ikke stort avvik fra den målte 20m og gjennomsnittet mellom 10 og 30m. Derfor vurderes denne tilnærmingen til å være innenfor rimelighetens grenser.

Andre avvik som bør nevnes er forholdet mellom 0m, Nord og Øst under referansen. På alle målingene med snøproduksjon er fuktigheten høyere i 0m enn den er på Nord. Slik er det ikke på målingene som ble tatt uten snøproduksjon. Her ligger Øst og Nord på hhv. 100% og 99%, mens 0m har 96%. Dette kan tyde på at det er en forhøyet luftfuktighet ved 0m under produksjon.

Det er et avvik på målepunkt Nord, i test 3. Dette er den eneste målingen der Nord har høyere fuktighet enn Øst. Hvordan vinden kan ha en innvirkning på dette vil bli vurdert senere.

6.3.2 Figur 24: Luftfuktighet i forskjellige avstander fra produksjonen

Ut fra resultatene i Figur 23 er det liten tvil om at snøproduksjonen gir en økt luftfuktighet gjennom nedfallsområdet. Målet med Figur 24 var ikke bare å vise dette, men også beskrive forholdene utenfor nedfallssonen. Testmetoden her var noe forskjellig fra testmetoden som ble benyttet tidligere. Grunnen til dette var at det var flere punkter som skulle måles enn det var tilgang på målere. Dermed måtte samme måler, måle flere punkter. Måten dette ble løst på var å lage et tidsskjema, som ble presentert i Tabell 11. Ved å holde seg til dette skjemaet og bruke en måler fastmontert på snøkanonen som referanse, ble området systematisk målt. Veldig varierende luftfuktighet kunne skape problemer for dette oppsettet, derfor ble det brukt en referanse. Målingene ved snøkanonen ville gi en indikasjon på hvor mye variasjon det var i luftfuktigheten i området i perioden. Denne var meget stabil. Det samme var målingene rundt om i nærheten. Det var ingen vind under disse målingene som kunne påvirke resultatene.

De to ulike målingene av luftfuktighet gir noe forskjellige resultater. Ved målinger gjennom nedfallsområdet ligger gjennomsnittet mellom 63% og 75%. Høyeste måling er 84%. Dette skiller seg mye fra målingene i nærliggende områder, der samtlige verdier ligger mellom 83% og 85%, og referansene er langt høyere. Målingene fra området utenfor nedfallsområdet ble tatt siste dagen med snøproduksjon, før det ble for varmt. Når det kommer varm luft inn over Trondheimsområdet vinterstid er denne som oftest fuktig og bringer med seg nedbør. Det kan virke som at denne lufta var i ferd med å innta anlegget, og at dette hadde en mye større innvirkning enn at produksjonen gikk.

Ved 80% luftfuktighet eller høyere har målerne en nøyaktighet på +/-5%, noe som er mye mer enn variasjonen av målingene. Dermed kan man anta at hele området hadde mer eller mindre lik luftfuktighet. Dette gir 2 mulige scenarier. Enten er det område som er påvirket av snøproduksjon større enn en radius på 50m, eller så er det en økt luftfuktighet i hele anlegget, som følge av væreskiftet, som påvirker målingene mer enn snøproduksjonen.

Som nevnt ble disse målingene tatt siste dagen med snøproduksjon. Det har derfor dessverre ikke vært mulig å samle inn flere dataserier. Flere målinger fra dette området ville antageligvis kunne gitt andre resultater, da vi legger forholdene under testingen av nedfallsområdet til grunn. Det er derfor vanskelig å si noe nøyaktig om hvor stort området som er påvirket av snøproduksjonen er ut fra disse dataene.

Målinger gjort med denne metoden vil være meget sentrale i videre arbeid. Gode målinger fra dette området vil gjøre det mulig å bestemme hvor stort område som er påvirket. Dette gir en indikasjon på hvor tett det er mulig å passere snøkanoner, uten at de har en negativ innvirkning på hverandre.

6.3.3 Figur 25: Oppstart av snøproduksjon i upåvirket anlegg

Figur 25 viser helt tydelig at det er en stigning i luftfuktigheten ved 30m når produksjonen starter. 10m har også noe stigning, men den kommer senere. Økningen det er snakk om er på omkring 30 prosentpoeng, så det er en vesentlig endring, som utgjør omkring $1^{\circ}\text{C } T_v$. Dette vil helt klart påvirke produksjonsforholdene. Noe som er verdt å merke seg er at det er en stor forskjell på fuktigheten inne i nedfallsområdet, og ved snøkanonen. Dette er et mye større avvik fra 0m til 30m enn det vi har sett i tidligere figurer.

Resultater som dette tilsier at det å plassere målere på snøkanonen kan gi ganske store avvik i forhold til der omdanningen fra vann til snø foregår. Det at variasjonene er så store, og stiger og synker i takt kan tyde på at det er noe som påvirker alle målerne, men som ikke avhenger av

produksjonen, ettersom den har vært stabil på maks hele perioden. Dette vil bli vurdert videre i kapittel 6.5 Vind.

6.3.4 Figur 26: Kort stans i produksjonen etter lang kontinuerlig produksjon

I hele perioden som vises er det noen variasjoner, men ingen av de ser ut til å inntreffe i forbindelse med stansen. Det kan se ut som at 30m faller noe, men det er ikke mer enn den har gjort både tidligere og senere i perioden. Det er derfor naturlig å tenke at 15minutter ikke er tilstrekkelig tid for å få utlufting av påvirket luft fra anlegget. Ut fra Figur 25, kan det se ut som at luftfuktigheten stiger meget raskt ved produksjonsstart. Denne utviklingen ser vi ikke her, og det kan tenkes at det er raskere å tilføre energi til lufta, enn det er å fjerne den. Dette er et funn som er viktig med tanke på å unngå metning av lufta, da det vil ta lang tid å avfukte lufta etter en metning.

En annen ting å legge merke til er den store variasjonen som er i målingene. Det er variasjoner på opp mot 20 prosentpoeng på under 5 minutter, men med en nøyaktighet på +/-5% (ved fuktighet over 80%), kan målefeil være en del av årsaken. Små endringer i vind kan også være en mulig kilde til variasjonene.

6.4 Temperatur

Målingene av temperatur har en rekke feilkilder. Den største er påvirkning av sol. Ettersom det er noe skygge og noen solpartier i produksjonssonen vil disse påvirke ulikt ettersom solen flytter seg over himmelen. Derfor er det ikke sikkert alle målerne er direkte sammenliknbare i periodene midt på dagen. Denne problematikken kan løses ved å bruke målinger om natta. Derfor ble 2 av testene utelatt fra Figur 28. Uten de to målingene som var mye påvirket av sol ble grafen nesten vannrett. Dette vil si at det ikke er noen temperaturforskjeller å spore gjennom nedfallssonen.

(Berg, 2016) fastslår også at det er meget store temperaturforskjeller innad i anlegget, og dette varierer med høyden. Målerne ble også etter hvert stående i forskjellige høyder som følge av at snøhaugen ble større og høyere. Dette kan også gi utsalg i den størrelsesorden som det er snakk om her.

Med så store mengder vann, som holder varmegrader, som blir sprutet ut i luften er dette noe overraskende. Det må nevnes at varm luft stiger, og den kalde synker. Alle målere sitter på bakkenivå, så det kan tenkes at dette er grunnen til at det ikke er noen sporbar temperaturendring på disse målerne. En annen forklaring kan være overgangsenergien ved fordampning. Det kreves veldig mye større mengder energi for å fordampe vann enn det gjør for å kjøle det ned. En økning i fuktighet er påvist, det er derfor naturlig å tenke at overgangsenergien som blir frigjort i denne fordampningen bidrar til å holde temperaturen uendret.

6.5 Vind

Vinden har vært varierende gjennom hele perioden med snøproduksjon. Det har derfor vært mange ulike vindforhold, som har gitt ulik påvirkning. En ting som er helt klart er at vinden påvirker luftfuktigheten. Ettersom det ble funnet liten påvirkning av temperaturen fra snøproduksjonen har den blitt utelatt fra analysene om vind. Derfor vil denne diskusjonen utelukkende handle om luftfuktighet.

6.5.1 Figur 29: Luftfuktighet og vindhastighet ved oppstart av produksjon

Den klareste indikasjonen på påvirkning finnes i Figur 29. Denne figuren viser vindhastighet og luftfuktigheten i flere punkter i anlegget, over en lengre periode. Her er det en klar sammenheng mellom vinden og luftfuktigheten. I perioder med lite vind er det tydelig at luftfuktigheten stiger, og når vinden tar til igjen synker luftfuktigheten tilbake til nivået det var tidligere. Et lite unntak fra dette er måleren midt inne i nedfallssonen. Denne har noe av den samme tendensen, men målingene er mye mer stabilt høye her. Dette kan tyde på at luftfuktigheten inne i nedfallsområdet er ganske stabil uavhengig av vind.

Fra klokken 18 til 02 gikk produksjonen for fullt, nede i snølageret, og det var produksjon i andre deler av anlegget. Luftfuktigheten utenfor nedfallsområdet holder seg likevel stabil på omkring 50% i hele perioden. Det er et lite unntak rundt kl. 21, da vinden løyer og fuktigheten stiger. Denne perioden varer i omkring 1 time, før vinden tiltar og fuktigheten synker igjen.

Etter kl. 02 er det større variasjoner for hver enkelt måler, og mellom målerne. Der er en relativt lang periode uten vind. Om stiger veldig raskt, mens Nord og Vest stiger noe saktere. Dette kan tyde på at de ikke er så kraftig påvirket av snøproduksjonen. Ettersom det var produksjon i store deler av anlegget er det sannsynlig at denne produksjonen påvirker målingene på Vest.

Som vindmålingene viser var det hovedsakelig vind fra sør under hele perioden. Derfor er det naturlig å tenke at vinden blåser fuktigheten skapt av snøproduksjonen vekk fra 0m, som sitter sør for nedfallsområdet, og da vinden løyer vil fuktigheten spre seg mer jevnt i alle retninger. Dette stemmer godt overens med målingene.

En ting som ikke stemmer like godt i denne sammenhengen er at målepunktet Nord ligger nord for produksjonen, og dermed burde vi her kunne se en økning i fuktighet med vinden, ettersom fuktigheten antas blåst fra produksjonen. Det gjør vi imidlertid ikke. Dette kan tyde på at den påvirkede sonen fra snøproduksjonen ikke rekker helt bort til punktet Nord. Denne måleserien ble tatt i det snøproduksjonen startet etter en lengre stans. Det kan derfor være at lufta i området kan absorbere mye energi, uten at dette nødvendigvis blir flyttet til andre målere. Derfor er det interessant å se om dette forholdet er det samme utover i produksjonsperioden, da det er mulig at luften er mer mettet med energi.

6.5.2 Tabell 13: Sammenlikning av testserier og vindretning og -hastighet

For å finne en god forklaring på avviket i test 3 Figur 23: Luftfuktighet i nedfallsområdet, må vinden for alle de forskjellige testene vurderes. Ut fra målingene er det 6 ulike tilfeller av vind. Test 3, som det er snakk om her har 0,19m/s og 173°, noe som tilsvarer svak sydlig vind. Her kan det virke sannsynlig at vinden har ført med seg luftfuktighet fra produksjonen og mot måler Nord. Hva skiller så denne testserien fra de andre? Den som skiller seg mest ut er test 4. Her er det 0,46m/s med 0°, altså nordavind. Denne perioden er tatt fortløpende etter test 3, og her er har Nord en mye lavere fuktighet. Dette er nok et godt tegn på at vinden kan føre fuktigheten til andre målere. Ønskelig burde det i denne perioden vært en økning i øst, men det er det ikke. Årsaken kan være at det er lengre fra produksjonen til Nord enn det er til øst.

Test 6 har 0,01m/s, altså vindstille. En ting som er verdt å merke seg her er at det er meget liten spredning mellom målingene. Det tyder på at når det er vindstille blir det små forskjeller mellom punktene. Test 5 viser 0,35m/s fra øst-sørøst. Denne retningen fører ikke fuktigheten til andre målere, og målingene er derfor ganske like som når det er vindstille.

Test 1 har sørlig vind som test 3, som er mest aktuell. Forskjellen her er at test 1 er med en gang produksjonen startet, så det er antagelig vis mye mindre fuktighet i anlegget, og det er mye kraftigere vind. En antagelse er at ved mye vind vil fuktigheten blåse bort, i stedet for å flytte seg litt i en retning. En annen ting som kan observeres er at 0m er meget lav. Det kan tyde på at fuktigheten hindres fra å påvirke denne måleren, som ligger sør for nedfallet.

Test 2 har 0,42m/s vind fra sørvest. Også denne testen ble tatt tidlig i produksjonen, og det er stor forskjell på 0m og 30m. Dette kan tyde på at vinden har en sterkere innvirkning på punkter som ligger utenfor nedfallssonen enn de som ligger i nedfallet.

6.5.3 Figur 32: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 1

Ut fra tidligere resultater kan det virke som at vinden har stor innvirkning på målere i nærheten av snøproduksjonen. Det er klare svingninger, som stemmer godt over ens med vinden. I Figur 29 kan det se ut som at det er store forskjeller mellom nedfallsområdet og områdene rundt. Dette blir litt mer normalisert i Figur 32, da det er en lengre periode. Sett hele perioden under ett følger fuktigheten i de ulike målepunktene hverandre godt. Generelt er 30m høyere enn resten, men dette samsvarer godt med Figur 23. Dermed kan det virke som at vinden reduserer fuktigheten i hele området uten at det nødvendig vis blir større forskjeller mellom nedfallsområdet, og området rundt, slik Figur 29 indikerer.

Hvis man tar ut perioden med lav luftfuktighet midt på dagen 09.02.2017 er den meget stabil etter dag 1. Avviket er 10.02.2017. Her er det mye vind, og luftfuktigheten synker. Dette skjer gjennomgående i hele anlegget, og det er tydelig at 30m er høyere enn Nord, så antagelig vis er det en påvirkning av snøproduksjonen også her. I denne perioden er det ved måler Sør oppdaget lav luftfuktighet og en del vind fra sør. Dette tyder på at grunnen til fallet i luftfuktighet er at tør luft kommer inn i anlegget fra sør.

Ved undersøkelser av vindretning er det vind fra sør som skaper denne forandringen. Ut fra funnene fra 6.5.2 Tabell 13: Sammenlikning av testserier og vindretning og -hastighet skulle det være naturlig å tenke at i denne perioden var det en økt fuktighet i målepunktet Nord. Dette stemmer derimot ikke. Dette kan tyde på at litt vind vil kunne flytte området som blir påvirket av snøproduksjonen i vindretningen, men hvis vinden overskrider et visst nivå, vil fuktigheten blåse bort i stedet for å bli forskjøvet, og hele området får fuktigheten til lufta som kommer inn. At luftfuktigheten er omtrent den samme på begge sider av snøproduksjonen ved mye vind er en god indikasjon på dette.

6.5.4 Figur 33: Luftfuktighet og vind for hele produksjonsperiode 2

Her er det også en veldig stabil luftfuktighet. Unntaket er et fall midt på dagen 08.03.2017. Dette kommer mest sannsynlig av at sola har påvirket målerne, slik at denne har en falskt høy temperatur, og dermed blir den relative luftfuktigheten feil.



Figur 34: Værstasjon Nord montert i tre etter kraftig snøfall

En ting som også bør nevnes i forbindelse med målingene i andre periode er værstasjon Nord. Til å begynne med var denne plassert i et tre. Ved montering var dette treet rett og fint, og virket stødig. Etter et kraftig snøfall gav treet etter, og ble hengende. Dette førte til at vindmåleren ble hengende skjevt, slik som Figur 34 viser. Antagelig har dette hatt en innvirkning på vindmålingene, spesielt retningen. Hastigheten har blitt antatt å fungere som den skal, men retningen har gitt noen feil data, hovedsakelig ved lave vindhastigheter. Dette ble utbedret kvelden 03.08.2017 ved å sette måleren på stativ, slik som alle andre.

6.6 Oppsummering av vurderingene, og betraktninger om optimal produksjon av snø.

Ved produksjon av snø er det mest naturlig å plassere målutstyret og kontrollenheten på snøkanonen. Derfor er 0m det punktet som er mest relevant å ta utgangspunkt i. Temperaturen for 0m viste seg å være veldig lik temperaturen i nedfallsområdet, og i omkringliggende punkter. Temperaturen kan derfor regnes som upåvirket av snøproduksjonen. Dette gjør at temperaturen kan måles ved produksjonsenheten og brukes uten å kompensere for påvirkning.

Det er en tydelig forhøyet luftfuktighet inne i produksjonsområdet, som følge av produksjonen. Denne økningen er 10 prosentpoeng fra 0m. Tabell 1 viser at en slik økning i luftfuktighet utgjør en økning på mellom 0,5 °C og 1°C T_v . Likevel er ikke dette noe som må tas hensyn til i reguleringen, da forholdet mellom T_v og snøkvalitet etter egendefinert skala ble utviklet for våtkuletemperaturen i 0m.

Områdene rundt snøproduksjonen har heller ikke vist noen forhøyet luftfuktighet, selv om mye tyder på at 0m har noe høyere verdier enn normalt. Dette strider mot hypotesene og observasjonene om at anlegget har gått i metning tidligere. Under testingen har det hovedsakelig blitt produsert med to

kanoner, som hver har en kapasitet på $29,5\text{m}^3$ vann/time. Det vil si at 19% av anleggets kapasitet på 350m^3 /time har blitt utnyttet. Ved en større produksjon kan det være at disse forholdene inntreffer, selv om det ikke er observert i denne oppgaven

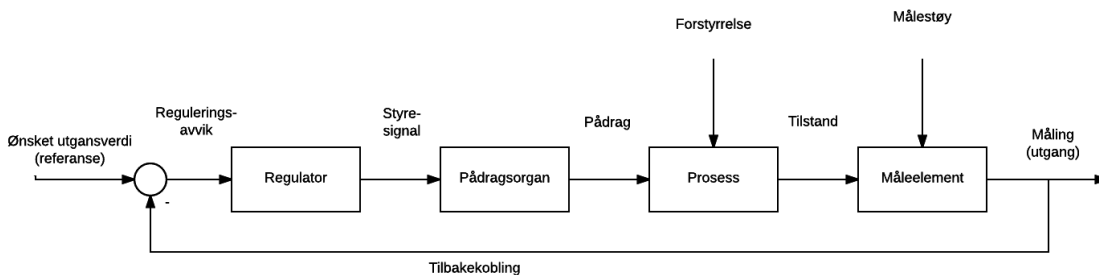
Målingene viser at det ikke blir større avvik mellom 0m og nedfallsområdet ved økende vind. Luftfuktigheten for hele anlegget kan synke noe ved vind, dette gjelder også for nedfallsområdet. Derfor vil det ikke være nødvendig å kompensere for verken vind eller økt fuktighet i styringen. Det er observert et avvik fra dette ved oppstart av anlegget med mye vind, men det ser ut til å være et spesialtilfelle og utjevner seg på under 12 timer. I dette tilfellet er det en forskjell mellom 0m og 30m på omtrent 30 prosentpoeng. Dette er 20 prosentpoeng mer enn det som er forventet ut fra Figur 23. Ved å Bruke Tabell 1 kan dette avviket omregnes til $1^\circ\text{C } T_v$. Ser vi på Tabell 12 vil en endring på $1^\circ\text{C } T_v$ i verste fall kunne gi en endring i snøkvalitet på ett trin, men i mange tilfeller vil det ikke bli en stor nok endring til å gi utslag på snøkvalitetsskalaen. Dermed vil ikke et slik avvik påvirke produksjonen nevneverdig.

Test 3 i Figur 23 viser at det er en forhøyet luftfuktighet på en av referansene, ved en spesiell vindretning. Likevel er det den eneste indikasjonen på at vinden kan føre med seg luftfuktighet til andre målere. Ved en automatisering av snøkanonene vil hver enkelt kanon bli utstyrt med en værstasjon, og kan dermed oppdage en slik økning og kompensere for den.

7 Utvikling av en algoritme for optimal snøproduksjon med flere kanoner

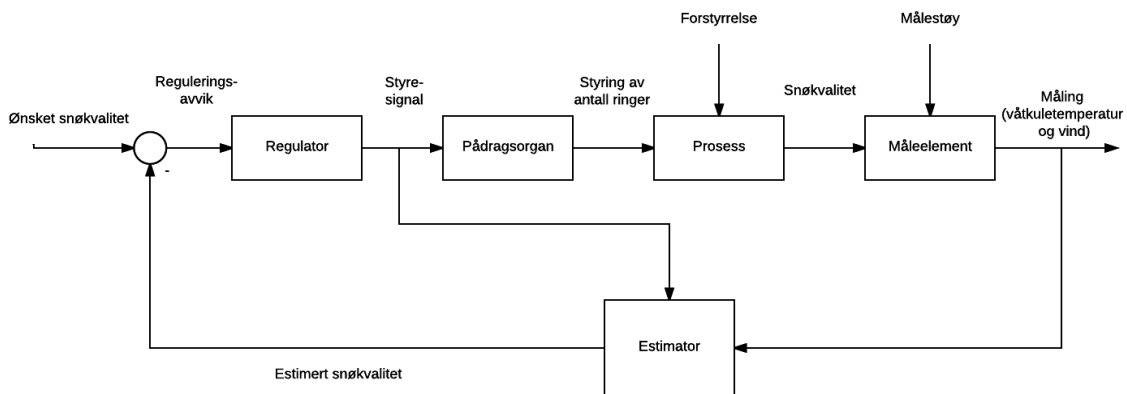
7.1 Reguleringssteknikk

Ettersom denne oppgaven retter seg mot et publikum som ikke nødvendigvis er kjent med reguleringssteknikk vil det bli en kort innledning til regulering, og utfordringer for denne oppgaven med tanke på regulering.



Figur 35: Tilbakekoblet reguleringsløyfe

Figur 35 viser en klassisk tilbakekoblet løyfe, hvor ønsket verdi blir sammenliknet med målt verdi fra måleelementet. Regulatoren gjør dette avviket om til et styresignal, som styrer pådragsorganet. Dette pådraget vil føre prosessen mot den ønskede tilstanden. Ny måling blir tatt og reguleringen fortsetter kontinuerlig. Dette fungerer fint i prosesser der tilstanden kan måles direkte, slik som cruise control i biler, der hastigheten er tilstanden, måling og referanse. Dette er ikke tilfellet med snøproduksjon, hvor snøkvaliteten er tilstanden. Denne kan ikke måles direkte, men må estimeres ut fra gitte parametere.



Figur 36: Tilbakekoblet reguleringsløyfe med estimator til bruk i snøkanon

Figur 36 viser hvordan reguleringen løses for denne oppgaven. Ettersom snøkvaliteten ikke kan måles direkte, måles Lufttemperatur, luftfuktighet, vanntemperatur, vindhastighet og vindretning. I kombinasjon med styresignalet, som er antall ringer som skal være aktive estimeres snøkvaliteten ut fra Tabell 12. Den estimerte snøkvaliteten brukes i en tilbakekobling, og reguleringen foregår på samme måte som beskrevet tidligere.

7.2 Optimal snøproduksjon med en kanon

Her beskrives hvordan en kanon bør utstyres med måleutstyr, og hvordan målinger fra det utstyret bør brukes til styring.

7.2.1 Oppsettet for snøkanonen

For å kunne regulere må man ha målinger å regulere etter. Den beste løsningen for dette er å montere en måler direkte på snøkanonen. En værstasjon på linje med de som har blitt benyttet i denne oppgaven er et godt alternativ. Ut fra funnene i denne oppgaven er det bare nødvendig med luftfuktighet og lufttemperatur. Vindmålinger kan også være en fordel å ha med, hvis algoritmen i ettertid skal utvikles for å kompensere for forskyvning av nedfallsområdet som følge av vind.

Pådraget som styrer snøproduksjonen er mengde vann som passerer gjennom kanonen. Slik kanonen fungerer nå er det en stoppekran for hver enkelt ring med dyser. Disse kranene har tappefunksjon og er satt sammen til en større enhet. Det enkleste for en styring vil derfor være å erstatte det manuelle håndtaket med en roterende motor. Med en motor for hver enkelt av ventilene kan hver av de styres individuelt. Kanonen er utstyrt med både kompressor og elektrisitet, så motoren kan velges enten elektrisk eller pneumatisk.

En annen mulighet for styring er å justere vanntrykket på kanonen. Ved montering av en strupeventil på vanninntaket til kanonen kan den justeres trinnløst. Fordelene med dette er mer nøyaktig styring, som kan bedre takle marginale forhold. Økningen i vannmengde på 100% fra en til to ringer kan også reduseres. Her kan man tenke seg at alle kranene settes åpne og det monteres en stupeventil på vanninntaket til kanonen, eller at stupeventilen kommer som en tilleggsmulighet til reguleringen foreslått over. For å kunne regulere produksjonen med vanntrykket er det behov for en enda mer nøyaktig sammenheng mellom temperatur, snøkvalitet og vannmengde. Tabell 12 vil bli for grov for en slik styring.

Vanntemperatur er også en viktig faktor. Den har ikke blitt vurdert i denne oppgaven, grunnet mangel på variasjon i målingene. Det er ulike måter som kan fungere for måling av vanntemperatur. Ett alternativ vil være å måle sentralt, sende disse målingene ut til hver enkelt kanon. Dette systemet baserer seg på antagelsen om at vanntemperaturen vil endres lite rundt i rørnettverket. Dette systemet forutsetter at alle kanonene kan kommunisere med en sentral enhet. En annen mulighet er at hver enkelt kanon utstyres med en måling for vanntemperatur. Dette fører til at kanonene ikke trenger å kommunisere med hverandre eller en sentral. For en optimal styring med flere enheter er det likevel nødvendig at enhetene kommuniserer.

7.2.2 Styring av snøkanonen

Ved styring av en enkelt kanon er det ut fra funnene her ingen fare for at området kan bli mettet med energi. Derfor vil det ikke være behov for å styre kanonen etter annet enn lokal T_v og vanntemperatur. Det har blitt oppdaget at ved vind vil luftfuktigheten synke noe, men denne endringen gjelder for både nedfallsområdet og kanonen. Derfor vil det ved å plassere en måler på kanonen være mulig å regulere snøproduksjonen uten andre variabler enn vannmengde, vanntemperatur og T_v .

Estimatoren blir en av de viktigste komponentene i styringen av systemet. Denne vil basere seg på Tabell 12. T_v fra værstasjonen, vanntemperaturen og hvor mange ringer som er aktive fra styringsenheten er innganger til estimatoren, og dermed kan snøkvaliteten estimeres. Avviket

mellom ønsket snøkvalitet og estimert snøkvalitet blir inngangen til regulatoren. Hvis kvaliteten er lavere enn ønsket må antall ringer reduseres, og hvis den er høyere må antall ringer økes.

Ved andre vanntemperaturer enn vi har hatt her blir det noe mer komplisert med styringen. Her er det flere muligheter. Ett alternativ er å utvikle flere tabeller, som Tabell 12: Forhold mellom T_v , antall ringer og snøkvalitet Tabell 12, for ulike vanntemperaturer. En annen mulighet er å finne ut hvor mye en endring i vanntemperatur utgjør for forholdet mellom T_v og snøkvalitet. Eksempelvis kan avviket fra vanntemperaturen målt her (2°C) og faktisk vanntemperatur brukes sammen med skaleringsfaktor.

$$T_{v\text{Estimator}} = T_v + ((\text{vanntemp} - 2^{\circ}\text{C}) * \text{skaleringsfaktor})$$

$T_{v\text{Estimator}}$ vil da være temperaturen benyttet av estimatoren for oppslag i Tabell 12. For at de metodene nevnt ovenfor skal kunne benyttes trengs det flere målinger av snøkvalitet og T_v ved ulike vanntemperaturer.

Andre ting som har betydning for algoritmen er hvor ofte målinger og regulering finner sted. Det er ikke observert veldig raske svingninger, så en regulering hvert 30. sekund vil være tilstrekkelig.

7.3 Optimal snøproduksjon med et nettverk av kanoner

Observasjonene tilsier at det ikke er noen tydelig påvirkning fra en snøkanon til området rundt, så lenge det ikke er overlappende nedfallsområder. Bedre målinger i området rundt kunne gitt en enda bedre klarhet i dette. Det er likevel observert en forhøyet fuktighet inne i nedfallsområdet, og ved produksjonsenheten. Hvis vi hadde plassert mange nedfallsområder tett i tett ville vi hatt en økt fuktighet over hele området. Derfor kan det ikke utelukkes at produksjon med flere kanoner kan gi en påvirkning på hverandre, selv om det ikke har blitt målt her.



Figur 37: Sky over snøproduksjon. Foto: Ole P. Tangnæs, Trysilfjell Hytter

Under snøproduksjon er det vanlig å se en skyliknende formasjon stige opp fra produksjonsområdet, som vist i Figur 37. Som nevnt tidligere har det ikke vært foretatt målinger av denne skyen, men det

antas at luftfuktigheten her er 100%. Dette kan være årsaken til at anlegget kan gå i metning ved stor produksjon. Selv om nedfallsområdene ikke overlapper vil disse skyene kunne dannes over hele produksjonsområdet. Dermed kan skyene fra hver produksjonsenhet påvirke skyene til de andre kanonene. Hvis en slik sky vokser til over anlegget er det naturlig å anta at dette påvirker snøproduksjonen. Her trengs grundigere undersøkelser, både med tanke på målere plassert i en høyde over bakken, og med større produksjon i anlegget.

Det er ikke påvist noen påvirkning mellom kanonene i denne oppgaven. Det enkleste for styringen av et nettverk av kanoner vil være å la hver kanon være individuell i henhold til oppsettet beskrevet ovenfor. Ved å ha en værstasjon på hver kanon vil den kunne oppdage endringer i luftfuktigheten og justere produksjonsmengden etter dette. Om disse endringene kommer fra omkringliggende snøkanoner eller er lokale endringer i været, vil ikke kanonen forholde seg til. Denne måten å sette opp systemet vil fungere godt, da hver enkelt kanon justeres etter de lokale forholdene. Det er viktig å påpeke at dette ikke er noen optimal styring av nettverket, da det ikke er sikkert at dette er metoden som totalt sett gir mest eller best snø.

For å kunne gjøre styringen av flere kanoner mer optimal trengs det grundigere undersøkelser av forholdene i anlegget. Hvis vi følger tanken om at ved å plassere snøkanoner så tett at nedfallsområdene dekker mesteparten av anlegget, vil vi ha et stort påvirket område. Her er det ikke mulig å få tilført upåvirket luft fra sidene, ettersom kanonen ved siden av har påvirket denne lufta. Dette kan være begynnelsen på en metning av anlegget. Det er påvist i denne oppgaven at vind vil gi en noe redusert luftfuktighet. Dermed vil det være sannsynlig at vind vil kunne gi en økt total produksjonsmengde for hele anlegget. Ved å vurdere anlegget på en slik måte kan et produksjonspotensial for hele anlegget basert på vind bestemmes. Dermed kan det tenkes at for en gitt vindhastighet og retning har anlegget et høyere produksjonspotensial en ved vindstille. Hvis et slik potensial kan avdekkes kan produksjonen optimaliseres ut fra dette. Ved å vurdere hvor i anlegget denne snøen bør produseres og hvor mye som kan produseres uten at anlegget mettes.

Ved en tilnærming som beskrevet ovenfor er det snakk om en optimal produksjon. Det er likevel en lang vei fra denne oppgaven til å kunne styre anlegget på en slik måte. Hovedsakelig er det forståelsen av hva som skjer ved metning av anlegget, og hvordan mange kanoner på et lite område påvirker hverandre som mangler.

8 Konklusjon

Målingene viser at det er noe påvirkning av snøproduksjonen, men ikke så mye som antatt.

Temperaturen er, som vist i Figur 28 upåvirket av snøproduksjonen. Luftfuktigheten har en stigning på 10 prosentpoeng i nedfallsområdet, men områdene i nærheten virker å være lite påvirket. Vind kan endre luftfuktigheten i hele anlegget, men forholdet mellom T_v i nedfallsområdet og T_v utenfor nedfallsområdet holder seg tilnærmet konstant.

Med utgangspunkt i målinger av T_v ved produksjonsenheter og snøkvalitet i nedfallsområdet har forholdet mellom snøkvalitet, våtkuletemperatur og antall ringer/produksjonsmengde for en vannetemperatur på 2°C blitt utviklet. Dette forholdet kan sees i Tabell 14

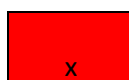
Tabell 14: Forhold mellom T_v , antall ringer og snøkvalitet

Tv	Snøkvalitet							
	1	2	3	4	5	6	7	8
-2	x	x	x	x	x	x	x	1
-3	x	x	x	x	x	x	1	2
-4	x	x	x	x	1	1	2	2
-5	x	x	x	1	1	2	2	3
-6	x	x	1	1	2	2	3	3
-7	x	1	1	2	2	3	3	3
-8	1	1	2	2	3	3	3	4
-9	1	2	2	3	3	3	4	4
-10	2	2	2	3	3	4	4	4
-11	2	2	3	3	4	4	4	4
-12	2	3	3	4	4	4	4	4
-13	3	3	4	4	4	4	4	4

Ringer:



Kan ikke produsere:



En enkelt snøkanon kan automatiseres ut fra Tabell 12 Tabell 14, og det er ikke behov for å kompensere for vind eller andre utenforliggende faktorer, så lenge kanonen er utstyrt med målinger for luft- og vann-temperatur og luftfuktighet.

Det er oppdaget en forhøyet luftfuktighet i nedfallsområdet, men ikke i områdene rundt. Dermed vil en kanon kunne fungere problemfritt alene, men ved flere enheter og flere nedfallsområder i nærheten av hverandre kan det bli en påvirkning mellom kanonene. Ved å utstyre hver enkelt kanon med en værstasjon kan slike lokale påvirkninger tas hensyn til. Dette er likevel ikke en optimal løsning, da det ikke er gitt at denne metoden gir mest/best snø.

For å finne en metode som tar hensyn til hvordan kanonene påvirker hverandre trengs det flere målinger av områder med høyre produksjonsmengde, og flere produksjonsenheter.

9 Videre arbeid

-Implementere og verifisere algoritmen

Det har i denne oppgaven bare blitt foreslått hvordan en algoritme for snøproduksjon bør se ut. Det mest naturlige å arbeide med videre er å implementere denne algoritmen, i et kjørbart system. Deretter kan hele systemet verifiseres, når forholdene tillater dette.

-Undersøke hvordan sammenhengene er ytterligere

I denne oppgaven har alle målingene vært med 2 viftekanoner, i relativ isolasjon fra andre produksjonsenheter. Ved å måle andre steder i anlegget, der det produseres med mange laser tett i tett kan det være at påvirkningen mellom enhetene er større og lettere å oppdage.

-Undersøke hva vanntemperaturen betyr for snøkvaliteten

Som nevnt har ikke vanntemperaturen vært mulig å teste i denne oppgaven, ettersom den har vært tilnærmet konstant hele tiden. Derfor bør slike tester som har blitt gjort i denne oppgaven også gjøres med andre, mindre gunstige vanntemperaturer. Dermed kan vanntemperatur tas med i algoritmen, slik at det blir kompensert for.

-Undersøke hvordan ting endrer seg oppover i høyden.

Alle målere i denne oppgaven har vært plassert på bakkeplan. Det kan være at forholdene for dannelse av snø er annerledes høyere opp. Det er derfor interessant å se hvordan forholdene er lengre opp i luften. Det blir observert skyer skapt av produksjonen over produksjonsområdet. Vil størrelsen og høyden på denne skyen påvirke snøproduksjonen? Kan det være at forholdene blir bedre eller dårligere for snøproduksjon høyere opp, slik at fallhøyden bør vurderes.

-Testing av fallhøyde opp mot vind, og nedfallsområde og kompensere for dette.

Teorien tilsier at en lengre fallhøyde skal gi bedre snøkvalitet eller større produksjonspotensiale for en gitt T_v . Det som derimot tilsier at større fallhøyde ikke er gunstig er avdrift i form av vind. Finnes det her en optimal høyde for snøproduksjon, eller er det mulig justere både fallhøyde og nedfallsområdet avhengig av vind. Dette vil si at snøkanonen justerer kaste høyde og vinkel ut fra vind og et forhåndsvalgt nedfallsområde.

-Finne skjæringspunkt mellom gunstig vind og for høyt svinn.

Uten kompensasjon for vindretningen er det et markant svinn ved store vindhastigheter. Finnes det et skjæringspunkt der det ikke lenger er lønnsomt å produsere snø?

-Utvikle et produksjonspotensial for Granåsen basert på vind.

Ut fra funnene i denne oppgaven er det helt tydelig at vinden vil sirkulere luften i en litt større skala utenfor nedfallsområdet. I tillegg er det kjent at området har vært utsatt for metning av fuktighet under snøproduksjon. Derfor er det interessant å vurdere hvor stort produksjonspotensialet for hele anlegget er basert på vind. Vil en tett bris kunne øke den maksimale snøproduksjonen for anlegget?

-Snøkvalitet kan her justeres ganske nøyaktig. Er det hensiktsmessig å gjøre det? Bør snøen produseres våt, og lagres, for å få størst mulig produksjon?

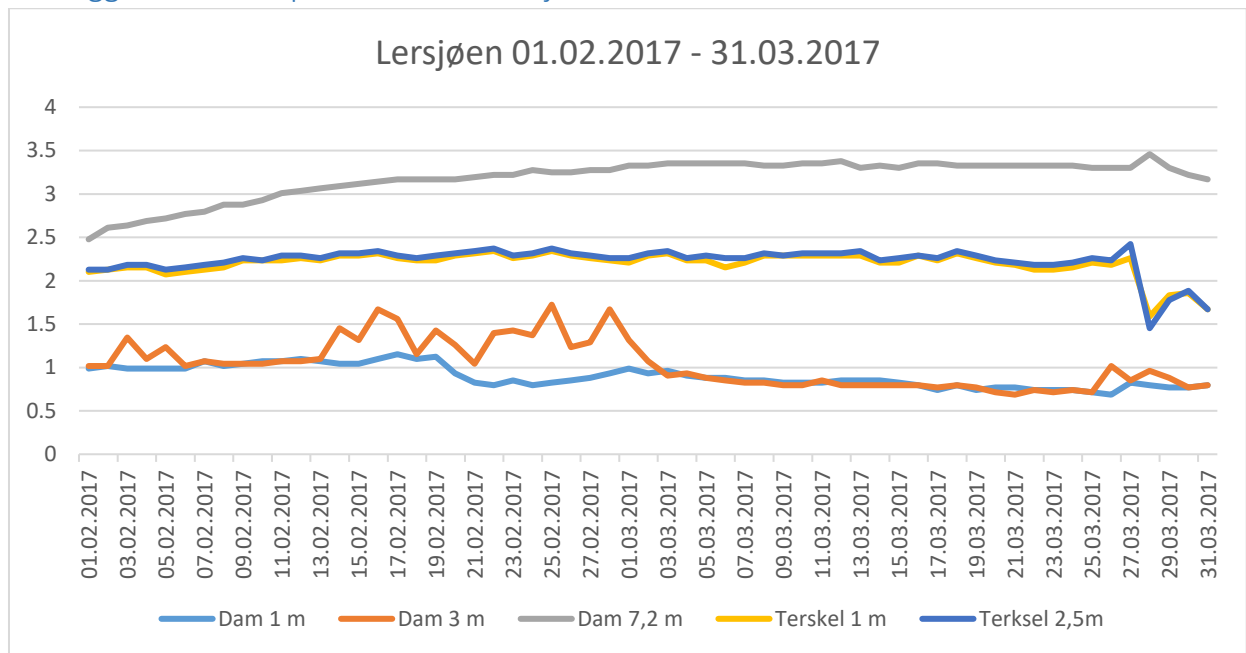
Ønsket er å produsere mest mulig snø på kortest mulig tid. Vil det derfor være mest hensiktsmessig å produsere snøen våt, og la den ligge noen dager for å tørke. Kanskje dette er det mest miljømessige, med tanke på at snøkanonen trekker like mye strøm uavhengig av produksjonsmengden, men det tar da noen dager før snøen kan brukes. Her er det mange avveiiinger som må tas med, men det kan føre fram til å finne den raskeste veien til å produsere den mengden så som må til.

Referanseliste

- Norgeskart [Online]. Available: norgeskart.no [Accessed 18.12 2016].
- BELLIS, M. 2016. *Who invented the snowmaking machine?* [Online]. Available: <http://inventors.about.com/od/famousinventions/fl/Who-Invented-the-Snowmaking-Machine.htm> [Accessed].
- BERG, O. E. H. 2016. *Utvikling av værkart for Granåsenområdet med tanke på snøproduksjon*. NTNU.
- CHEN, J. & KEVORKIAN, V. 1971. Heat and Mass Transfer in Making Artificial Snow. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 10, 75-78.
- EKLIMA. 2016. Available: ekima.met.no [Accessed].
- ENVIROWERE 2007. Plot a wind rose in Excel.
- FAUVE, M., RHYNER, H. & SCHNEEBELI, M. 2002. *Preparation and maintenance of pistes*.
- GJERLAND, M. & OLSEN, G. Ø. 2014. Snøproduksjon og snøpreparering.
- GRAHAM, J., JOHNSTON, W. A. & NICHOLSON, F. J. 1993. Ice in fisheries.
- INDUSTRIES, R. 2015. *Snowmaking 101* [Online]. Available: <http://www.ratnik.com/snowmaking.html> [Accessed].
- KATAYAMA, M. 2000. *Snow producing system in which meltwater is reused*.
- LIPPESTAD, H. 2009. "vannvittig" tungt- og suøerlett [Online]. Yr.no. Available: <http://www.yr.no/artikkel/sa-tung-er-snoen-1.6346988> [Accessed 2017].
- LORTENTZEN, G. 2015. Isproduksjon.
- NERSKÅ, P. 2017. Skal redde skisporten – i plussgrader.
- PROSJEKTSØKNAD 2016. Prosjektsøknad Snow for the Future - Fase I.
- RIAZ, W. 2014. Her er barnehagen som lager sin egen kanonvinter. *Aftenposten*.
- SCHLAUPITZ, H. 2014. *Klimaendringer i Norge* [Online]. Available: http://naturvernforbundet.no/cparticleid_16032/ [Accessed 14.10.2016].
- SNOWATHOME Wet-bulb temperature chart.
- SNOWMAKERS. 2014. *SMI at Rosa Khutor* [Online]. Available: <http://www.snowmakers.com/rosa-khutor.html> [Accessed].
- SNOWMAKERS, S. Snowmaking Basics.
- SNOWTEC. 2017. *SnowTec* [Online]. Available: <https://www.allweathersnowtek.com/> [Accessed].
- STULL, R. 2011. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2267-2269.
- SUNDBY, T. 2015. Strøkne Løyper på Liermoen *Glåmdalen*.
- SVENSSON, H. 2011. Lenko oppköpt av italienskt storföretag. *Östersunds posten*.
- TECHNOALPIN. *Snow facotry* [Online]. Available: <https://www.technoalpin.com/smc/22c5f2d7a480f43780072aa124f4c9083ecb9de3.pdf> [Accessed].
- TECHNOLOGIES, I. 2013. *Vacuum Ice Make (VIM)* [Online]. Available: <http://www.ide-snowmaker.com/vacuum-ice-maker-vim/> [Accessed].
- VAGLE, B. H. 2016. *Utilization of surplus heat from snow producing machines*. Master, NTNU.

Vedlegg

Vedlegg 1: Vanntemperaturer for Leirsjøen



Vedlegg 2: Driftslogg Snøproduksjon 2017

Driftslogg				
Dato	Tid (start)	Tid(stopp)	Temp.	Kommentar
07.02.2017	08:35		-7.0	Forberede oppstart snølagring
07.02.2017	13:30		-3.5	Oppstart Langrenn
07.02.2017	15:00		-7.0	Forberede oppstart sprintløype øvre del
07.02.2017	16:50		-8.0	39m3 pr. time langrenn, lufttemp. Kompressor: +5
07.02.2017	21:30		-9.1	
07.02.2017			-8.5	40m3 Langrenn
08.02.2017			-10.0	50m3 Langrenn
08.02.2017	04:30		-13.5	K1 D430
08.02.2017	07:00		-12.5	50m3 Langrenn
08.02.2017	15:00		-7.3	
08.02.2017	17:00		-8.0	40m3 Langrenn
08.02.2017	19:30		-10.0	46m3 Langrenn
09.02.2017	00:10		-10.0	46m3 Langrenn
09.02.2017	03:00		-11.0	46m3 Langrenn
09.02.2017	05:30		-7.6	46m3 Langrenn
09.02.2017	09:00		-9.0	
09.02.2017	11:00		-8.0	43m3 Langrenn
09.02.2017	14:03		-5.0	28m3 Langrenn
09.02.2017	22:30		-10.8	
10.02.2017	02:00		-11.0	36m3 Langrenn
10.02.2017	05:00		-5.0	34m3 Langrenn
10.02.2017	06:30		-5.0	
10.02.2017		08:00	-5.0	Stoppet på Langrenn
10.02.2017	15:00		-4.2	Produksjon kun på snølageret
10.02.2017	19:00		-6.5	
10.02.2017	23:00		-11.3	
11.02.2017	01:00		-11.0	
11.02.2017	03:00		-10.5	Dreier kanoner mot skogen
11.02.2017	05:00		-10.5	
11.02.2017	07:00		-9.0	
11.02.2017	12:00		-5.0	
11.02.2017	15:30		-6.0	
11.02.2017	17:00		-9.0	Satt opp til 3 ringer
11.02.2017	19:00		-6.0	Ned til 2 ringer
11.02.2017	20:00		-5.0	2 ringer
11.02.2017	21:00		-9.0	Opp til 3 ringer
11.02.2017	22:00		-9.0	3 ringer
12.02.2017	00:00		-9.0	3 ringer
12.02.2017	02:00		-10.0	3 ringer, mye vind, avdrift
12.02.2017	04:00		-9.5	3 ringer, mye vind, avdrift
12.02.2017	06:00		-10.0	3 ringer, mye vind, avdrift
12.02.2017	08:00		-10.5	3 ringer, mye vind, avdrift
12.02.2017	09:30		-7.0	3 ringer, mye vind, avdrift
12.02.2017		11:20	-4.0	Stans

02.03.2017	17:00		-3.2 Snølager, 2 ringer
02.03.2017	21:00		-9.0 3 ringer
03.03.2017	03:00		-10.0 4 ringer
03.03.2017	06:15		-7.5 2ringer
03.03.2017	08:45		-5.3 1 ring
03.03.2017		09:30	-2.6 Stans
03.03.2017	20:00		-3.5 Oppstart, 1 ring, litt vind
03.03.2017	21:00		-4.0 Oppstart, 1 ring, litt vind
03.03.2017	23:30		-4.0 Oppstart, 1 ring, litt vind
04.03.2017	00:30		-4.2 1 ring, ising, vind
04.03.2017	01:50		-3.1 1 ring, ising, vind
04.03.2017	03:00		-3.0 1 ring, trekk, måket rundt kanon
04.03.2017	04:00		-4.0 1 ring, trekk, måket rundt kanon
04.03.2017	05:15		-3.0 1 ring, trekk, måket rundt kanon
04.03.2017		08:00	-2.4 Stans
04.03.2017	15:00		3.0 Ingen oppstart pga. Temp
04.03.2017	23:00		-1.5 Ingen oppstart, lar nattevakt vurdere
04.03.2017	23:30		-3.0 Oppstart, 1 ring, litt vind
05.03.2017	00:30		-3.0 Bløt snø
05.03.2017		02:30	-2.5 Stans, bare vann
05.03.2017	19:00		-4.0 Oppstart, mye vind
06.03.2017		08:30	-7.5 Mye vind, kurs, ingen til å passe på
06.03.2017	19:00		-3.5 Oppstart 1 ring, vind
06.03.2017	20:00		1 ring
07.03.2017	05:30		-8.5 Vind 3 ringer
07.03.2017	07:20		1 kanon stoppet, brent kontakt
07.03.2017		08:30	-3.1 Stans
07.03.2017	17:30		-6.5 Oppstart, 2 ringer, 1 ny kanon
07.03.2017	19:45		-10.0 4 ringer
07.03.2017	22:00		-12.0 4 ringer
07.03.2017	23:00		-14.0 4 ringer
08.03.2017	01:30		-16.0 4 ringer
08.03.2017	02:00		-13.0 3 ringer
08.03.2017	03:00		-10.0 3 ringer
08.03.2017	04:30		-10.0 3 ringer
08.03.2017	06:15		-13.0 4 ringer
08.03.2017	10:15		-6.5 2 ringer
08.03.2017	17:00		-5.0 1 ring
08.03.2017	18:30		-9.0 4 ringer
08.03.2017	20:00		-11.0 4 ringer
08.03.2017	21:00		-11.0 4 ringer
08.03.2017	22:15		-9.0 4 ringer
09.03.2017	00:30		-11.0 4 ringer
09.03.2017	05:30		-8.0 3 ringer
09.03.2017	07:00		-10.0 3 ringer
09.03.2017	08:30		-7.0 2 ringer
09.03.2017		10:00	-4.0 Stans

Vedlegg 3: Våtkuletemperatur for værstasjoner 01.02.2017 til 31.03.2017

