


Rapport nr. 19

Frostrøyk nær opne
råder i vassdrag med
effektregulering



*Effekt-
regulering –
Miljø-
verknader
og konflikt-
reduserande
tiltak*

Effektregulering – Miljøverknader og konfliktreducerende tiltak

FoU-prosjektet Effektregulering - miljøverknader og konfliktreducerende tiltak er lagt inn under Effekt-programmet til Noregs forskingsråd. Prosjektet starta i 1996 og skal etter planane sluttførast i år 2000.

Meir kraftbyte med utlandet aktualiserer auka effektinstallasjonar og endra køyrestrategi i noverande og komande kraftverk. Prosjektet fokuserer på miljøverknader av auka døgnregulering som ser ut til å bli den vanlegaste forma for effektregulering i Noreg.

Eit særkjenne ved effektregulering er snøggare endringar i dei fysiske tilhøva i vassdraget enn dei vi er vane med ved dagens drift av kraftverka. Slike endringar vil påverke vassdragmiljøa på ein ny måte og vil i mange høve krevja nye løyve frå styresmaktene. Enno finst det lite systematisert kunnskap om miljøverknader knytt til døgnregulering og anna effektregulering av kraftverk.

Hovudmålet for prosjektet er difor å:

- oppgradere kunnskapen om miljøverknader av effektregulering
- utvikle boteråder som kan redusere eller fjerne negative verknader

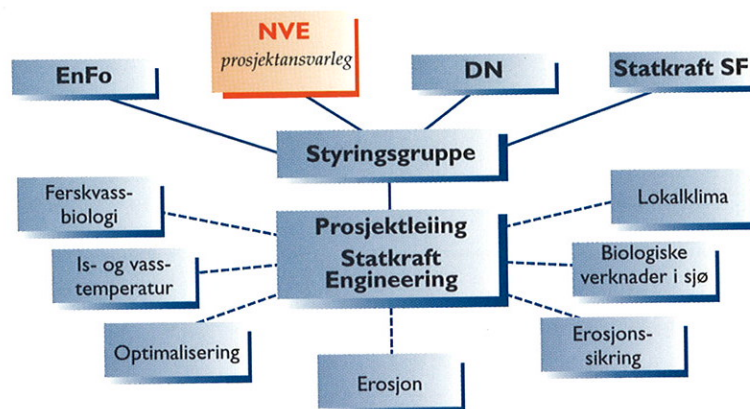
Auka kunnskapar vil setja utbyggjarar og forvaltning betre i stand til å vurdere både miljøkonsekvensane av effektregulering og effektiviteten av boterådene.

Prosjektet vurderer miljøverknadene av effektregulering i innlandsvassdrag med vekt på små og mellomstore innsjøar/magasin. Som døme-vassdrag er valt delar av Tokke-reguleringa. To av delprosjekta tek i tillegg for seg moglege verknader av auka effektregulering på biologiske tilhøve i fjordar.

Norges vassdrags- og energiverk (NVE) er prosjektansvarleg. Det er i tillegg skipa ei styringsgruppe for prosjektet med representantar for Direktoratet for naturforvaltning (DN), Energiforsyningens fellesorganisasjon (EnFo), Statkraft SF og NVE. Den daglege prosjektleiinga er lagt til Statkraft Engineering as.

Prosjektet er delt inn i åtte delprosjekt, seks av dei knytt til innlandsvassdrag og to til fjordar. Dei som er knytt til innlandsvassdrag femner faggreinene is- og vass-temperatur, erosjon, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering av teknikk, miljø og økonomi. Fjordprosjekta femner verknader av effektregulering på fisk og algevekst.

Arbeidet blir gjort av institusjonane Universitetet i Bergen, Det norske meteorologiske institutt (DNMI), Norsk institutt for vannforskning (NIVA), NVE, Statkraft Engineering og Universitetet i Oslo.



Meir informasjon om prosjektet og publikasjonar i serien Rapport frå Effektregulering - Miljøverknader og konfliktreducerende tiltak, får du ved å vende deg til:

Prosjektleder Elise Førde
Statkraft Grøner as
Postboks 400
1327 Lysaker

Tlf: 67128000
Fax: 67128212

e-mail: elf@statkraftgroner.no
<http://www.statkraftgroner.no/project/eff>

EFFEKTREGULERING – MILJØVERKNADER OG KONFLIKTREDUSERANDE TILTAK

Delprosjekt 1.3 Klima

Tittel: Frostrøyk nær opne råker i vassdrag med effektregulering Frost smoke near open water bodies caused by hydro power peaking	RAPPORT NR. 19 DNMI-RAPPORT NR. 22/00 KLIMA
DELPROSJEKTANSVARLEG: Per Øyvind Nordli	INSTITUSJON: Det norske meteorologiske institutt
FORFATTAR: Per Øyvind Nordli	INSTITUSJON: Det norske meteorologiske institutt

SAMANDRAG:

Frå hausten 1996 til våren 2000 vart det gjort systematiske observasjonar av frostrøyk ved Våmarvatn og Bandak i Tokkevassdraget. Observasjonane vart analyserte og tolka. På grunn av unormalt milde vintrar vart ikkje observasjonstilfanget tilstrekkeleg for Bandak, men for Våmarvatn vart det stort nok. Det viste seg at ein eksisterande frostrøykmodell basert på meteorologiske data generelt sett estimerte frostrøyken ved Våmarvatn særst godt. For dei kaldaste dagane var det likevel ein tendens til at modellen overestimerte frekvensen av tett frostrøyk. Dette kom av at den opne råka snevra seg sterkt inn i streng kulde.

I den monn ei effektregulering gjer opne råker smalare i streng kulde, kan slik effektregulering føre til at frostrøyken blir tynnare og får mindre omfang.

Eit scenario for temperaturutviklinga 50 år fram i tid, vart kombinert med frostrøykmodellen. Det viste seg at i strenge innlandsklima vart frostrøyken redusert med frå 12 – 67 % alt etter stad og kor tett frostrøyk det var tale om.

ABSTRACT:

As a part of an environmental project connected to plans for increased peak hydropower production, observations of frost smoke were performed at the lakes Våmarvatn and Bandak in the Tokke watercourse in Telemark, southern Norway. The study was to a certain extent hampered by extraordinary mild winters. However, at Våmarvatn sufficient material was collected to show that an existing frost smoke model gave a good description of the observations. For extra cold days the model tended to overestimate the occurrences of dense frost smoke. This seemed to be due to a reduction of the ice-free area.

If the power production is subject to intensified peaking and the plant is without production during night, the frost smoke becomes thinner and covers smaller areas than under conventional production.

A scenario for temperature around year 2050 was used as input in a frost smoke model. In the Norwegian continental climates this leads to a reduction of the frost smoke frequency by 12 – 67 % depending on place and density of the frost smoke in question.

EMNEORD: Frostrøyk, effektregulering, Tokke, Våmarvatn, frostrøykmodell.

Lysaker, februar 2001

Elise Førde
Elise Førde
Prosjektleiar

ISBN 82-91904-20-0

ISSN 0809-5825

Frostrøyk nær opne råker i is i vassdrag med effektregulering.

Innhald

	Side
1 Samandrag og konklusjon	6
2 Summary and conclusion	8
3 Innleiing	9
4 Innsamling av data gjennom prosjektperioden	10
4.1 Våmarvatn	11
4.2 Bandak	12
5 Analyse av frostrøykbileta	12
5.1 Fotografering ved Våmarvatn	12
5.2 Fotografering ved Bandak	16
6 Testing og utvikling av frostrøykmodell	17
6.1 Om korleis frostrøyken ter seg i terrenget	17
6.2 Testing av eksisterande frostrøykmodell	18
6.3 Tilpassing av eksisterande modell	23
7 Frostrøykfrekvens vurdert opp mot eit scenario for klimautviklinga i Noreg	24
8 Frostrøyk i effektregulerte vassdrag	28
9 Litteratur	31
Appendiks	32
Frost – eit program for utrekning av sannsynet for frostrøyk.	

1 Samandrag og konklusjon

Som ein lekk i prosjektet "Effektregulering - miljøverknader og konfliktreducerande tiltak" vart det sett i gang frostrøykfotografering ved Våmarvatn og Bandak i kommunane Vinje og Tokke. Fotograferinga vart gjennomført i sesongen november til mars gjennom heile prosjektperioden frå hausten 1996 til våren 2000. I prosjektperioden vart det òg drive automatiske, meteorologiske stasjonar på dei to stadene til hjelp ved tolkinga av observasjonane av frostrøyk.

Ei sentral problemstilling var om ein kunne bruke kjende frostrøykmodellar på frostrøyken i vassdraget. Av slike finst både teoretiske, som ofte har eit sterkt avgrensa bruksområde, og (kvasi)empiriske, som har den ulempa at dei kan vera vanskelege å overføre til andre vassdrag enn der dei er utvikla, då dei i for stor grad kan vera eit produkt av bestemte lokalklima.

Av dei teoretiske modellane vart ein modell for mogleg frostrøykdanning brukt som ein test på observasjonsmaterialet (Golytsyn & Grachov 1986). Modellen gjev eit naudsynt vilkår for frostrøyk om enn ikkje tilstrekkeleg. Materialet viste at dei tilfella av tåke som av observatørane vart klassifisert som frostrøyk, så og seia alltid låg innafør området for det moglege. Dette viser at observasjonane er sètande (reliable).

Andre teoretiske modellar, som den av Økland og Gotaas (1995), viser korleis frostrøyken breier seg utover vatnet med vinden og kor høgt han når. Den modellen var tenkt brukt på frostrøyken over Bandak, men på grunn av spesielt milde vintrar i prosjektperioden kunne det ikkje gjennomførast fordi berre svak, grunn frostrøyk vart danna i dei få tilfella det var frostrøyk. Ein kvasiempirisk frostrøykmodell (Nordli 1988), her etter kalla modellen, vart derimot testa på data både frå Våmarvatn og Bandak

På grunnlag av dei to observasjonsseriane kan vi konkludere fylgjande:

1) *Det er mykje oftare frostrøyk ved Våmarvatn enn ved Bandak. For prosjektperioden sett under eitt var det 76 observasjonar ved Våmarvatnet mot berre 9 ved Bandak. Relativt gjev det ein skilnad på ein faktor 8.*

2) *Modellen gav svært gode estimat for frostrøyken ved Våmarvatn. Samla for heile prosjektperioden hadde estimatet ein feilprosent på berre 5.*

3) *Også modellen gav mindre frostrøyk ved Bandak enn ved Våmarvatn, men overvurderte likevel frostrøyken ved Bandak. Modellen gav ein relativ skilnad på ein faktor 4, mot ein faktor 8 basert direkte på observasjonane.*

Frostrøykdanning over Bandak blir ofte hindra av at det ikkje lett dannar seg inversjonar i dalen. Frostrøykmodellen vart stilt slik at atmosfæren i dalen vart "tvinga" til å ha indifferent lagdeling. Han vart dermed tilpassa situasjonen ved Bandak.

4) *Ved tilpassing av modellen såg det ut til at han også kunne gje gode estimat for frostrøykfrekvens over Bandak. Det er likevel ikkje mogleg å konkludere sikkert om dette på grunn av for få tilfelle av frostrøyk.*

Frostrøyken vart også klassifisert etter styrken og jamført med tilsvarende klassifikasjon i modellen. Klasse 2 eller høgare tyder at frostrøyken er så velutvikla at han får karakter av tett tåke. Ein kan då ikkje sjå igjennom frostrøyken på avstand. For klasse 2 av frostrøyk og høgare klassar overestimerte modellen frostrøyken. Ved Våmarvatnet krympa den opne råka sterkt inn under streng kulde. Sjølv om frostrøykproduksjonen var intens, vart innblandinga av kaldluft frå sidene for stor og frostrøyken vart tynna ut. Difor blokkerte ikkje frostrøyken for utsynet til stranda på andre sida av vatnet. Etter konvensjonen for klassifisering vart dermed slik frostrøyk rekna inn under klasse 1.

5) Modellen overestimerer frostrøyken når det er kaldare enn -15 °C. Ved statistisk testing av modellen vart det funne at vassarealet spela ei rolle for kor godt modellen estimerte frostrøyken. Dette resultatet kan vera stadbunde til Våmarvatnet der open vassyte minskar i streng kulde. Det er difor mogleg at modellen generelt er god på stader der vassyta ikkje snevvar seg så sterkt inn.

Også utan å bruke frostrøykmodellen, vart det funne at arealet ope vatn spela ei rolle for kor tett frostrøyken kunne bli. Ved Våmarvatnet ville ikkje arealet av ope vatn ha endra seg stort om effektreguleringa hadde vore hardare. Til det er kapasiteten på tunnelen frå Totak for liten. Men i sterkt effektregulerte vassdrag står kraftverka om natta når straumprisane er lågast. Under stansen om natta kan den opne råka fryse til, og når ho fyrst er tilfrosen, kan is tola ein viss overtemperatur før vatnet opnar seg på nytt (Kvambekk 2000). Det fører til at i alle fall i streng kulde, dvs. nett dei situasjonane det er aktuelt med frostrøyk, blir det mindre ope vatn med effektregulering enn ved konvensjonell drift.

6) Ved ei effektregulering der kraftverket er avstengd om natta, minskar frostrøykproduksjonen og det blir mindre frostrøyk enn før. Ved statistisk analyse vart det funne at frostrøyken blir tynnare når den opne råka minskar i storleik. På stader der det er frostrøyk ved ei vanleg sesongregulering, kan frostrøyken minke ved effektregulering både i omfang og tettleik. (I alle fall gjeld dette om den opne råka er 50 meter eller smalare.) Om ikkje kraftverket stoppar heilt om natta, kan derimot open råk bli større og frostrøyken auke i omfang og tettleik.

For å estimere framtidig frostrøyk vart det arbeidd vidare med eit scenario basert på ECHam4-modellen. Modellresultata vart fyrst nedskalerte til å gjelde norske tilhøve. Nedskaleringa vart gjort på månadmiddeltemperatur ved hjelp av statistiske metodar, d.e. empirisk nedskalering. Deretter vart det ved regresjon funne ein samanheng mellom månadmiddeltemperatur og talet på frostrøykdagar i månaden. Vel 90 % av variansen vart godtgjort av regresjonen.

7) Modellresultat viser at det blir mindre frostrøyk i Noreg i eit framtidig, mildare klima. Eit scenario basert på ECHam4-modellen gjev ein nedgang på 12 frostrøykdagar (frå 34 i dag) ved Nesbyen i Hallingdal og 8 dagar (frå 67 i dag) i Karasjok i Finnmark gjennom dei neste 50 åra. I prosent utgjer det ein nedgang på 35 i Nesbyen mot berre 12 i Karasjok. Desse stadene representerer kaldt innlandsklima på Austlandet respektive Nord-Noreg. For at tala skal vera realistiske er føresetnaden at det er ope vatn på staden sjølv i streng kulde.

Frostrøyk kan variere mykje i tettleik og omfang. Såleis vart mektig frostrøyk (klassane 3 og 4) granska spesielt då det er slik frostrøyk som kan vera til ulempe for dei som bur ved opne elvar eller fjordar.

Scenario frå ECHam4-modellen viser at talet på dagar med mektig frostrøyk vil gå ned med 6 dagar (frå 9 i dag) dei komande 50 åra i Nesbyen i Hallingdal og med 7 dagar (frå 38 i dag) i Karasjok. Desse tala tilsvarar ein nedgang på 67 % for Nesbyen og 18 % for Karasjok.

Det viser seg altså at i eit strengt vinterklima som det i Karasjok, blir det ikkje nokon særleg markert nedgang i talet på frostrøykdagar. Ved Nesbyen derimot er nedgangen svært markert særleg dersom ein ser på den mektigaste frostrøyken, som altså minkar frå 9 til 3 dagar.

Føresetnaden for resultatane ovafor er at det finst opne vatn sjølv i streng kulde. Dette er i alle fall ikkje tilfelle i Karasjok i dag og knapt nok i Nesbyen. Difor er resultatane ovafor uttrykk for det ein kan vente seg om det skulle bli framtidige reguleringar med utslepp av varmt vatn i slike vinterklima det her er tale om. Nesbyen og Karasjok er tolleg representative for flate dalbotnar utan særleg fall og med god avstand frå kysten, respektive på Austlandet og i Finnmark.

8) Så langt ein kan sjå, blir frostrøyk ei mindre miljølempe i framtida enn i dag. Årsaka er at aukande drivhuseffekt fører til høgare vintertemperatur. Om utviklinga går mot meir intens effektregulering med produksjonsstans om natta, kan det òg gje eit bidrag til å minke utbreiinga av frostrøyk.

2 Summary and conclusion

As a part of an environmental project connected to plans for increased peak hydropower production, observations of frost smoke were performed at the lakes Våmarvatn and Bandak in the Tokke watercourse in Telemark, southern Norway. The study was to a certain extent hampered by extraordinary mild winters. However, at Våmarvatn sufficient material was collected to show that an existing frost smoke model gave a good description of the observations.

Based on the observations one may conclude:

There is more often frost smoke at lake Våmarvatn than at Bandak. In the project period (1996/97 – 1999/2000) there were 76 cases at Våmarvatn compared to only 9 at Bandak, a ratio of 8 to 1.

A quasi-empirical frost smoke model estimated the frequency of frost smoke at Våmarvatn with an error of only 5 %. This was considered to be very satisfactory.

The same model correctly gave fewer cases of frost smoke at Bandak than at Våmarvatn, and estimated the ratio to be 4 to 1 in favour of Våmarvatn, while the ratio based on observation was 8 to 1. This means that the model overestimated the number of frost smoke cases at Bandak.

Adjustments were made in the input parameters of the model to make it more applicable to the climate conditions at Bandak, and this seems to give encouraging results. However, due to the mild winters in the project period, the material is insufficient to surely conclude about this.

The model overestimated the density of the frost smoke when temperature fell below $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Statistical analysis showed, however, that the area of the open water body affected the number of frost smoke cases. The overestimation on extra cold days may therefore be caused by the shrinking of the open area. It is therefore possible that the model will estimate the frost smoke density correctly also for the lowest temperatures at places where the open area does not shrink so much as at Våmarvatn.

If the power production is subject to intensified peaking, and this causes a production stop during night, the frost smoke may become thinner and cover smaller areas. The reason for this is that the area of the open water in cold weather diminish compared to the situation of conventional production.

A scenario for temperature around year 2050 was used as input in a frost smoke model. In the Norwegian continental climates this leads to a reduction of the frost smoke frequency by 12 – 67 % depending on place and density of the frost smoke in question.

3 Innleiing

Som ein lekk i prosjektet "Effektregulering - miljøverknader og konfliktreducerande tiltak" vart det hausten 1996 sett i gang frostrøykfotografering ved Våmarvatn i Vinje og ved Bandak i Tokke. Vidare vart det sett i drift automatiske, meteorologiske stasjonar på desse stadene til hjelp ved tolkinga av observasjonane av frostrøyk.

Røynsler om frostrøyk vunne ved observasjonar i eitt vassdrag, kan berre overførast til eit anna om ein tek omsyn til variasjonar i det lokale klimaet. Det kan gjerast ved at det blir utvikla modellar der klimaparametrar går inn. Slike har vore utvikla tidlegare, både empiriske og analytiske (Nordli 1988; Økland & Gotaas 1995). Empiriske modellar har den ulempa at dei i for stor grad kan vera influerte av staden der dei er utvikla, medan analytiske modellar har den ulempa at fysikken i dei er sterkt forenkla. Difor er det viktig at modellane får ei breiast mogleg evaluering og testing for å gjera dei betre eigna til bruk.

Effektregulering kan generelt sett påverke islegginga av magasina og dermed også produksjonen av frostrøyk. Spørsmålet er om storleiken på open råk i streng vinterkulde berre påverkar omfanget av frostrøyken, eller om råka også fører til at frostrøyken blir tynnare/tettare.

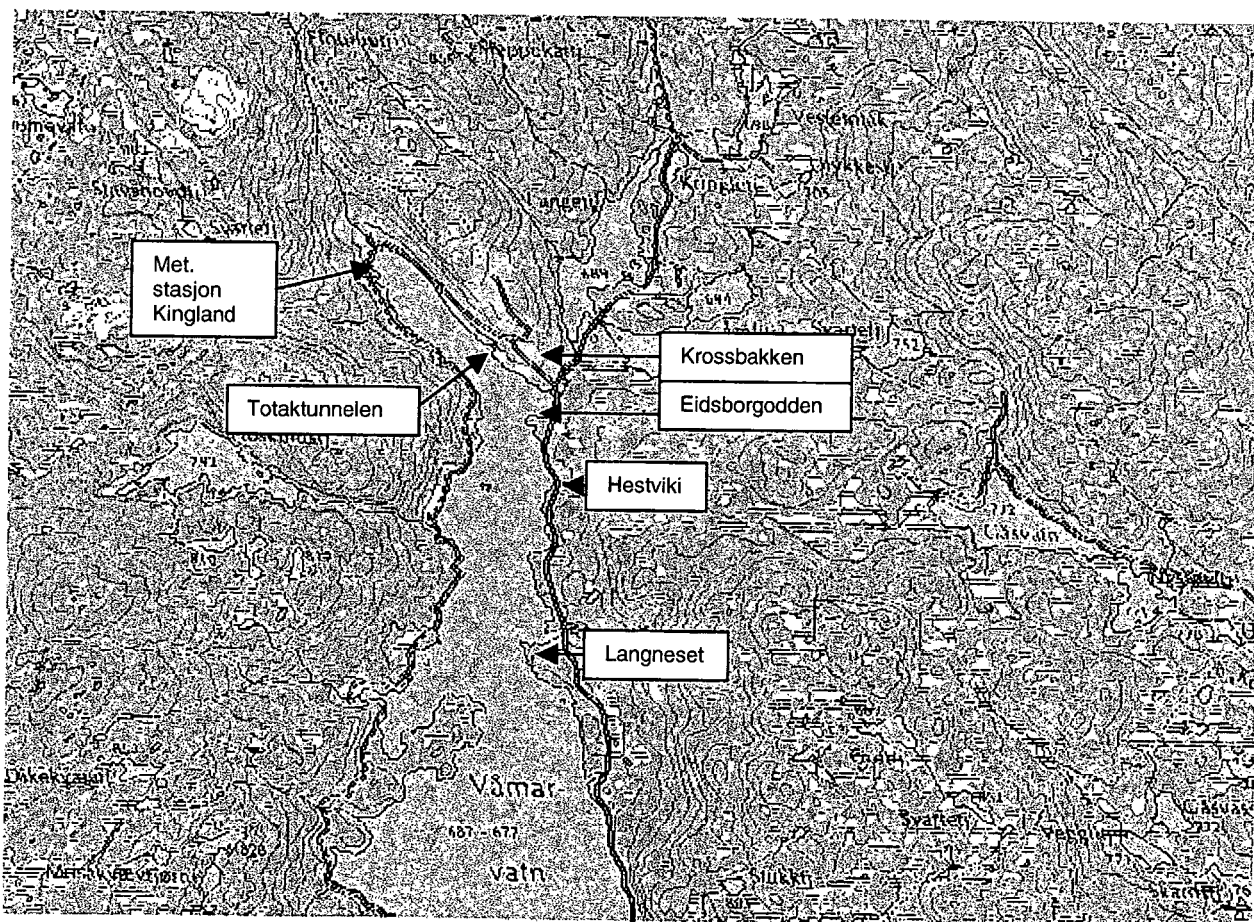
Det går no føre seg ei omfattande forskning på klimautviklinga i den nordiske regionen sett på bakgrunn av utsleppet av klimagassar. Denne forskinga er komen så langt at dei fyrste scenario for framtida i Noreg er lagde fram av prosjektet RegClim. Vi kan ikkje lenger sjå frostrøyk som eit fenomen i eit statisk klima, men i eit klima i stendig endring. Difor er resultatane frå RegClim dregne inn i arbeidet med frostrøyken, i det vi har teke utgangspunkt i eit scenario for temperatur dei komande 50 åra som vi har mata inn i ein modell for frostrøyk.

Denne rapporten er ei vidareføring av to tidlegare frostrøykrapportar (Nordli 1997, 1999), men samlar i hovudsak opp også det som alt er referert i dei tidlegare rapportane. Det er berre i denne siste rapporten at heile tilfanget frå prosjektet er med, fordi dei førre rapportane var skrivne føre datainnsamlinga var avslutta.

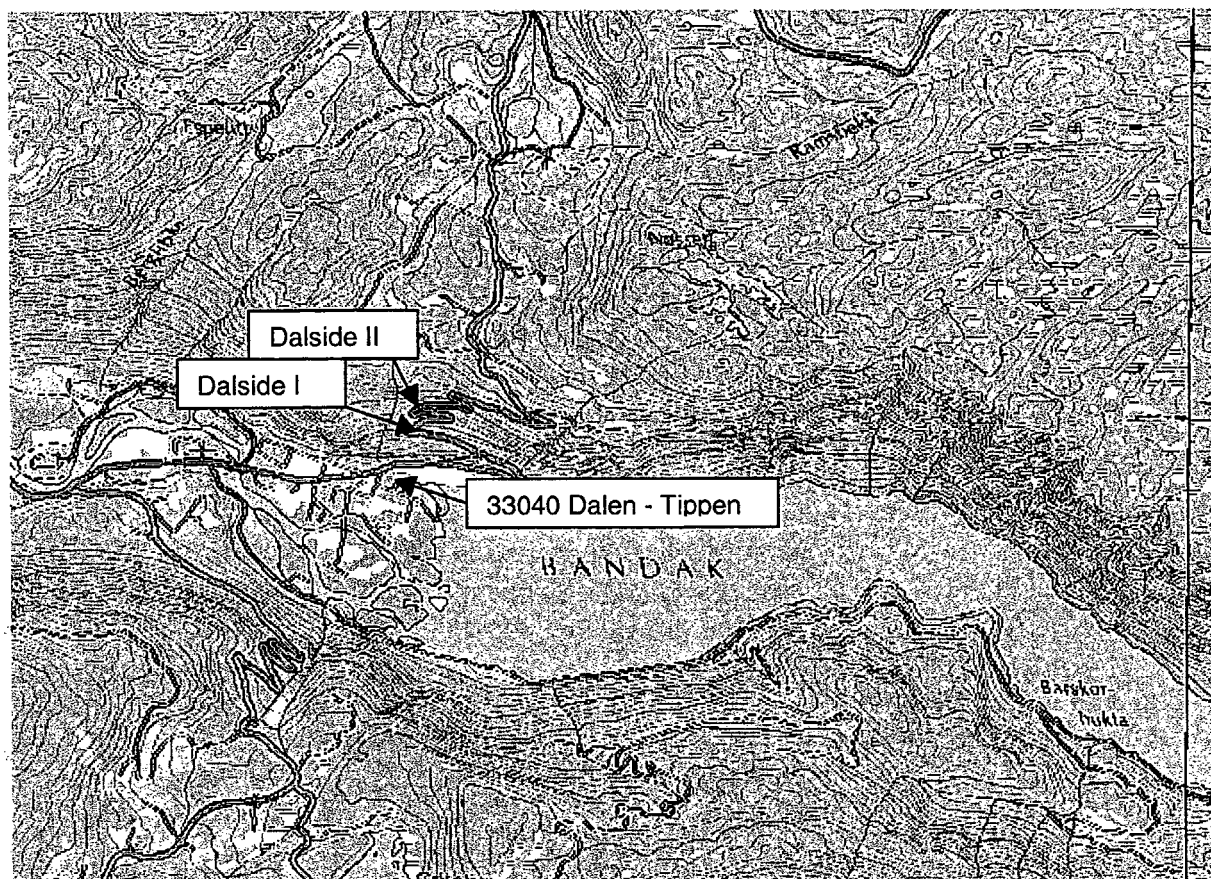
4 Innsamling av data gjennom prosjektperioden

Effektreguleringsprosjektet valde Tokke som referansevassdrag, eit vassdrag som vart utbygd på 1950- og 1960-talet. Ved tilrettelegging for effektregulering tenkjer ein seg at den eksisterande kapasiteten i tunnelane kan aukast ved utviding eller nybygging, og at også installasjonen i kraftverket kan aukast.

Til frostrøykstudia vart det valt ut to område, det eine ved Våmarvatnet og det andre ved Dalen. Her vart frostrøyktilfella dokumenterte ved fotografering frå standplassar med godt utsyn mot ope vatn. Meir detaljar om fotograferinga og bileta finst i kapittel 5. Til modelleringa av frostrøyken vart dei to faste automatiske, meteorologiske stasjonane 33420 Våmarvatn – Kingland, figur 4.1, og 33040 Dalen – Tippen, figur 4.2, brukte. Stasjonane vart sette i drift føre fyrste prosjektvinteren, og fungerte gjennom heile prosjektperioden utan tap av data. Det skulle vise seg å bli sær viktig at datainngangen vart komplett, for i prosjektet vart det i knappaste laget med frostrøykdata. Dei fire vintrane 1996/97 til 1999/00 var jamt over mildare enn normalt, slik at tilfanget av frostrøykdata vart mindre enn det ein hadde grunn til å vente då prosjektet vart planlagt.



Figur 4.1 Våmarvatn med plasseringa den meteorologiske stasjonen 33420 Våmarvatn – Kingland (kart frå "Opplev Norge").



Figur 4.2 Bandak med plasseringa den faste stasjonen 33040 Dalen – Tippen, saman med dei mobile mælepunkta for temperatur, Dalside I og Dalside II (kart frå "Opplev Norge") .

Tabell 4.1 Meteorologiske stasjonar som vart nytta i frostrøykgranskingane. Dei oppgjevne høgdene over "dalbotnen" gjeld høgd over høgste regulerte vasstand.

Stasjonsnummer og namn	Startdato	Høgd over havet (m)	Høgd over dalbotnen (m)
33040 Dalen - Tippen	09. okt. 1996	75	0
33420 Våmarvatn - Kingland	11. okt. 1996	690	3
Dalside I (Villaen)	29. nov. 1996	152	77
Dalside II	21. nov. 1996	261	186

4.1 Våmarvatn

Detaljkart for området ved Våmarvatn er vist på figur 4.1. Vatnet har samband med Totak gjennom ein horisontal tunnel, slik at når Vinje kraftverk blir køyrd og vasstanden fell i Våmarvatn, blir det fylt på med vatn frå Totak. Så lenge det er gjennomstrøyming frå Totak, er det ved utlaupet av kanalen ei open råk vinteren igjennom. Det vil igjen seia så lenge Vinje kraftverk er i drift. Stopp av kraftverket kan føre til attfrysing av råka. Vatnet er regulert mellom kotane 677 og 687 m o.h. Trass i det høge lægjet, finst det jordbruk ved vatnet i grenda Våmartveit og på garden Kingland der stasjonen 33420 Våmarvatn - Kingland vart sett i drift i samband med prosjektet, figur 4.1 og tabell 4.1.

4.2 Bandak ved Dalen

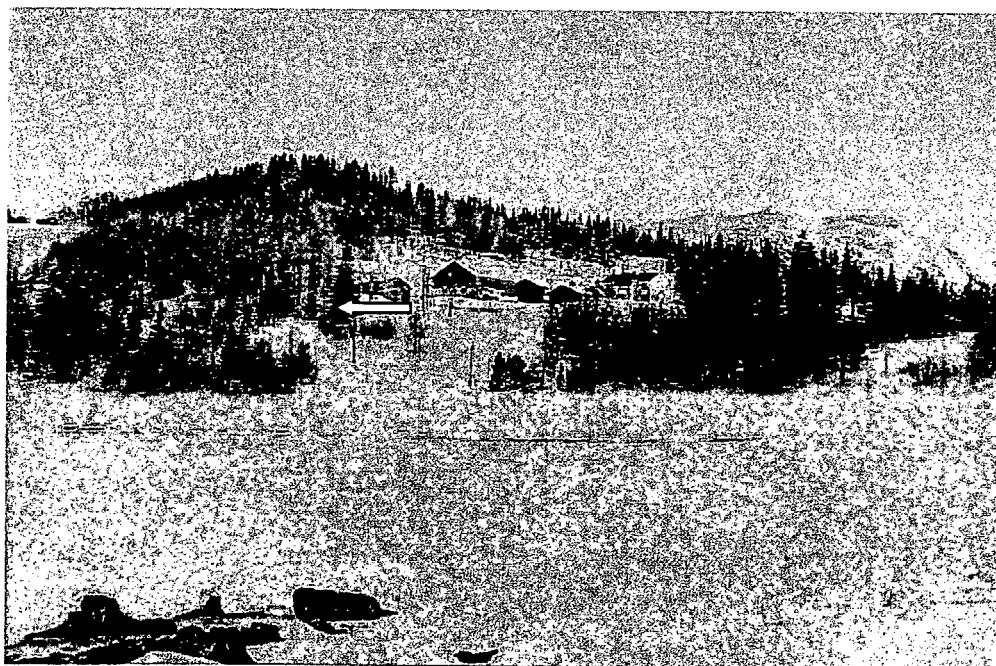
Som figur 4.2 viser, ligg Bandak 72 m o.h. i ein dal med bratte, somme stader nesten loddrette sider. Dette særmerkte terrenget vart nytta til å skaffe fram kunnskap om den vertikale temperaturgradienten i dalen. I praksis vart det gjort ved å setja opp ein permanent stasjon i dalbotnen, 33040 Dalen - Tippen og mobile stasjonar i dalsida ovafor, Dalside I (Villaen) og Dalside II. Plassering av stasjonane er viste på figur 4.2 og høgder over havet og over dalbotnen i tabell 4.1.

5 Analyse av frostrøykbileta.

Frostrøyken vart fotografert gjennom alle fire vintrane, 1996/97 – 1999/00, frå 1. november til 31. mars både ved Våmarvatn og ved Bandak. Instruksen gjekk ut på at det skulle fotograferast kl 8 kvar morgon, men likevel ta omsyn til dagsljøset. Det førte med seg at i desember og januar vart det sjeldan fotografert føre kl 9, ofte også noko seinare. Jamt over vart det fotografert i tidsrommet kl. 08 - kl. 10 med nokre få unntak.

5.1 Fotografering ved Våmarvatn.

Ved Våmarvatn var standplassen til fotografen garden Krossbakken om lag 150 - 200 m frå ope vatn, figur 5.1. Over det opne vatnet er det om lag 200 m frå breidd til breidd. Det var Eling Krossbakken som var observatør og fotograf.



Figur 5.1 Garden Krossbakken, standplass for frostrøykfotografering. I framgrunnen ser ein ein del av Våmarvatn, d.e. vika mellom Eidsborgodden og garden. Denne vika islegg seg om vinteren. Det opne vassarealet ligg til venstre, utanfor biletet. Pila viser standplass og fotograferingsretning.

OPPLYSNING OM FROSTRØYK



DNMI

Det norske meteorologiske in-

OBSERVASJONSSTAD: *Våmarvatten*

ÅR: *1997* MÅNAD: *Mars*

NAMN PÅ OBSERVATØR (SIGNATUR): *Erling Frossbotten*

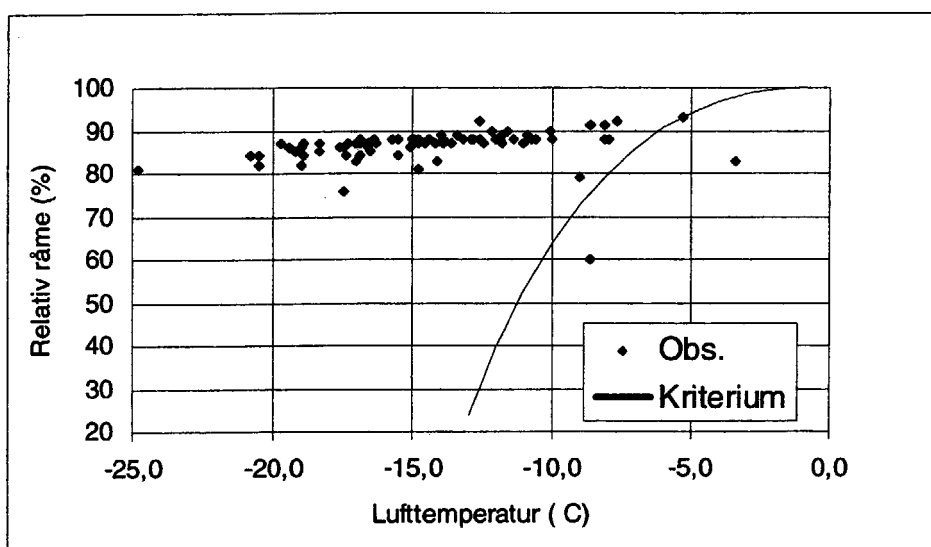
Dato	Klokkeslett	Merk om du ser frostrøyk eller ikkje.
1	8,15	<i>Ikke frostrøyk</i>
2	8,10	<i>"</i>
3	8,20	<i>"</i>
4	7,45	<i>"</i>
5	8,00	<i>"</i>
6	8,40	<i>"</i>
7	8,35	<i>"</i>
8	8,05	<i>"</i>
9	8,25	<i>"</i>
10	8,30	<i>"</i>
11	8,35	<i>"</i>
12	7,50	<i>"</i>
13	8,20	<i>"</i>
14	8,00	<i>"</i>
15	8,00	<i>"</i>
16	8,10	<i>Lett frostrøyk</i>
17	8,00	<i>Frostrøyk</i>
18	8,00	<i>ikke synleg frostrøyk</i>
19	8,15	<i>"</i>
20	8,20	<i>Antydning til frostrøyk</i>
21	8,00	<i>ikke synleg frostrøyk</i>
22	8,10	<i>"</i>
23	8,25	<i>"</i>
24	8,30	<i>Lett snødriv ikkje frostrøyk</i>
25	8,00	<i>"</i>
26	7,35	<i>Disig ikkje frostrøyk</i>
27	8,30	<i>ikke frostrøyk</i>
28	8,10	<i>"</i>
29	8,15	<i>"</i>
30	8,05	<i>"</i>
31	7,45	<i>Sterke vind ikkje frostrøyk</i>

Ein observerer frostrøyken så tidleg som råd om morgonen ved hjelp av fotografering og utfylling av skjema. Hugs at det skal fotograferast kvar dag utan omsyn til frostrøyksituasjonen. Det er like viktig å vise at det ikkje er frostrøyk som at det er frostrøyk.

Figur 5.2 Frostrøykskjema

Observatøren førte eit skjema der han skreiv ned klokkeslettet for kvart bilete og også om han kunne sjå frostrøyk, figur 5.2. Ein valte å få bileta i form av ljusbilete som vart analyserte ved hjelp av ein miniframvisar. Dermed hadde ein to seriar, den eine basert på notatane, den andre på bileta. Dette gjorde det mogleg å jamføre. Det synt seg at det ikkje var mogleg å sjå dei aller svakaste tilfella av frostrøyk på bileta. Men også dei tilfella som ikkje var synlege på bileta, vart registrerte som frostrøyk i den endelege statistikken. Frostrøyken varierte mykje når det galt styrke og utbreiing. Det fanst tilfelle då frostrøyken stod fram som mektige tåketeppe over det opne vassarealet.

Teoretisk finst det eit kriterium for danning av frostrøyk gjeve som ein funksjon av to variablar: 1) differansen mellom temperaturen i vassflata og i lufta. 2) den relative råmen i lufta (Golytsyn & Grachov 1986; Nordli 1988). Dette vart brukt til å verifisere observasjonane av frostrøyk. Såleis kunne andre tåkeformer lett lukast ut av materialet (det finst former som lett kan bli feiltolka som frostrøyk). Ein slik kontroll er vist ved framstillinga på figur 5.3.



Figur 5.3 Kritisk temperatur for mogleg danning av frostrøyk (kurve) jamført med dei aktuelle observasjonane av frostrøyk over Våmarvatn vintrane 1996/97 – 1999/00 (punkt). Punkt til venstre for kurva er teoretisk moglege tilfelle av frostrøyk. Figuren gjeld berre i dei tilfella at temperaturen i vassflata er 0°C.

Observasjonane plasserte seg til venstre for kriteriet for frostrøyk med unntak av ein som vart liggjande på kurva (05.01.1988) og to som vart liggjande på høgre side av kurva der det teoretisk ikkje skulle vera mogleg at frostrøyk vart danna. Desse tre punkta vart granska nærare. Det som låg på kurva vart godkjent, medan dei som låg til høgre for kurva, vart forkasta. Her er dei lista opp med lufttemperatur og relativ råme i parantes

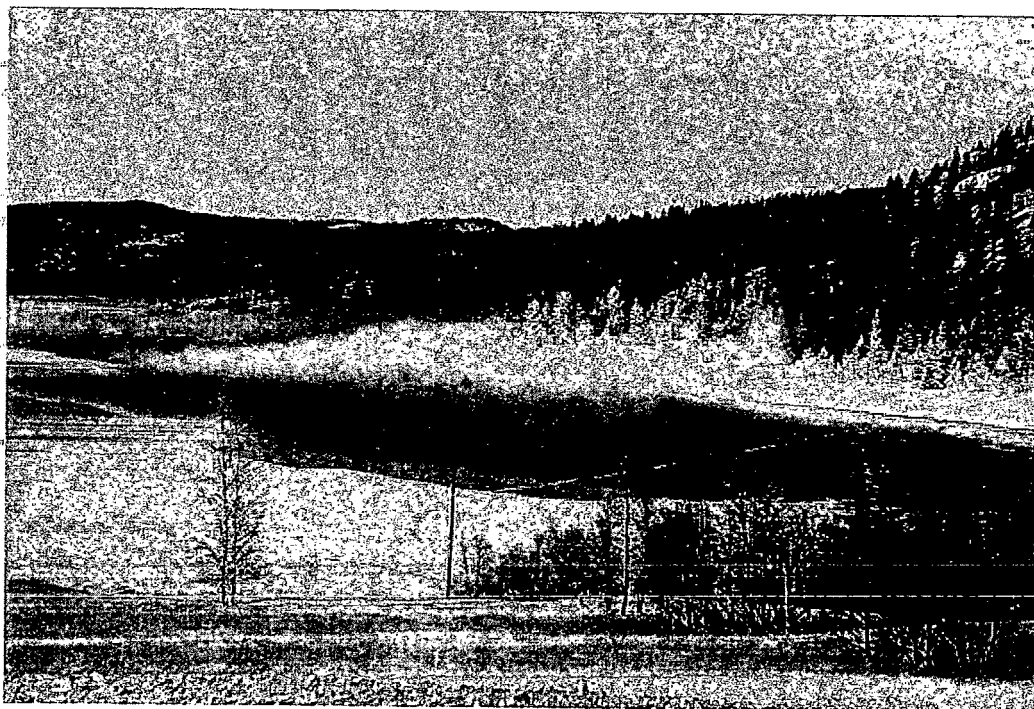
16.03.1997 (-8,6 °C; 60 %): Det vart ikkje fotografert den dagen slik at eventuell frostrøyk kunne dokumenterast.

25.02.2000 (-3,4 °C; 83 %): Observatøren kommenterer: "svak frostrøyk nær vassflata". Røyken er for svak til å bli sett på biletet. Observasjonane viser at vinden var svært ujamn ved observasjonstida. Temperaturobservasjonane ved Kingland kan ha vore tekne i godt "blanda luft" medan det andre stader ved vatnet kunne ha lege att lommer av kaldluft.

Av figur 5.3 ser vi at den relative råmen i lufta kan variere innafor vide rammer og likevel halde seg innafor området der frostrøyk teoretisk kan bli danna. I praksis ser vi at den relative råmen tvert i mot ikkje varierer særleg mykje i frostrøyksituasjonane. Han held seg oftast rundt 90 % når temperaturen er -10 °C og minkar i regelen til under 90 % når temperaturen er nede i -20 °C. Det ser såleis ut til å vera nokså einsarta vêrsituasjonar som ved Våmarvatnet er gunstige for frostrøykproduksjon.

Tabell 5.1 Kriterium for vurdering av frostrøykbilete ved Våmarvatn.

Klasse	Definisjon
0	Ingen frostrøyk korkje på bilete eller på rapportskjema.
1	a) Ingen synleg frostrøyk på bilete, men rapportert av fotografen. b) Frostrøyken er synleg på biletet. Han når ikkje høgde (er mektigare) enn at stranda på andre sida av vatnet er godt synleg på biletet.
2	Stranda på andre sida av vatnet er synleg, men er svært diffus.
3	Stranda på andre sida av vatnet er ikkje synleg på grunn av frostrøyken, men horisonten ser ein tydeleg, sjå figur 5.4.
4	Strand og horisont på andre sida av vatnet er usynleg på grunn av høg, tett frostrøyk



Figur 5.4 Bilete, retning SV, den 11. mars 1999 frå ein standplass rett ovafor Krossbakken. Stranda på andre sida er ikkje synleg på eit område av biletet. Difor vart tilfellet tolka som klasse 3, sjå tabell 5.1.

Det har vore utarbeidd klassifiseringssystem for frostrøyken. Då frostrøyken varierer sterkt både i styrke og utbreiing, er det viktig at klassifiseringssystema er presist formulerte. Berre då er jamføring mellom ulike lokalitetar relevant, og berre då kan det vera håp om at

empiriske frostrøykmodellar utvikla på ein stad, også kan gjelde andre stader. Klassifiseringssystem for frostrøyk har vore introduserte av Nordli (1988) og Utaaker (1995). Det allereie eksisterande systemet (Nordli 1988) vart tilpassa til lokale tilhøve ved Våmarvatn, tabell 5.1.



Figur 5.5 Bilete den 11. mars 1999 frå Eidsborgodden mot Kingland, retning NV. Garden er ikkje synleg på grunn av frostrøyken. Same situasjonen som på figur 5.4.

5.2 Fotografering ved Bandak

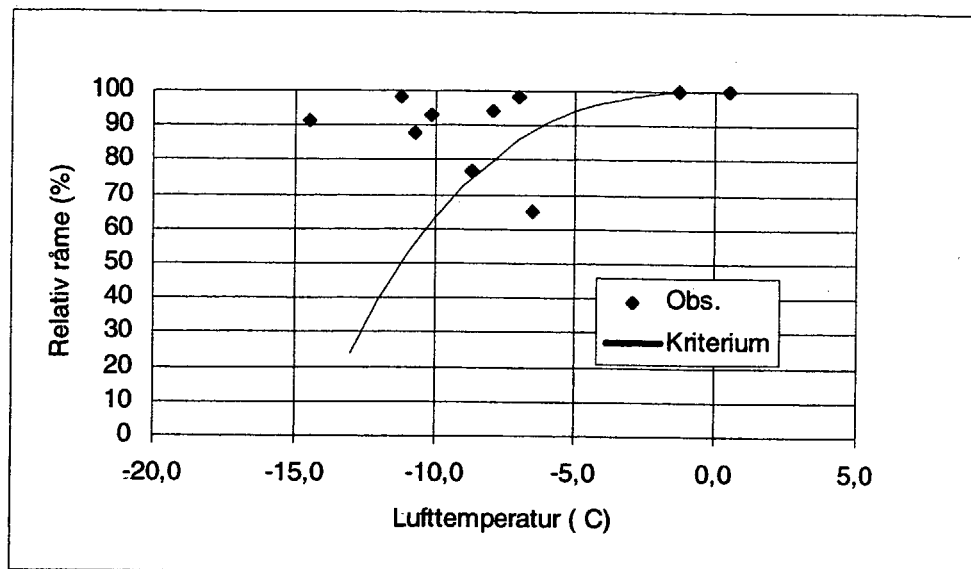
Etter same opplegg som for Våmarvatnet vart også frostrøyk fotografert over Bandak og observasjonar førde inn på same slags skjema som vist på figur 5.2. Standplassen var oppe i dalsida frå den staden som i bygda går under namnet Villaen. Det var Evelyn Andersson som i dei aller fleste tilfelle stod for fotograferinga og førde skjemaet. Avstanden frå standplassen til ope vatn var 500 – 1000 m alt etter kvar isgrensa fanst. Det er vesentleg lenger enn ved Våmarvatnet.

Det viste seg at det var mykje mindre frostrøyk over Bandak enn over Våmarvatnet, og knapt eit einaste tilfelle var så sterkt at ein kunne sjå det på bilete. Det vart difor ikkje bruk for noko klassifiseringssystem for frostrøyk ved Bandak. I og med at ein ikkje kunne sjå frostrøyken på bilete, reknar vi med at all observert frostrøyk høyrer heime i den veikaste klassen, klasse 1. I alt vart det notert ned 10 tilfelle av frostrøyk over vatnet dei fire vintrane observasjonane varde. Dei vart evaluerte etter ei teoretisk frostrøykkurve for mogleg frostrøyk, figur 5.6.

Av desse 10 tilfella er det berre eitt som ligg til høgre av kurva og som dermed ikkje kan vera frostrøyk. Det er tilfellet:

02.01.1997 (-6,5 °C; 65 %): Truleg har det denne dagen vore ei anna form for tåke over vatnet enn frostrøyk. Tilfellet vart difor forkasta, og det blir dermed att 9 tilfelle av frostrøyk.

Det finst også eitt tilfelle av frostrøyk når det er varmegradar i lufta. Då kan det heller ikkje bli frostrøyk over vatnet om vass temperaturen er 0 °C. Men tilfellet skriv seg frå den 5. desember 1996, og det er mykje mogleg at temperaturen i vassflata då var noko høgare enn 0 °C slik at differensen mellom vass temperaturen og luft temperaturen var positiv. Tilfellet er såleis teoretisk mogleg.



Figur 5.6 Kritisk temperatur for mogleg danning av frostrøyk (kurve) jamført med dei aktuelle observasjonane av frostrøyk over Bandak vintrane 1996/97 – 1999/00 (punkt). Punkt til venstre for kurva er teoretisk moglege tilfelle av frostrøyk. Figuren gjeld berre i dei tilfella at temperaturen i vassflata er 0°C.

6 Testing og utvikling av frostrøykmodell

6.1 Om korleis frostrøyken ter seg i terrenget

Frostrøyk er ei form for tåke som kan koma i stand over isfritt vatn. Fenomenet er vanlegast om hausten, og om vinteren over opne straumdrag i elvar eller over isfrie fjordar.

Luft inneheld vatn både i form av vassdamp og ørsmå vassdropar. Di høgare temperaturen er i luftmassen, di meir vassdamp kan lufta innehalde. Når lufta har teke opp i seg så mykje vassdamp som mogleg, seier ein at ho er metta. Ved -20 °C tilsvarar det om lag 1 g/m³ luft, ved +20 °C kan same luftmassen innehalde 17 g vassdamp!

Dei ørsmå vassdropane er for små til at ein kan sjå kvar einskild av dei, men samla set dei ned sikta og dannar tåke. Det er altså dråpane og ikkje dampen som er sjølve frostrøyken og som i einskilde tilfelle kan gjera menneskelege aktivitetar vanskelegare. Som døme kan nemnast bilkøyning i myrke når frostrøyken breier seg innover vegbanen. Da er ofte fjernljuset på bilen til liten nytte og farten må reduserast. I spesielt kaldt vær kan også frostrøyk innehalde iskrystallar som også set ned sikta.

Frostrøyk kan berre koma i stand når den isfrie vassflata er varmare enn den omgjevande lufta. Det vil da alltid fordampe frå vassflata samstundes som lufta over vatnet

blir vermt opp slik at ho letnar. Dermed blir det sett i gang ein vertikal luftstraum over vassflata, og luft som før låg over land, sig utover vatnet. Når denne lufta kjem i kontakt med vatnet, kan ho i sin tur bli overmetta med vassdamp slik at ein kan observere frostrøyk. Da blir strøymingsbiletet over det opne vatnet gjort synleg i det ein kan fylgje vassdropane (d.e. frostrøyken) på veg oppover. Det syner seg at rørsle er mykje kaotisk.

Da styrken av frostrøyken kan variere svært mykje frå tilfelle til tilfelle, vil også ulempene med frostrøyken variere. Som eksempel kan vi tenkje oss eit tynt lag av frostrøyk 1 m over vatnet. Mange vil tykkje at slik frostrøyk ikkje er til noka ulempe, kanskje verkar han heller livgjevande for landskapet. Tettare frostrøyk, derimot, som i mange tilfelle legg seg over landskapet fleire ti-metrar tjukk, blir av dei aller fleste rekna som ei alvorleg miljølempe. Difor er det meningsfullt å klassifisere frostrøyken etter kor mektig han er, og om han breier seg vidare enn det isfrie området der han blir til.

6.2 Testing av eksisterande frostrøykmodell

Det har vore utvikla frostrøykmodellar av ulike typar, analytiske (Økland & Gotaas 1995) og kvasiempiriske (Nordli 1988). Modellane dekkjer eit viktig bruksområde mellom anna fordi dei kan vera eit verkty for å prognosere framtidig frostrøyk. Meteorologiske parametrar går inn i modellane. For å få brukt dei, må ein kjenne dei inngangsdata som krevst. Om ein vil bruke modellane til varsel av frostrøyk i vassdragsreguleringssaker, kan det hende at inngangsdata er kjende frå tidlegare målingar, som tilfellet var i Sauda (Nordli 1992). Om ikkje inngangsdata er kjende, kan dei skaffast ved å setja i gang målingar på den aktuelle staden.

Å skaffe seg kunnskap om frostrøyk på staden ved direkte observasjonar, er derimot ofte ikkje mogleg. Er isen på elvar eller vatn så stabil at frostrøyk nesten ikkje blir observert, er det fyrst etter at reguleringa eventuelt er gjennomført og isdekket er endra, at ein kan få informasjon om frostrøyken direkte ved observasjonar. Men informasjon i ettertid kan jo ikkje vera med på å gje premisser for avgjerdene om vassdraget skal byggjast ut eller ikkje. Liknande vanskar støyter eit kraftselskap på om det ynskjer å effektregulere utover det som kan kallast normal drift. Ei auka effektkøyring kan lett støyte mot konsesjonsvilkåra. Ofte vil òg installasjonen ved kraftverket vera for liten til at den framtidige køyrestrategien kan prøvast. Også i slike tilfelle kan frostrøykmodellar kombinert med eit estimat av isfritt område vera vegen å gå for prognosemakarane.

I modellane er det teke omsyn til lokalklimaet, dvs. at dei klimaparametrane som påverkar frostrøykdanninga mest, går inn i modellen. I praksis har det vist seg at temperatur er den langt viktigaste parameteren, som ein også kunne vente ut frå teorien om frostrøykdanning. Dinest kunne ein tenkje seg at den relative råmen i lufta ville spela ei viktig rolle, i alle fall når temperaturen ikkje var for låg, sjå figur 5.3 eller 5.6. I praksis har det vist seg at råmen i lufta har hatt lite å seia for frostrøykdanninga, medan stabiliteten i lufta er viktig (eller eit anna mål for vertikal stabilitet, som t.d. skydekket (Rodhe 1965, Nordli 1988)). Uheldigvis er det ingen stasjon som observerer skydekket nær Våmarvatn eller Bandak.

Basert på materialet frå dei fyrste driftsvintrane vart frostrøykfrekvensen over Våmarvatn jamført med den modellerte (Nordli 1997, 1999). Dette arbeidet kan no vidareførast med tilleggsdata frå siste prosjektvinteren. Modellen er brukt i si enklaste form der einast lufttemperatur går inn som parameter. I praksis vart jamføringa gjort ved at temperaturskalaen vart delt inn i intervall på 2 gradar og frekvensen, f_i , i intervallet i estimert ved:

$$(1) f_i = \frac{s_i}{n_i}$$

der s_i er talet på frostrøykobservasjonar og n_i er talet på alle observasjonar i temperaturintervallet i .

For heile driftsperioden (1996/97 – 1999/00) er talet på observerte frostrøyktilfelle, S_{obs} , gjeve ved:

$$(2) S_{obs} = \sum_{i=1}^N s_i = \sum_{i=1}^N n_i \frac{s_i}{n_i} = \sum_{i=1}^N n_i f_i$$

der N er talet på temperaturintervall. I analogi med (2) kan frostrøyken gjennom heile driftsperioden estimerast ved:

$$(3) S_{est} = \sum_{i=1}^N n_i \Pr\{s | i\}$$

der $\Pr\{s | i\}$ er sannsynet for frostrøyk i temperaturintervallet i gjeve i modellen.

I dei fire driftsvintrane vart det ved Våmarvatnet i alt godkjent 76 observasjonar av frostrøyk, dei fleste av desse var synlege på bilete, men det fanst òg nokre få der frostrøyken ikkje kunne identifiserast på bilete, anten fordi han var for svak eller fordi biletkvaliteten var for dårleg.

Om ein sorterer frostrøyken etter sikt og høgd i samsvar med klassifiseringssystemet i tabell 5.1, finn vi at av dei totalt 76 tilfella av frostrøyk, fordelte 48 seg på klasse 1, 15 på klasse 2, 12 på klasse 3 og berre eitt tilfelle på klasse 4, jamfør tabell 6.1a.

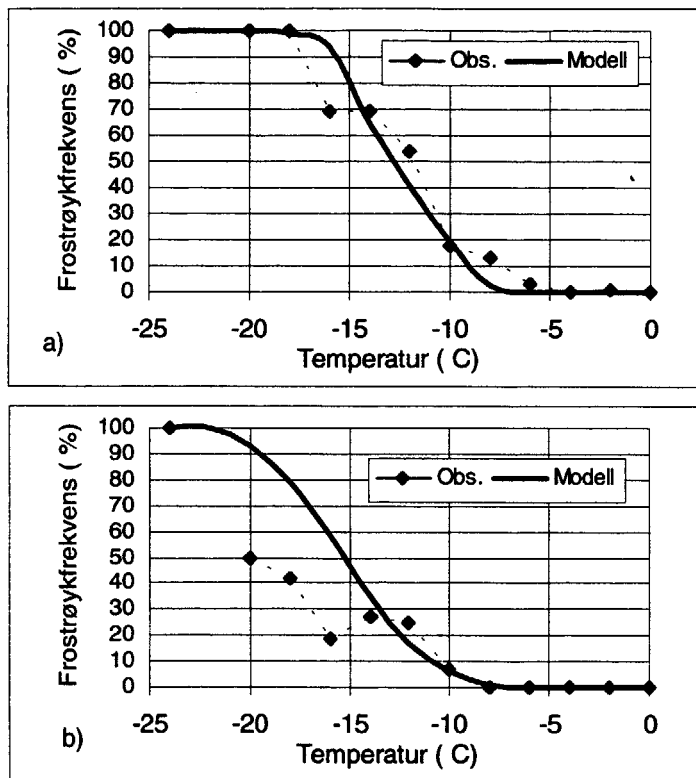
Tabell 6.1, del a og b. Observasjonar av frostrøyk ved Våmarvatn dei tre fyrste driftsvintrane. I a-delen er frostrøyken fordelt på klassar, definert i tabell 5.1. I b-delen er frostrøyken talt opp kumulativt. Symbolet \geq klasse 3 tyder altså frostrøyk av klasse 3 eller sterkare. Frostrøyk \geq klasse 1 tyder dermed all frostrøyk som kan observerast.

	Vinter	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
a	1996/97	21	3	6	1
	1997/98	7	6	0	0
	1998/99	12	4	5	0
	1999/00	8	2	1	0
	Sum	48	15	12	1
	Vinter	\geq klasse 1	\geq klasse 2	\geq klasse 3	\geq klasse 4
b	1996/97	31	10	7	1
	1997/98	13	6	0	0
	1998/99	21	9	5	0
	1999/00	11	3	1	0
	Sum	76	28	13	1

Tabell 6.1 viser at den observerte frostrøyken har vore ujamt fordelt gjennom dei fire vintrane. I den fyrste driftsvinteren vart det observert 31 tilfelle av frostrøyk og i den tredje 21, medan dei to vintrane 1997/98 og 1999/00 var svært milde. Då vart det observert berre 13 og 11 tilfelle av frostrøyk.

Frekvensen f_i vart plotta på figur 6.1 saman med modellresultata. Figuren viser at det er svært godt samsvar mellom modell og observasjonar. Modellen står seg dermed godt mot denne testen og viser at han verkeleg kan overførast til andre stader enn der han er utvikla. Ved bruk av formel (3) kunne talet på frostrøyktilfelle for heile driftsperioden estimerast. Resultatet vart 72 estimerte tilfelle mot 76 observerte, eller eit avvik på 4 tilfelle, dvs. berre 5 %.

Slik modellen er presentert på figur 6.1a, femner han særst ulike tilfelle av frostrøyk frå dei veikaste til dei mest utvikla. For å konsentrere merksemda berre på velutvikla frostrøyk, har vi sortert ut alle tilfelle av frostrøyk av klasse 1, sjå tabellane 5.1 og 6.1. Dermed går 48 tilfelle ut og vi står att med 28. På figur 6.1b er modell og observasjonar jamførte for all frostrøyk av klasse 2 eller sterkare.



Figur 6.1 Frostrøykfrekvens ved Våmarvatn jamført med ein kvasiempirisk modell av Nordli (1988). a) Alle klassane av frostrøyk. b) Berre klassar av frostrøyk ≥ 2 .

Også for frostrøyk av klasse 2 eller høgare ser modellen ut til å høve godt opp til -15 °C, men for lågare temperaturar enn -15 °C gjev modellen for høgt sannsyn for frostrøyk. Estimering av frostrøyk sterkare enn klasse 1 for alle driftsvintrane gav 45 tilfelle mot 28 observerte, eller ei overestimering på heile 61%. Det er i intervalla med midtpunkt -16 , -18 og -20 °C at observert frekvens er vesentleg lågare enn modellert. Det er berre 41 tilfelle av temperaturar i desse intervalla i dei fire driftsvintrane. Det kan dermed hende at også tilfeldige variasjonar kan ha spela ei rolle, og det er ein viss sjanse for at mistilpassinga berre er tilsynelatande.

Ei anna forklaring kan vera at ved sterk kulde blir det opne vassarealet mindre slik at produksjonen minkar. Det er då mogleg at frostrøyken tynnast ut, slik at frostrøyken lettare blir plassert i klasse 1 heller enn til høgare frostrøykklasse. Der modellen var utvikla, var minstekravet til frostrøyken frå klasse 2 og oppover, at han skulle vera "velutvikla", dvs. at han skulle vera så tett at ein ikkje skulle kunne sjå igjennom han frå avstand.

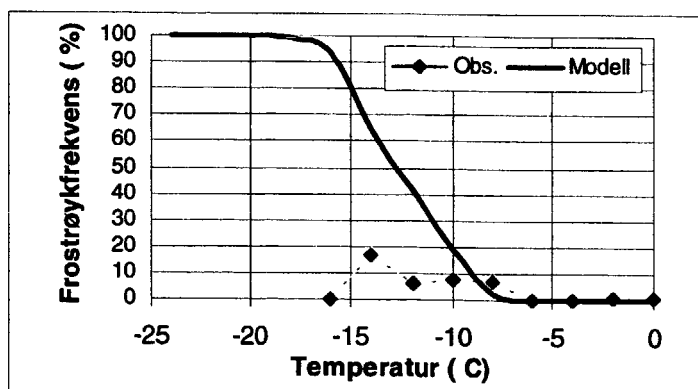
For å teste denne hypotesen vart vassarealet klassifisert på grunnlag av fotografi. Klasse 0 og 1 i tabell 8.1 vart slegne saman og kalla gruppe A, og klasse 2 og 3 vart slegne saman og kalla gruppe B. Denne inndelinga fører til at i gruppe A var anten vatnet isfritt eller det fanst litt is i langs strendene, medan det i gruppe B var is alle stader langs båe strendene, og isen på austsida nådde minst til Eidsborgodden. Berre dagar med temperatur $-14,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller lågare vart tekne med i granskinga.

Modellen vart brukt på båe gruppene og samla frostrøykmengd vart estimert: For det største vassarealet, gruppe A, vart det estimert 13 tilfelle, medan det vart observert 9, som svarar til ei overestimering med ein faktor 1,4. For det minste vassarealet vart det estimert 19 tilfelle, medan det vart observert 7, eller ei overestimering med ein faktor 2,8. Det var altså ein tydeleg skilnad på dei to gruppene, men observasjonsmaterialet er lite. Det vart difor testa ved hjelp av ein t-test om skilnaden mellom gruppene var signifikant. Skilnaden vart funnen å vera signifikant ved nivået 0.02. Det knyter seg noko uvisse til nivået fordi dataa ikkje var heilt normalfordelte.

Granskinga ovafor er altså ein sterk indikasjon på at årsaka til at modellen ikkje høver så godt til å estimere frostrøyken av høgre klasse enn 1, er å finne i dimensjonane på sjølve vassyta. Sjølv om frostrøykproduksjonen er intens, blir frostrøykkjegla ofte for tynn til å blokkere utsynet ut til stranda på andre sida av vatnet når den opne råka krympar i streng kulde. Om ein berre ser på dei tilfella at vassyta er stor, altså gruppe A, høver modellen mykje betre men også her er den ein tendens til underestimering. Materialet er så lite at skilnaden mellom modell og observasjonar i dette tilfelle ikkje er statistisk sikkert, og kan altså vera kome i stand ved rein slump.

Korleis storleiken på den opne råka verkar inn på frostrøyken, vil bli vidare drøfta frå ein noko annan synsvinkel i kapittel 8.

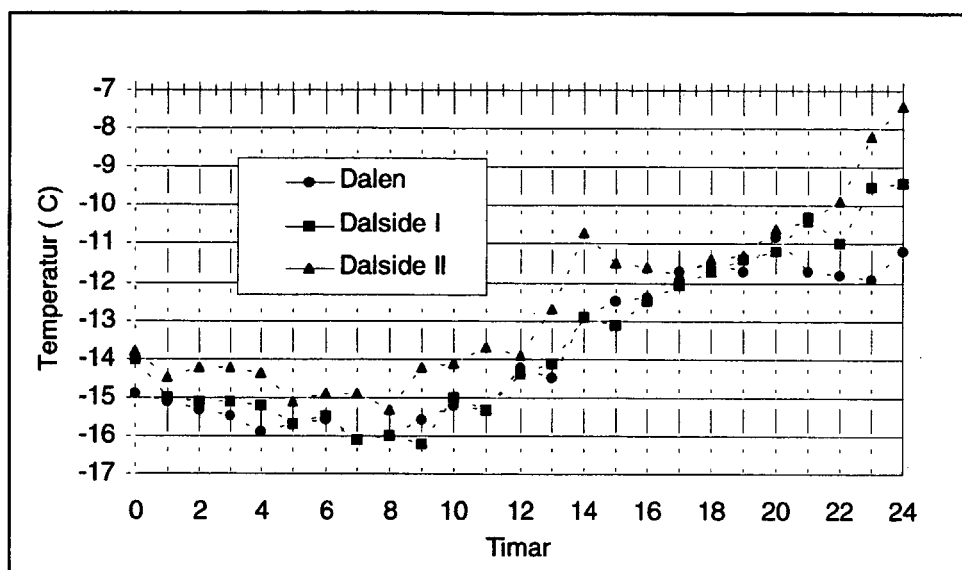
For Bandak vart det gjennom dei fire vintrane berre observert 9 godkjende tilfelle av frostrøyk, og av desse var alle heller veike. Figur 6.2 viser då også at den observerte frekvensen avveik sterkt frå modellen. Brukar ein likning (3) til å estimere talet på tilfelle av frostrøyk i dei 4 driftsvintrane, får ein til saman 18 tilfelle eller det dobbelte av det som er observert. Det vart altså observert over 8 gonger så mykje frostrøyk ved Våmarvatnet som ved Bandak. Også modellen gjev mykje meir frostrøyk ved Våmarvatnet enn ved Bandak. Høyetalet er så stort som 4, men altså likevel mykje mindre enn det observasjonane gav.



Figur 6.2 Frostrøykfrekvens ved Bandak jamført med ein kvasiempirisk modell av Nordli (1988).

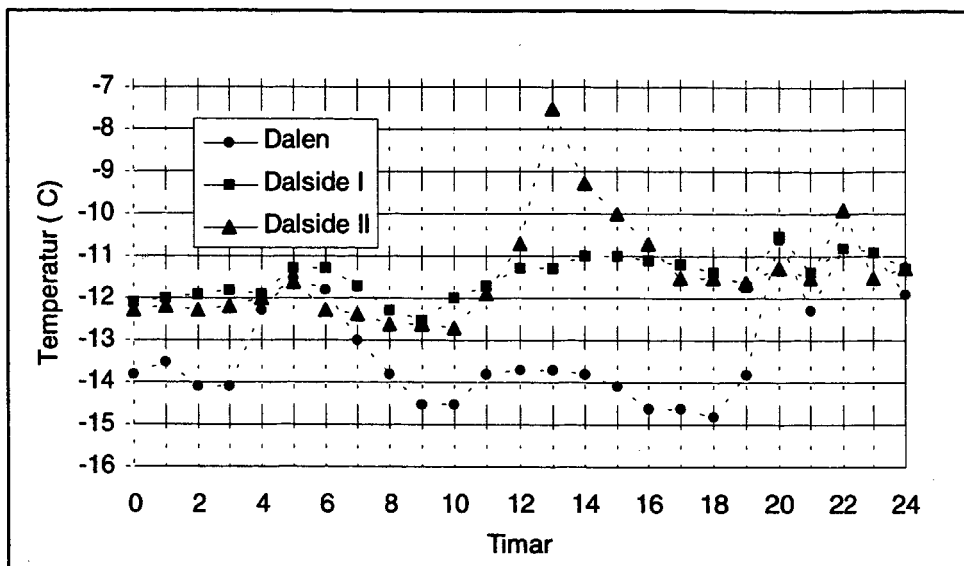
For å koma nærare inn på årsaka til skilnadene mellom Vamarvatn og Bandak, skal vi sjå på stabiliteten i lufta under kaldt vintervêr, fyrst ved eit par døme henta frå mælingane ved Bandak. Der var det gjennom prosjektperioden mælingar i dalbotnen på Tippen 74 m o.h., i dalsida 152 m o.h., kalla Dalside I, og fyrste prosjektvinteren også 261 m o.h., Dalside II.

Den kaldaste vêrsituasjonen på Dalen under heile observasjonsperioden, vintrane 1996/97 – 1999/00, var den 20. desember 1996. Likevel var det ingen frostrøyk denne dagen. Temperaturgangen gjennom døgnet er vist på figur 6.3. Lufta, særleg i den nedste delen av dalen, hadde liten eller ingen vertikal stabilitet, noko som ikkje er vanleg i ein frostrøyksituasjon. Då er vanlegvis temperaturen vesentleg lågare i dalbotnen enn i dalsida. Kaldluft har ikkje danna seg i dalbotnen. Lufta var tørr, berre 60 % relativ råme og vinden var opp mot 3 m/s.



Figur 6.3 Temperaturgangen gjennom døgnet 20. desember 1996 representert ved tre mælepunkt: i dalbotnen ved 33040 Dalen - Tippen, i dalsida ved Villaen om lag 80 m over Bandak (Dalside I) og dessutan i dalsida 190 m over Bandak (Dalside II). Det var ingen frostrøyk denne dagen.

Den 10. januar 1997 var det derimot frostrøyk over Bandak endå om temperaturen då var høgare enn i det førre tilfelle, om lag -14°C , sjå figur 6.4. Observatøren melder om litt frostrøyk kl 08⁴⁵. Klokka 16, når observatøren igjen fotograferer, har frostrøyken forsterka seg utan at temperaturen har sokke. Stabiliteten i lufta har derimot auka, slik at det kan vera ei forklaring på den meir intensive frostrøyken. Differansen mellom dei to dalsidestasjonane viser at det berre er nær dalbotnen at lufta er stabil, dvs. at det er ein grunn inversjon i dalen. Observasjonane viser at inversjonen ikkje når høgare enn til dalsidestasjon I som ligg om lag 150 m o.h. (det er tilsynelatande stabil luft ved høgst dag, men dette må ha si årsak i at sola når det øvste mælepunktet og er såleis eit reint dalsidefenomen).



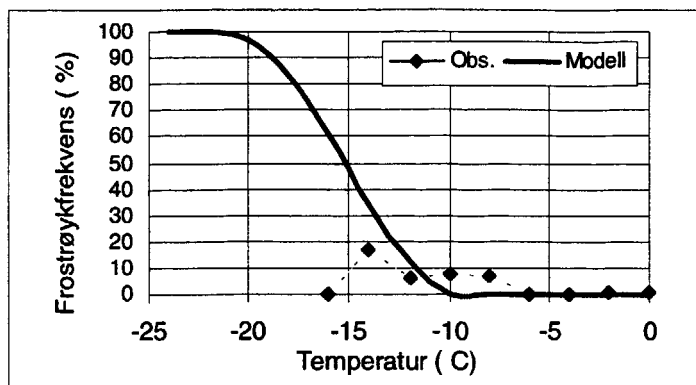
Figur 6.4 Temperaturgangen gjennom døgnnet 10. januar 1997 representert ved tre mælepunkt: I dalbotnen ved 33040.Dalen - Tippen, i dalsida ved Villaen om lag 80 m over Bandak (Dalside I) og dessutan i dalsida 190 m over Bandak (Dalside II).

I prosjektperioden var det i alt fire tilfelle der temperaturen ved fotograferingstidspunktet var lågare enn -14 °C; og berre eitt av desse hadde frostrøyk. Dei frostrøykfrie tilfella hadde mykje sams med det tilfellet som er framstilt på figur 6.3 ved at lufta var turr (låg relativ råme) og at ho var lite stabil eller labil med omsyn til vertikal strøyming. Det eine tilfellet der det vart observert frostrøyk, skil seg frå dei tre andre ved at lufta i dalen frå nivået ved dalsidestasjon I til dalbotnen var stabil, dvs. at det låg ein temperaturinversjon nedst i dalbotnen, figur 6.4.

6.3 Tilpassing av eksisterande modell

I fylgje frostrøykmodellen (Nordli 1988) er sjansen for frostrøyk større di stabilare lufta er. I ein dal der kaldluft lett samlar seg, er stabiliteten godt korrelert med skydekket slik at når det er lite skyer, er lufta stabil, men når det er mykje skyer, er ho ikkje det. Ved å ta i bruk skydekkeparameteren i modellen, blir det indirekte teke omsyn til luftstabiliteten. For området ved Dalen fungerer ikkje dette godt, fordi kaldlufta tydelegvis blir sterkt omrørt i det ho fell ned i dalen og strøymar utover Bandak. Inversjonar har vanskeleg for å byggje seg opp.

For å få modellen til å korrigere for at lufta i Dalen sjeldan er stabil, vart indeks C i modellen teken i bruk og skydekket vart sett lik åtte åttedalar, altså heilt overskyt. Modell og observasjonar vart deretter jamførte, sjå figur 6.5. Av figuren ser vi at samsvaret mellom modell og observasjonar er tolleg bra, når vi tek omsyn til det vesle materialet som finst, berre 9 observasjonar av frostrøyk. Resultata tyder på at modellen kan brukast også for stader som Bandak der kaldluft ikkje ofte samlar seg i dalbotnen, men då må modellen modifiserast noko. Det burde lagast ein ny frostrøykindeks for stader der kaldlufta oftast blir gjennomblanda i det ho blir drenert ned gjennom bratte skråningar, noko som hindrar at lufta blir stabil i det nedste laget. Likevel er materialet som vart samla inn ved Bandak for lite til at ein ny frostrøykindeks kunne utformast. Dei ekstraordinært milde vintrane i prosjektperioden må ta skulda for det.



Figur 6.5 Frostrøykfrekvens ved Bandak jamført med ein modell av Nordli (1988). I modellen vart indeks C valt med konstant skydekke 8.

5 Frostrøykfrekvens vurdert opp mot eit scenario for klimautviklinga i Noreg

Så sant det eksisterer isfritt vatn, er det fyrst og fremst eit spørsmål om lufttemperaturen er låg nok om frostrøyk skal kunne bli danna. Resultat frå globale klimamodellar viser at verda er på veg inn i eit varmare klima, og spørsmålet er i kva monn det kjem til å påverke frostrøyken over norske fjordar og vassdrag. Etter som frostrøyken er rekna for eit miljøproblem, vil eit mildare vinterklima i denne samanhengen føre til ei betring av miljøet.

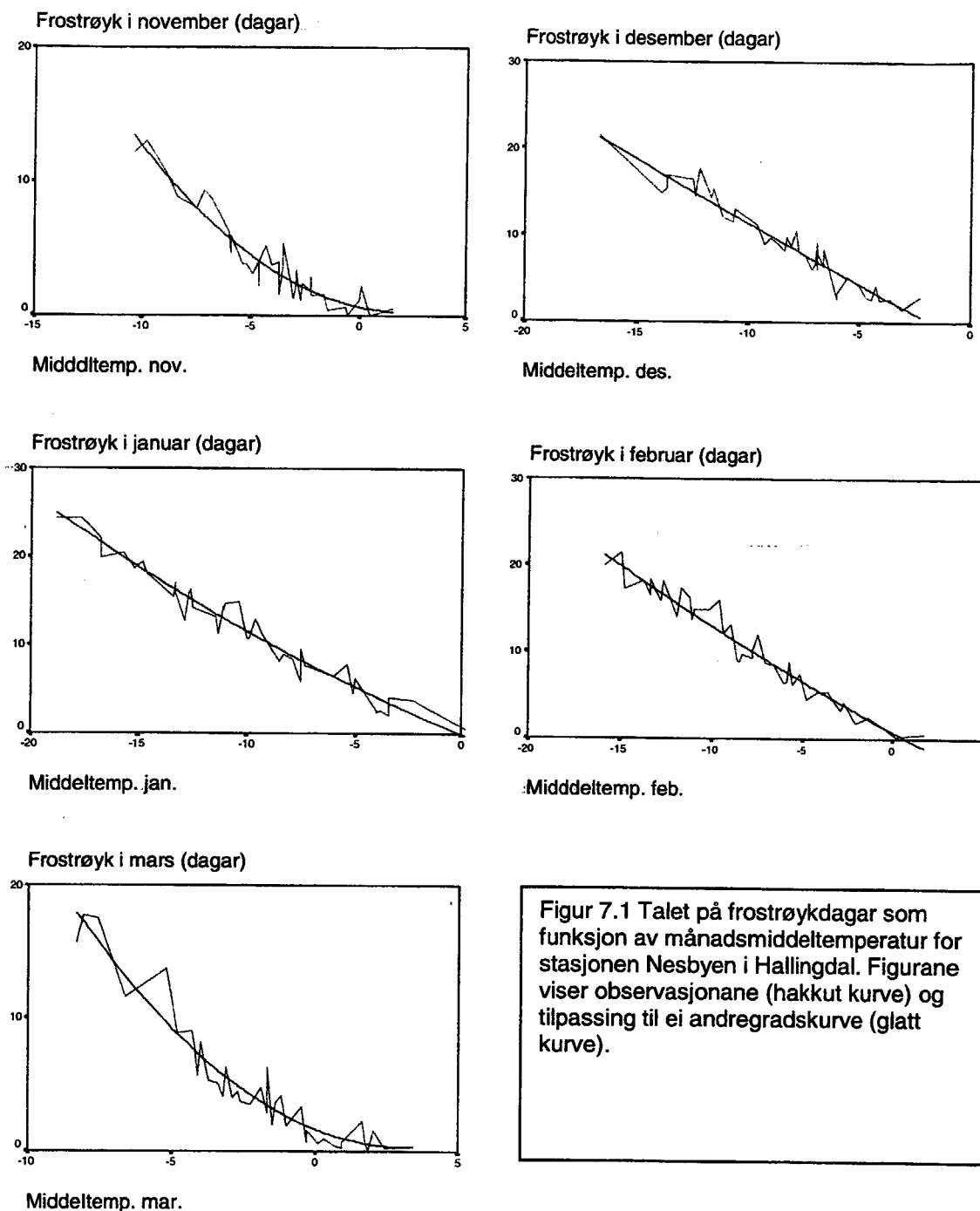
Kopla atmosfære/havmodellar er det mest avanserte verktøyet til å estimere global oppvarming. Den modellen som her skal nyttast er henta frå Max Plank-instituttet i Tyskland, den såkalla ECHam4/OPYC3 (Röckner et al. 1999). I integrasjonen er forutan klimagassane også troposfærisk ozon med i tillegg til partiklar (aerosol). Partiklane påverkar solljoset både direkte og indirekte. Indirekte påverknad kjem i stand ved at partiklane påverkar skydekket.

Opplysinga til modellane er enno grov. Likevel kan klimaet på global skala vera godt modellert utan at modellane gjev gode resultat på mindre skala, d.e. regionalt eller lokalt. På mindre skala kan resultatet betrast ved å ta i bruk såkalla nedskalering. Dette er gjort i prosjektet RegClim (Iversen et al. 1996). I denne rapporten hentar vi scenario som er nedskalerte ved ein empirisk metode. Det blir då fyrst funne statistiske samanhengar mellom lufttemperatur og dei storskala trykk- og temperaturfelta. Dinest blir desse samanhengane brukte på dei simulerte felta frå klimamodellane for å estimere lokale endringar.

I klimamodellen er det lagt inn visse føresetnader om framtidig utslepp av klimagassar. I prinsippet gjev difor ikkje modellkøyringa noko varsel for framtida, men er heller eit uttrykk for det som kan hende, eit såkalla scenario. Det scenariet som er valt her, er det såkalla IS92, omtala i IPCC-rappoeten på side 71 (Houghton et al. 1995). Det ligg middels høgt når det gjeld utslepp av klimagassar av dei scenario som der er med. Nedskaleringa er gjort ved DNMI's klimaavdeling (Benestad 2000) og handlar om simuleringar for perioden 1860 - 2049.

Til arbeidet med frostrøykscenario er valt ut to kalde vinterklima, eitt på Austlandet representert ved Nesbyen, og eitt i Nord-Noreg representert ved Karasjok. Eit ekstra problem er at frostrøykmodellen krev daglege verdiar av temperatur medan nedskaleringa av simuleringane frå ECHam4-modellen er gjort på månadsbasis. Skal dei nedskalerte simuleringane kunne brukast, må det finnast ein samanheng mellom månadsmiddeltemperatur

og talet på frostrøykdagar¹. Dette vart granska både for Nesbyen og Karasjok i perioden 1956 – 1999 for Nesbyen og i perioden 1957 – 1999 for Karasjok. For Nesbyen vanta det om lag eitt år med data, slik at perioden for bae stasjonane vart om lag 43 år.



For Nesbyen er samanhengen mellom frostrøykdagar og middeltemperatur vist på figur 7.1 for kvar måned i sesongen november – mars. Observasjonane kunne bli bra representerte ved

¹ Med omgrepet frostrøykdag meiner ein her situasjonen ved morgonobservasjonen kl 07. Gjennomsnittstemperaturen ved det tidspunktet ligg då nær gjennomsnittleg døgminimum. Ofte kan temperaturen stige utover dagen og frostrøyken løyse seg opp, men dagen blir likevel i dette arbeidet registrert som ein frostrøykdag. Andre gonger kan det vera frostrøyk seinare på dagen enn ved morgonobservasjonen, men dette blir likevel ikkje rekna som nokon frostrøykdag.

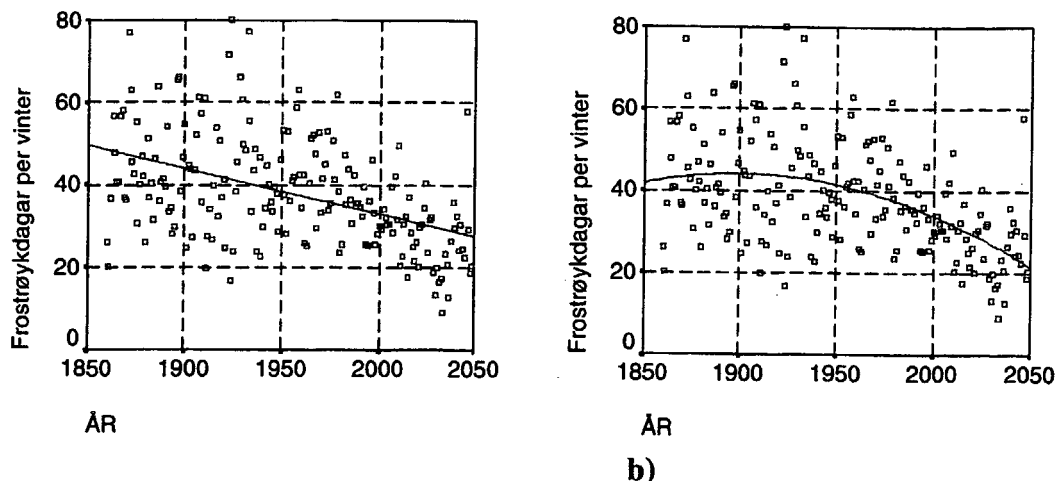
ei andregradskurve. Krumminga var sterkast i dei mildaste månadene mars og november. Det har samanheng med at det nesten ikkje er frostrøyk i mildt vintervêr, og frostrøykfrekvensen er då lite kjensleg (sensitiv) for små temperaturendringar. Elles i året var samanhengen tilnærma lineær og i februar og desember var ikkje koeffisienten framføre andregradsleddet signifikant ulik null, sjå tabell 7.1 for Nesbyen, alle klassar. Regresjonskoeffisienten var gjennomgåande høg i alle månader, mellom 0.95 og 0.98, slik at minst 90 % av variansen vart godtgjort ved regresjonen.

Tabell 7.1 Koeffisientar, a_2 og a_1 , framføre andre- og fyrstegradsleddet til ei kvadratisk regresjonslikning mellom frostrøykdagar per månad og månadmiddeltemperaturen. Konstantleddet og regresjonskoeffisienten er markerte med a_0 og reg. Ei stjerne* etter eit tal, tyder signifikans på nivå 0,05 og to stjerner** på nivå 0,01. Tal utan merking er ikkje signifikante.

Stad	Klasse	Månad	a_2	a_1	a_0	reg
Nesbyen	alle	jan.	0.0192*	-0.9651**	-0.530	0.98**
Nesbyen	alle	feb.	0.0115	-1.1005**	0.768	0.97**
Nesbyen	alle	mars	0.1342**	-0.8505**	1.609**	0.96**
Nesbyen	alle	nov.	0.0836**	-0.3601**	0.657	0.95**
Nesbyen	alle	des.	0.0067	-1.2920**	-2.205	0.97**
Nesbyen	≥ 3	jan.	0.0442**	0.0682	0.304	0.96**
Nesbyen	≥ 3	feb.	0.04425**	-0.0301	0.198	0.94**
Nesbyen	≥ 3	mars	0.0793**	-0.1602**	0.083	0.95**
Nesbyen	≥ 3	nov.	0.0435**	0.0153	0.038	0.93**
Nesbyen	≥ 3	des.	0.0388**	-0.0371	-0.252	0.97**
Karasjok	alle	jan.	-0.0204*	-1.6934**	-4.608	0.97**
Karasjok	alle	feb.	-0.0125*	-1.3861**	-2.321	0.97**
Karasjok	alle	mars	0.0021	-1.3309**	0.240	0.96**
Karasjok	alle	nov.	-0.0111*	-1.3246**	-1.794*	0.96**
Karasjok	alle	des.	-0.0051	-1.2494**	-1.706*	0.97**
Karasjok	≥ 3	jan.	0.0210*	-0.3150	0.158	0.97**
Karasjok	≥ 3	feb.	0.0036	-0.7659**	-2.544*	0.97**
Karasjok	≥ 3	mars	0.0190*	-0.6937**	-1.095*	0.97**
Karasjok	≥ 3	nov.	0.0337	-0.1802**	0.077	0.97**
Karasjok	≥ 3	des.	0.0007	-0.9949**	-4.6550**	0.98**

Scenario-temperaturane (simuleringane) frå prosjektet RegClim er gjeve i form av anomaliar. Desse vart omrekna til realistiske temperaturar ved å bruke ulike, konstante, justeringsledd gjeldande for kvar av dei fem månadene. Justeringsledda vart funne ved å setja middelet av simulert temperatur i referanseperioden 1956 – 1999 (for Karasjok 1957 – 1999) lik middelet av den verkelege temperaturen i referanseperioden. Dermed kunne dei simulerte temperatur-anomaliane bli omrekna til simulerte temperaturar i perioden 1860 – 2049.

For Nesbyen er dei simulerte temperaturane viste som ein tidsserie på figur 7.2. Trenden i perioden er på figur 7.2a representert ved ei lineær regresjonsline, og på figur 7.2b ved ei andregradskurve. Visuelt tykkjast andregradskurva å gje den beste tilpassinga, og det er også resultatet målt med eit objektivt mål. Regresjonskoeffisienten var 0,50 for andregradskurva mot 0,45 for den lineære trendlina. Båe var høgst signifikante ulik null.



a)

b)

Figur 7.2. Talet på frostrøykdagar i året ved Nesbyen basert på scenario frå ECHam4-modellen og frostrøykmodellen (Nordli 1988) for all frostrøyk utan omsyn til styrke og utbreiing, a) lineær regresjonsanalyse og b) kvadratisk regresjonsanalyse.

Det viser seg å ha mykje å seia kva slags tolking som blir valt når trenden i serien skal talfestast. Ved bruk av trendlina (sjå figur 7.2a) blir resultatet at det gjennomsnittlege talet på frostrøykdagar i Nesbyen går ned frå 34,5 dagar i 1999 til 28,9 dagar i 2049, eller ein nedgang på 5,6 dagar. Ved bruk av andregradskurve (sjå figur 5,2b) blir resultatet ein nedgang frå 33,7 dagar i 1999 til 21,3 dagar i 2049, eller ein nedgang på 12,4 dagar.

Også for Karasjok er det ein nøye samanheng mellom månadsmiddeltemperatur og talet på frostrøykdagar i månaden (ikkje vist). Staden har eit vesentleg kaldare klima enn Nesbyen, og i mange månader er det så kaldt dag etter dag at det nesten alltid er frostrøyk. Frostrøykstatistikken endrar seg då lite ved små endringar i temperaturen. Resultatet blir at samanhengen mellom middeltemperatur og talet på frostrøykdagar best blir representert med ei andregradskurve med negativ koeffisient framføre andregradsleddet, dvs. motsett krumming av det vi såg for Nesbyen, sjå tabell 7.1 for Karasjok alle klassar. For å finne endringa i talet på frostrøyktilfelle per år, vart same prosedyre som for Nesbyen fylgt. Resultata er førde inn i tabell 7.2.

Tabell 7.2 Talet på frostrøykdagar basert på eit scenario frå ECHam4-modellen. Modellresultata er nedskalerte til vårt område og brukte vidare i frostrøykmodellen. Endringa frå år 1999 til 2049 er basert på tilpassing av ei trendkurve.

	År 1999 (dagar)	År 2049 (dagar)	Endring (dagar)	Endring (%)
Nesbyen, all frostrøyk	34	21	-12	-35
Nesbyen, frostrøyk \geq klasse 3	9	3	-6	-67
Karasjok, all frostrøyk	67	59	-8	-12
Karasjok, frostrøyk \geq klasse 3	38	32	-7	-18

I frostrøykmodellen er det som nemnt definert gradar av frostrøyk. Kriteriet for klasse 3 eller større er at frostrøyken er så mektig at han kan breie seg utover frå den opne råka og koma inn over islagt område. Dermed kan han også nå dit folk bur og vera til ulempe. Ved Våmarvatn vart i alt 13 tilfelle av slik frostrøyk observert i dei fire vintrane prosjektet vara.

Frostrøyk av klasse 3 eller sterkare vart skild ut både for Nesbyen og Karasjok, og ved same prosedyre som før vart scenario for frostrøyk simulert fram til 2049. Samanhengen mellom

talet på frostrøyktilfelle og månadsmiddeltemperatur er vist i tabell 7.1 og resultatene av simuleringane er vist i tabell 7.2.

Tek ein med all frostrøyk som kan observerast, viser det seg at det blir om lag 12 frostrøykdagar mindre i 2049 enn det er ved Nesbyen i dag, eller 6 dagar mindre om berre dei mektigaste tilfella av frostrøyk blir talde med. Det er ein nedgang på 35 %, og klimaendringa går ekstra hardt utover dei mektigaste tilfella som blir reduserte til berre ein tredel. For eit så kaldt vinterklima som Karasjok, kan det bli endringar i året på mindre enn 10 dagar, og i prosent blir tala 12 og 18, dvs. mykje mindre prosentvis nedgang enn i Nesbyen.

Det er viktig å vera klår over at desse tala har som føresetnader at det på staden eksisterer eit relativt stort område med oppe vatn som ikkje fryser til sjølv i streng vinterkulde. I Karasjok er det slett ikkje tilfelle, men resultatene kan stå som eit døme på korleis situasjonen ville vere med utslepp av varmt magasinvatn i eit slikt vinterklima.

Ein ser ved somme utslepp at den opne råka blir mykje innskrenka i streng kulde. I mange tilfelle der frostrøyken kunne ha utvikla seg til mektige frostrøykteppe, blir han sterkt redusert både i tettleik og omfang på grunn av for lita vassyte. Ei råk som fryser til i streng kulde, kan i eit framtidsklima halde seg meir open og på det viset vera med på å motverke noko av den nedgangen i talet på frostrøykdagar som eit mildare klima skaper.

Det må elles understrekast at dei endringane som her er synte, berre er scenario. Det vil seia at det er lagt inn visse føresetnader om klimagassutslepp. Om føringane for modellen ikkje heilt held stikk, kan ein ikkje vente at resultatene blir rette. Det ligg dessutan uvisse i kor godt klimamodellen speglar røynda, noko som kunne ha vore granska dersom ein hadde hatt eit heilt ensemble av køyringar.

8 Frostrøyk i effektregulerte vassdrag

Effektregulering påverkar arealet av oppe vatn ved at køyringa blir ujamn. Det kan både føre til meir is når kraftverket står, og mindre is når kraftverket går. I utgangspunktet må ein likevel vente at kraftverket blir køyrt hardast i kuldeperiodar, altså nett i dei situasjonane det også lett dannar seg frostrøyk.

Effektregulering er også regulering på døgnbasis. Kraftverket kan stå om natta når straumprisane er lågast, og bli køyrd hardt om dagen når dei er høgast. I stansen om natta kan den opne råka fryse til, og når ho fyrst er tilfrosen, kan isen tola ein viss overtemperatur før vatnet opnar seg på nytt (Kvambekk 2000). Det fører til at i alle fall i streng kulde, dvs. nett dei situasjonane det er aktuelt med frostrøyk, blir det mindre oppe vatn med effektregulering enn ved konvensjonell drift. Dette gjeld altså ikkje berre om natta når kraftverket står.

Under streng vinterkulde, kan det såleis bli både større og mindre areal oppe vatn ved effektkøyring enn ved sesongkøyring alt etter om kraftverket er stengt av om natta eller ikkje. Då frostrøyken berre blir danna over oppe vatn, vil dermed effektregulering verke inn på frostrøykproduksjonen. Eit anna spørsmål er om tettleiken på frostrøyken er avhengig av arealet. Om det er slik, kan effektregulering føre til at frostrøyk blir gruppert annleis i frostrøykclassane enn under jamn køyring, slik at fordelinga mellom classane blir endra.

Isarealet rundt utlaupet frå Tokketunnelen vart kartlagt under prosjektet gjennom alle fire vintrane, og iskart vart sende til NVE. No viser det seg på frostrøykbileta at det opne vassarealet var i stendig endring, slik at det arealet som til kvar tid var islagt var vanskeleg å fange opp med ei konvensjonell iskartlegging. Difor tok ein i bruk frostrøykfotografia i arbeidet med å klassifisere korleis isen til kvar tid låg på vatnet. Frå standplassen til fotografen har ein ikkje utsyn over heile vatnet, men den delen av vatnet der råka opnar seg finst i sektoren som bileta fangar opp. Ved berre å bruke frostrøykfotografia var ein også sikra fullt samsvar i tid mellom frostrøykobservasjon og iskartlegging.

Den opne råka er oftast lokalisert frå litt nordafor utlaupet frå Totak (Totaktunnelen) og sørover mot den vesle øya vis a vis Hestviki, sjå kartet, figur 2.1 og inndelinga av isdekket i klassar i tabell 8.1. Typisk for isen i klasse 2 er at den opne råka endar i ein spiss ved øya og at grensa går like forbi Eidsborgodden mot standplassen for fotografering ved Krossbakken. Ved det vestre landet kan det vera noko strandis, men som regel ikkje mykje nord i området, men strandisen aukar på sørover, og ved øya kan han vera nesten 100 m brei. Ved klasse 3 er situasjonen i regelen som for klasse 2 ved den vestre stranda, men isen ligg lengre utover ved den austre. Det vil seia at han når eit stykke forbi Eidsborgodden og breidda på den opne råka har skrumpa inn til om lag 50 meter.

Tabell 8.1 Det opne vassarealet vart delt inn i 4 grupper etter storleiken og plasseringa.

Klasse	Kriterium
0	Ingen synleg is, men det kan godt ha vore is i vikar ved vatnet.
1	Litt is i vikar og bukter.
2	Det har lagt seg is heilt ut til Eidsborgodden
3	Det har lagt seg is forbi Eidsborgodden

Om isarealet hadde noko å seia for kor tett frostrøyken kunne bli, vart også granska i kapittel 4, men då med bruk av den eksisterande frostrøykmodellen. Her vil spørsmålet bli analysert ved ein annan tilnæringsmåte utan bruk av ein på førehand definert modell. Liksom i kapittel 4 vart berre den delen av observasjonsmaterialet som hadde temperatur lik $-14,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller lågare brukt. Temperaturen var så låg 49 dagar gjennom prosjektperioden ved den tida frostrøyken vart observert.

Med bruk av frostrøykklassane i tabell 5.1 og klassane av ope vassareal i tabell 8.1, vart det gjort korrelasjonsanalyse på variablane frostrøyk, vassareal, temperatur og relativ råme. Som korrelasjonsmål vart valt Spearmans rankkorrelasjon då skalaene både for frostrøyk og for isdekke er relative. Resultata er gjevne i tabell 8.2.

Tabell 8.2 Korrelasjonsmatrise (Spearmans rho) for frostrøyk (klassar), is (klassar), temperatur og relativ råme ved Vamarvatnet.

	Frostrøyk	Is	Temperatur	Relativ råme
Frostrøyk	1.000	-0.068	-0.370**	-0.067
Is	-0.068	1.000	-0.355*	0.070
Temperatur	-0.370**	-0.355*	1.000	0.356*
Relativ råme	-0.067	0.070	0.356*	1.000

** Korrelasjonen er signifikant ved 0,01 nivået (2-sidig).

* Korrelasjonen er signifikant ved 0,05 nivået (2-sidig).

Tilsynelatande er det ingen samvariasjon mellom frostrøyk og is, men biletet er ikkje eintydig for isen er korrelert med temperaturen som igjen er korrelert med frostrøyken. Det er difor mogleg at samvariasjonen mellom lufttemperatur og frostrøyk maskerer innverknaden frå isen. For å granske dette nærare, vart det gjennomført ein partiell korrelasjonsanalyse der det vart kontrollert for innverknaden av lufttemperaturen og den relative luftråmen som også kan ha innverknad på frostrøyken. Analysen viste ein korrelasjon mellom is og frostrøyk på $-0,34$, med eit nominelt signifikansnivå på 0.02. På grunn av manglande normalfordeling ligg det noko uvisse i dette signifikansnivået. Det er i røynda noko høgre.

Testen kan tolkast som at isen på vatnet spelar ei rolle for frostrøyken ikkje berre ved at han hindrar røyken i å breie seg utover til sidene, men at han òg kan hindre røyken i å tetne til. Ved Våmarvatnet smalna den opne råka inn til ei breidd på om lag 50 m i streng kulde. Om effektreguleringa hadde vore meir omfattande, ville ikkje straumen gjennom vatnet vorte særleg sterkare. Til det har tunnelen frå Totak for liten kapasitet. Det opne arealet i Våmarvatnet ville ikkje endra seg stort, og heller ikkje frostrøyken.

I andre vassdrag kan ein vente at arealet ope vatn minkar i streng kulde når det blir gjennomført effektregulering med driftsstans om natta. Dermed minkar fordampinga frå vatnet også produksjonen av frostrøyk. Stader som kunne hatt frostrøyk ved vanleg sesongregulering, kan med effektregulering bli frie for frostrøyk i delar av døgnet. Det ser også ut til at frostrøyken blir tynnare om ope vassareal minkar i storleik, i alle fall om det frå før ikkje er for stort, sei berre 50 m breitt.

Om ei sesongregulering blir utvida til òg å bli ei effektregulering, kan det føre til at folk blir mindre plaga med frostrøyk enn før, både fordi frostrøyken breier seg utover mindre område og fordi han kan bli tynnare. Men om auka effektregulering ikkje fører til driftsstans om natta, kan tvert i mot den opne råka bli større og frostrøyken dermed både breie seg utover nye område og bli tettare.

Litteratur

- Benestad, R. 2000: Future Climate Scenarios for Norway based on linear, empirical downscaling and inferred directly from AOGCM results. DNMI-report No. 23/00 Klima.
- Golytsyn, G.S. and Grachov, A.A. 1986: Free convection of the multi-component media and parameterization of air-sea interaction at light winds. *Ocean-Air Interactions*. 1, pp. 57-78.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell. 1996: Climate Change 1995. Contributions to Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University press, 570 pp.
- Iversen, T., E.J. Førland, L.P. Røed, and F. Stordal. 1996: RegClim. Regional Climate Development under Global Warming. Project description.
- Kvambeck, Å.S. 2000: Virkninger av effektregulering på vanntemperatur og is i reguleringsmagasiner og innsjøer". *Effektregulering — Miljøverknader og konfliktreducerende tiltak*. Rapport nr. 15, Oslo 38 pp.
- Nordli, P.Ø. 1988: Frostrøyk og dalstratus i Gudbrandsdalen. Analyse av observasjonar ved osen av Vågåvatnet. *DNMI -klima*, rapport nr. 7/88.
- Nordli, P.Ø. 1992: Endringar i lokalklima ved utbygging av vassdrag ved Sauda. *DNMI-klima*. Rapport nr. 24/92, Environmental consultants A/S, 1300 Sandvika. 33 pp.
- Nordli, P.Ø. 1997. Analyse av frostrøykobservasjonar vinteren 1996/97 over Bandak og Våmarvatn i Tokkevassdraget. *Effektregulering — Miljøverknader og konfliktreducerende tiltak*. Rapport nr. 1. (Også DNMI-klima, rapport nr. 14/97), 13 pp.
- Nordli, P.Ø. 1999: Frostrøyk ved Våmarvatnet i Tokkevassdraget vintrane 1996/97 – 1998/99. *Effektregulering — Miljøverknader og konfliktreducerende tiltak*. Rapport nr. 10, Oslo. (Også DNMI-klima, rapport nr. 20/99), 13 pp.
- Röckner, E., L. Bengtsson, J. Feichter, J. Lelieveld & H. Rodhe, 1999: Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulphur cycle, *J. Climate*, 12, 3004-3032.
- Rodhe, Bertil 1965: The concentration of liquid water in the atmosphere. *Tellus*. 18, 86 – 104.
- Utaaker, K. 1995. Effects of watercourse regulations on local climate. Norwegian water Resources and Energy Administration. Publications No. 04. Oslo
- Økland H & Gotaas Y. 1995: Modelling and Prediction of Steam Fog. *Contributions to Atmospheric Physics*. 68, No.2, pp. 121-131.

Appendiks I:

Frost – eit program for utrekning av sannsynet (probability) for frostrøyk.

DNMI kan for interesserte levere ein diskett med eit program som reknar ut sannsynet (sannsynligheten, probability) for frostrøyk når ulike meteorologiske parametarar er kjende. Modellen er delvis bygd på røynsle frå bestemte lokalklima, og vil ikkje vera realistisk under alle tilhøve. Mest realistisk er han i innlandsdalar der det blir lite vind i streng kulde. Der det er utfallsvind slik at lufta blir godt blanda, er modellen mindre god. Om ein krev at frostrøyken skal vera sterkt utvikla (sjå under), må den opne råka ha ei viss breidd, minst 50 m, før modellen er realistisk.

Til hjelp for køyring av programmet:

Set disketten inn i drivaren, t.d. A, og gå til MS DOS. Skriv a:/frost. Deretter kjem desse spørsmåla:

Vel frostrøykindeks: Her kan ein velja mellom fire indeksar, som krev ulike parametarar.

A: Krev kjennskap til lufttemperaturen.

B: Krev kjennskap til lufttemperatur og relativ råme.

C: Krev kjennskap til lufttemperatur og skydekke.

D: Krev kjennskap til lufttemperatur, relativ råme og skydekke.

I tillegg til dette trengst opplysning om vassstemperatur. Om vinteren er vassstemperaturen nær 0 °C.

Indeks A er den enklaste, men prognosen blir betre om ein brukar ein annan parameter i tillegg. Om ein kjenner lufttemperatur og skydekke, er såleis modellen betre enn om ein berre kjenner temperatur. Om ein i tillegg kjenner relativ råme, er det derimot mindre å vinne på det.

Modellen prøver å definere ulike styrkegradar av frostrøyk:

1: All frostrøyk som kan observerast

2: Velutvikla frostrøyk

3: Frostrøyk som breier seg over større areal enn den opne råka i isen.

Eksempel:

Ved lufttemperatur -20.0 C, relativ råme 85 % og skydekke 6 (i ein skala frå 0-8), blir sjansen for frostrøyk av ein eller annan styrkegrad 99 %. Om vi krev at frostrøyken skal vera velutvikla, sjå side 11, blir sjansen for frostrøyk 79 %. Om vi krev at frostrøyken er så godt utvikla at han toler å gå over isen frå den opne råka, blir sjansen 25 %. Kva slags mål som blir sett for frostrøyken, er altså viktig for frekvensen.