

NILU  
Oppdragsrapport nr 64/73  
Referanse: EO-2-02.73  
Dato: Oktober 1973

FORELØPIG RAPPORT OM  
TÅKEDANNELSE I OSLOFJORD-OMRÅDET  
VED KJØLEVANNsutslipp  
FRA KJERNEKRAFTVERK  
av  
Harald Dovland

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING  
POSTBOKS 15, 2007 KJELLER  
NORGE

INNHOLDSFORTEGNELSE

		Side
1	<u>INNLEDNING</u> .....	2
2	<u>BEREGNINGSMETODE</u> .....	3
3	<u>NÅVÆRENDE TÅKEFORHOLD VED OSLOFJORD-OMRÅDET</u> .....	3
4	<u>DATAGRUNNLAG</u> .....	6
4.1	<u>Hyppighetsfordelinger av lufttemperaturen</u>	6
4.2	<u>Sjøtemperatur</u> .....	7
4.3	<u>Islegging</u> .....	8
4.4	<u>Temperaturøkning i vannoverflaten</u> .....	9
5	<u>BEREGNET ØKNING I TÅKEHYPPIGHET</u> .....	9
5.1	<u>Nærområdet</u> .....	9
5.2	<u>Fjernområdet</u> .....	10
5.3	<u>Kommentarer til beregningene</u> .....	11
6	<u>KONKLUSJON</u> .....	13
7	<u>LITTERATURLISTE</u> .....	14

BILAG A

GENERELT OM TÅKEDANNELSE OG BEREGNING AV ØKNING I  
TÅKEHYPPIGHET

A.1	<u>GENERELT OM TÅKEDANNELSE</u> .....	A2
A.1.1	<u>Dannelse av frostrøyk</u> .....	A3
A.2	<u>METODER FOR BEREGNING AV ØKNING I TÅKEHYPPIGHET</u> ..	A6
A.2.1	<u>Bruk av metningskurven for vanndamp</u> .....	A6
A.2.2	<u>Sammenheng mellom vanntemperatur, luft- temperatur og sannsynlighet for tåke</u> ....	A7
A.2.2.1	<u>Anvendelse av metoden</u> .....	A8
A.2.3	<u>Tåkehyppighet og lufttemperatur i Oslofjorden</u> .....	A9
A.3	<u>LITTERATURLISTE</u> .....	All

FORELØPIG RAPPORT OM  
TÅKEDANNELSE I OSLOFJORD-OMRÅDET  
VED KJØLEVANNSUTSLIPP  
FRA KJERNEKRAFTVERK

1 INNLEDNING

Etter oppdrag fra Norges Vassdrags- og Elektrisitetsvesen, Statskraftverkene, har Norsk Institutt for Luftforskning (NILU) beregnet den sannsynlige økningen i tåkehypighet på grunn av kjølevannsutslipp fra et kjernekraftverk. Oppdraget var å utføre beregningene for fire alternative byggesteder: Emmerstad, Vardeåsen Li, Hurum Skjøttelvik og Naverfjorden. På grunn av lite datamateriale og en relativt grov metode til beregning av økningen i tåkehypighet, har det imidlertid ikke vært mulig i beregningene å skille mellom de tre alternative byggestedene Emmerstad, Vardeåsen Li og Hurum Skjøttelvik.

Temperaturøkningen i vannoverflaten på grunn av kjølevannsutslippet er blant annet avhengig av kraftverkets størrelse og av hvordan kjølevannsinntak og -utslipp arrangeres. I denne rapporten har en bare beregnet økningen i tåkehypighet for gitte representative temperaturøkninger, uten å knytte beregningene til størrelsen på kraftverket eller til bestemte inntaks- og utslippsarrangement. For å kunne angi f eks horisontal ubredelse av en gitt temperaturøkning, må disse beregningene sammenholdes med hydrofysiske utredninger for et aktuelt kjernekraftverk.

Kjølevannsutslipp til elv eller sjø er nyttet i flere andre land i forbindelse med varmekraftverk. Erfaringer fra disse med hensyn til tåkedannelse synes imidlertid ikke å være publisert, og en har derfor ikke kunnet sammenholde beregningene med erfaringer.

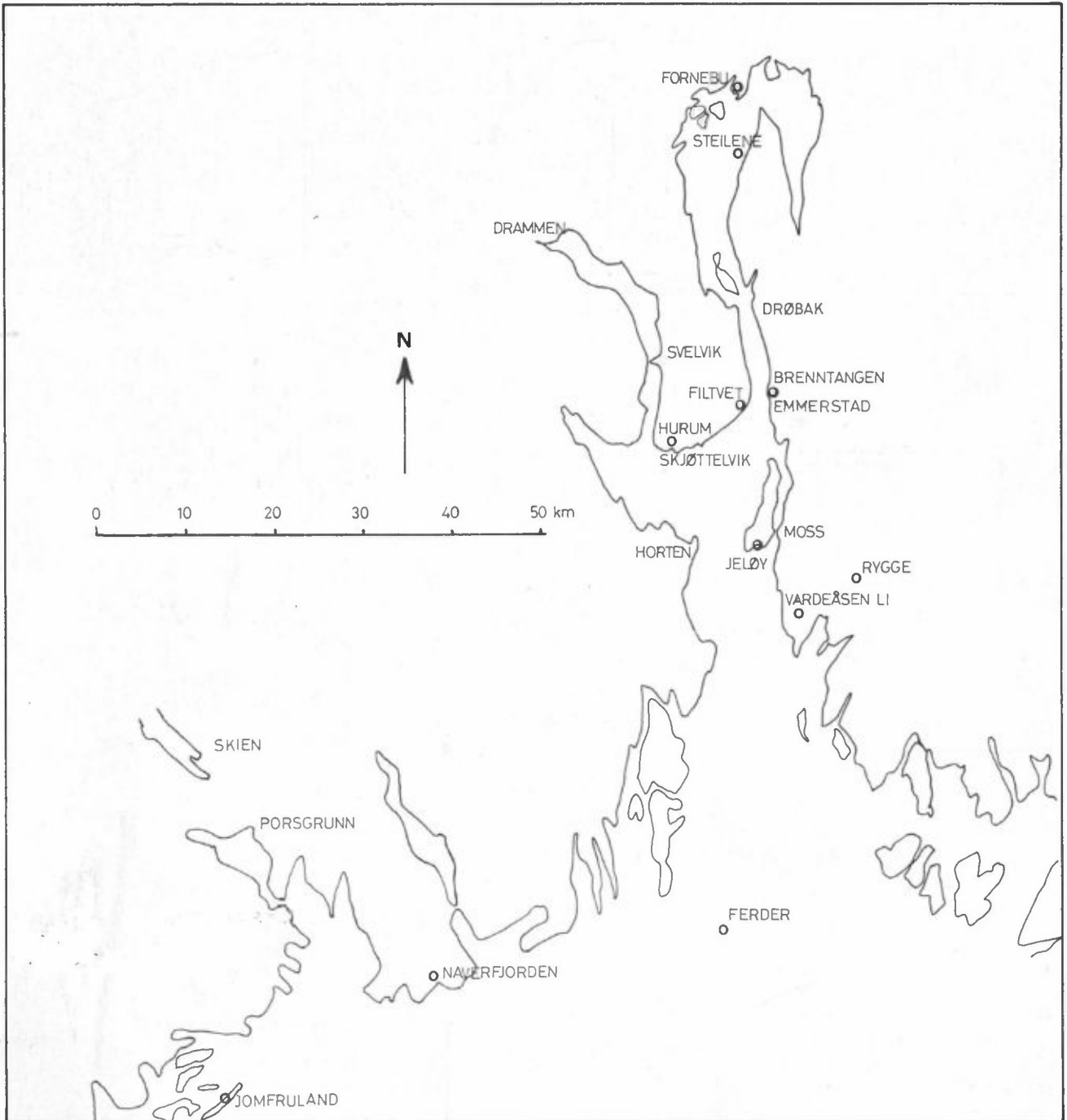
I et bilag til rapporten har en gitt en generell beskrivelse av tåkedannelse og av den metoden som er benyttet ved beregning av økningen i tåkehyppighet. Metoden er hovedsakelig utviklet på grunnlag av spesielle observasjoner fra Sverige. Beregningene kan derfor ikke direkte sammenholdes med observasjoner fra det offisielle meteorologiske stasjonsnett.

## 2 BEREGNINGSMETODER

Metoden som en har benyttet til beregning av økningen i tåkehyppighet, er beskrevet i bilagets kapittel A.2.2. Hvis en for et gitt sted kjenner frekvensfordelingen av lufttemperaturen, nåværende midlere sjøtemperatur og temperaturøkningen i vannoverflaten på grunn av kjølevannsutslippet, kan en ved hjelp av sannsynlighetskurvene i figur A.5 finne den midlere økningen i tåkehyppighet.

## 3 NÅVÆRENDE TÅKEFORHOLD VED OSLOFJORD-OMRÅDET

Hyppigheten av tåke kl 07 på fem meteorologiske stasjoner i Oslofjord-området er gitt i tabell 3.1. Stasjonenes beliggenhet er vist på kartskissen i figur 3.1. For Jeløy har en beregnet hyppighetene på grunnlag av data fra de offisielle meteorologiske årbøker for årene 1961-70. For de øvrige stasjoner har en benyttet den offisielle statistikken for perioden 1956-65 (1).



Figur 3.1: Kartskisse over Oslofjord-området.

Stasjon	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	År
Jomfruland	1.5	1.6	3.5	3.6	1.3	0.4	1.1	0.3	1.3	1.4	1.2	0.7	17.9
Ferder	1.9	2.2	4.0	2.8	0.7	0.2	0.4	0.0	1.1	1.1	1.2	1.5	17.1
Rygge	2.5	2.6	5.0	3.8	0.9	0.1	0.4	1.5	2.9	3.6	2.7	2.2	28.2
Jeløy	2.7	3.6	3.5	3.6	1.4	0.4	0.3	0.6	1.8	3.5	1.1	2.1	24.6
Fornebu	1.6	1.5	2.2	1.4	0.0	0.0	0.1	0.1	0.5	1.7	3.0	2.0	14.1

Tabell 3.1: Midlere antall dager med tåke kl 07 på fem stasjoner i Oslofjord-området. For Jeløy er benyttet perioden 1961-70, for de øvrige stasjoner 1956-65.

Ved de meteorologiske stasjoner er tåke definert ved at den horisontale synsvidden er mindre enn 1 km. Det fremgår ikke av tåkestatistikken på hvilken måte tåken er dannet, dvs hvilken "type" tåke en har.

Statistikken i tabell 3.1 er utarbeidet på grunnlag av observasjonene kl 07. Den totale hyppighet av tåke (dvs sannsynligheten for at tåke skal forekomme en eller annen gang i løpet av døgnet) vil være større enn det som fremgår av tabellen. Tåke som forekommer mellom de fastsatte observasjonstider blir også registrert. Disse observasjonene kan imidlertid ikke kontrolleres ved hjelp av andre vær-observasjoner (for eksempel luftfuktighet) og er også mer avhengig av observatørens påpasselighet. Meteorologisk Institutt bruker derfor nå bare observasjonene fra de faste observasjonstidspunktene (07, 13 og 19) i sine statistikker. Siden sannsynligheten for tåke er størst om morgenen, har en her gitt statistikken for kl 07.

Tabellen gir ingen informasjon om varigheten av tåkesituasjonene, bare hyppigheten av tåke kl 07.

På samtlige stasjoner i tabell 3.1 er det svært lite tåke i månedene mai - august. En ser videre at Jomfruland, Ferder og Fornebu har mindre tåke enn Jeløy og Rygge. Årsaken til dette er blant annet at Jeløy vil være mer influert av frostrøyk enn f eks Fornebu og Ferder.

#### 4 DATAGRUNNLAG

##### 4.1 Hyppighetsfordelinger av lufttemperaturen

Det finnes ikke lengre serier med temperaturregistreringer fra de aktuelle utslippsstedene. En har derfor antatt at temperaturobservasjonene fra Jeløy er representative for utslippsstedene fra Emmerstad, Vardeåsen Li og Hurum Skjøttelvik, og at observasjonene fra Jomfruland er representative for Naverfjorden.

For Jeløy og Jomfruland har en på grunnlag av observasjonsmaterialet beregnet hyppighetsfordelinger av lufttemperaturen kl 07 for hver måned i perioden 1961-1970. Fra Klima-avdelingen ved Meteorologisk Institutt har vi fått oppgitt tilsvarende fordelinger for Ferder og Fornebu for månedene januar, april, juli og oktober for perioden 1957 - 1966.

Hyppighetsfordelingene for lufttemperaturen er i tabell 4.1 gitt ved midlere antall observasjoner innen de angitte fem-graders intervaller. I tabellen er som eksempel gitt data fra månedene januar, april og oktober.

T	Jomfruland (1961-1970)			Ferder (1957-1966)			Jeløy (1961-1970)			Fornebu (1957-1966)		
	Jan	Apr	Okt	Jan	Apr	Okt	Jan	Apr	Okt	Jan	Apr	Okt
-22.5										0.2		
-17.5							0.3			1.4		
-12.5	3.0			0.3			2.3			4.8		
- 7.5	8.2	0.1		5.6	0.2		9.2	0.5		10.8	1.3	
- 2.5	11.9	6.6	0.2	11.6	3.2		11.1	4.4	0.6	8.3	6.6	2.5
2.5	7.4	17.0	8.2	11.7	18.2	2.4	7.8	18.5	7.5	4.9	15.8	11.5
7.5	0.5	6.3	15.5	1.8	8.4	15.2	0.3	6.5	16.3	0.6	6.3	12.5
12.5			7.0			13.3		0.1	6.5			4.5
17.5			0.1			0.1			0.1			

Tabell 4.1: Midlere antall dager med lufttemperatur kl 07 innen de angitte temperaturintervaller. Temperaturintervallene er gitt ved midtpunktet i intervallet, dvs 2.5 angir intervallet 0.0 - 4.9, osv.

#### 4.2 Sjøtemperatur

I tabell 4.2 har en som eksempel gitt midlere sjøtemperatur for månedene januar, april, juli og oktober for tre steder i Oslofjorden, og for Naverfjorden. Verdiene fra de tre stedene i Oslofjorden antas representative for henholdsvis ytre, midtre og indre deler av fjorden.

En har ikke målinger av sjøtemperaturen fra Naverfjorden. Verdiene angitt for Naverfjorden er beregnet som midlet av sjøtemperaturene fra Ferder og Torungen Fyr (utenfor Arendal). Ved Ferder og Torungen Fyr er sjøtemperaturene målt 0.5 m under overflaten, ved Filtvet og Steilene 1 m under overflaten.



Sted	Jan	Apr	Jul	Okt
Naverfjorden	2.5	4.7	17.4	11.4
Ferder	2.4	4.7	18.1	11.4
Filtvet	3.3	4.7	17.2	11.7
Steilene	2.2	4.8	17.0	11.0

Tabell 4.2: Midlere sjøtemperatur ved fire steder i Oslofjord-området.  
(Kilder: Meteorologisk Institutt og Vassdrags- og Havnelaboratoriet).

#### 4.3 Islegging

Den største endring i tåkehyppighet som følge av kjølevannsutslipp vil en få på steder hvor utslippet medfører at normal islegging hindres. Det har imidlertid ikke vært mulig å finne noen fullstendig oversikt over "normal" islegging i Oslofjord-området.

På grunnlag av opplysninger fra havnemyndigheter, teknisk etat i kommunene, lokalbefolkningen osv, kan en nevne følgende: Oslofjorden som helhet fryser relativt sjelden. Enkelte deler av fjorden med stor tilførsel av ferskvann, og enkelte innelukkede farvann islegges nesten hver vinter. Eksempler på slike steder er Evjesundet (ved byggestedet Vardeåsen Li), havnebassenget i Horten, Mossesundet og enkelte indre deler av fjorden (f eks ved Fornebu). Det kan også nevnes at Drammensfjorden innenfor Svelvik vanligvis islegges.

#### 4.4 Temperaturøkning i vannoverflaten

Temperaturøkningen i vannoverflaten er blant annet avhengig av størrelsen på kjernekraftverket og hvilket inntaks- og utslippsarrangement for kjølevann som eventuelt vil bli brukt. Siden disse tekniske spesifikasjoner ikke er kjent, kan en ikke angi hvilken temperaturøkning i vannoverflaten (overtemperatur) som en sannsynligvis vil få innen gitte områder. Økningen i tåkehypphet er beregnet for representative overtemperaturer. Hvilke beregninger som vil være relevante for et bestemt område, kan en finne ved å sammenholde disse beregningene med hydrofysiske beregninger for et aktuelt alternativ.

I beregningene har en skilt mellom to områder: nærområdet og fjernområdet. For det såkalte nærområdet er beregningene gjort for overtemperaturer på 1, 2 og 4°C. For fjernområdet har en antatt en overtemperatur på 1°C.

### 5 BEREGNET ØKNING I TÅKEHYPPIGHET

Tåkedannelse er oftest en sammensatt prosess som sterkt påvirkes av lokale faktorer. En kan derfor ikke i detalj beregne hvordan et kjølevannsutslipp vil påvirke tåkehyppheten i området. Ved hjelp av metoden skissert i kapittel A.2.2 og data gitt i kapittel 4, antar en imidlertid at resultatene vil antyde størrelsen av problemet.

#### 5.1 Nærområdet

Den relativt grove beregningsmetoden, sammen med et spinkelt datagrunnlag, medfører at det ikke er grunnlag for å gjøre separate beregninger av økningen i tåkehypphet i nærområdet for de tre byggestedsalternativene Emmerstad (kjølevannsutslipp ved Brenntangen), Vardeåsen Li og Hurum Skjøttelvik. For alle tre stedene har en brukt temperaturfordelingen kl 07

for Jeløy, og sjøtemperaturen fra Filtvet. For Naverfjorden er brukt temperaturfordelingen kl 07 for Jomfruland. Den beregnede økning i tåkehypighet ved temperaturøkninger på henholdsvis 1, 2 og 4°C er gitt i tabell 5.1.

	Over-temperatur	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Totalt
Emmerstad Vardeåsen Li Hurum Skjøttelvik	1°C	0.6	0.6	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	1.0	4.0
	2°C	1.1	1.1	0.9	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	1.3	1.8	8.4
	4°C	3.0	2.9	2.0	2.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	2.7	3.3	4.2	21.1
Naverfjorden	1°C	0.6	0.5	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	1.0	3.9
	2°C	1.2	1.1	0.8	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	1.2	1.8	8.4
	4°C	3.1	3.0	2.0	2.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	2.6	3.2	4.1	21.1

Tabell 5.1: Beregnet økning i tåkehypighet (antall dager pr måned) på grunn av temperaturøkning i vannoverflaten.

De temperaturfordelinger som er benyttet (Jeløy og Jomfruland) avviker lite fra hverandre, og beregningene viser derfor nesten ingen forskjell i økning i tåkehypighet for de to aktuelle områdene. Lokalt kan imidlertid lufttemperatur og sjøtemperatur avvike fra det som her er antatt, og dette vil medføre en annen økning i tåkehypighet.

Tabell 5.1 er beregnet under forutsetning av at det ikke er islegging i området. Etter de opplysninger en har fått (se kapittel 4.3), er dette riktig for områdene ved Hurum Skjøttelvik, Brenntangen og Naverfjorden. Evjesundet ved Vardeåsen Li islegges nå normalt hver vinter. Hvis et kjølevannsutslipp fører til at Evjesundet blir isfritt, må en forvente at økningen i tåkehypighet lokalt blir noe større enn angitt i tabell 5.1.

## 5.2 Fjernområdet

En har også gjort beregninger for en temperaturøkning på 1°C i de indre og ytre deler av Oslofjorden, representert ved lufttemperaturfordelingene for henholdsvis Fornebu og Ferder, og sjøtemperaturer fra henholdsvis Steilene og Ferder. Resultatene er gitt i tabell 5.2.

	Over- temp- eratur	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Totalt
Ytre fjord	+ 1°C	0.4	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	2.2
Indre fjord	+ 1°C	0.6	0.6	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.8	4.0

Tabell 5.2: Beregnet økning i tåkehyppighet (antall dager pr måned) på grunn av temperaturøkning i vannoverflaten.

På grunn av relativt høye lufttemperaturer på Ferder, er den beregnede økningen i ytre fjord liten.

Enkelte indre deler av Oslofjorden (f eks ved Fornebu) islegges ofte om vinteren. En regner ikke med at en temperaturøkning i vannet på ca 1°C i nevneverdig grad vil hindre denne isleggingen, og for disse områdene vil derfor ikke tåkehyppigheten endres.

### 5.3 Kommentarer til beregningene

Grunnlaget for den anvendte metoden er utarbeidet i Sverige på grunnlag av observasjoner fra svenske vassdrag. I beregningene er antatt at sannsynlighetskurvene (figur A.5 i bilaget) vil være de samme for de aktuelle stedene i Oslofjord-området som for de svenske vassdrag, idet en ikke har hatt tilstrekkelig datagrunnlag til å kunne etterprøve modellen.

Det er mange meteorologiske parametre som påvirker tåkedannelse; temperatur, fuktighet, skydekke (stråling), vindstyrke, vindretning osv. Hvis disse parametre i Oslofjord-området i middel avviker vesentlig fra de svenske observasjonsstedene, vil det medføre feil i beregningene.

I observasjonsmaterialet fra de svenske vassdrag, som danner grunnlaget for beregningsmetoden, inngår alle "grader" av tåke, fra lett frostrøyk til tykk tåke. En må derfor anta at en del av den beregnede økning i tåkehyppighet vil representere lett tåke uten praktisk betydning f eks for skipsfarten. Hvor stor denne delen er, kan en imidlertid ikke angi. I offisiell meteorologisk statistikk hvor tåke defineres ved synsvidde mindre enn 1 km, vil økningen i tåkehyppighet høyst sannsynlig bli mindre enn det en har beregnet.

Sannsynlighetskurvene er beregnet på grunnlag av observasjoner over ferskvann. Siden vanndampens metningstrykk er lavere over saltvann enn over ferskvann, vil sannsynligheten for tåkedannelse være mindre over sjøvann. En har ikke korrigert for denne effekten, og det kan medføre at en beregner for stor økning i tåkehyppighet. Lav saltholdighet i overflatevannet ved utslippsstedene vil imidlertid redusere betydningen av dette.

Beregningene er gjort for forholdene kl 07 om morgenen, mens metoden opprinnelig er basert på temperaturstatistikk for hele døgnet. Temperaturfordeling kl 07 vil være forskjøvet mot lavere temperaturer i forhold til en temperaturfordeling for hele døgnet. Dette vil derfor føre til at en beregner for stor økning i tåkehyppighet.

6 KONKLUSJON

På grunnlag av hyppighetsfordelinger for lufttemperaturer og sannsynlighetsfordelinger for tåkedannelse ved gitte luft- og vanntemperaturer, har en beregnet økningen i tåkehyppighet som følge av kjølevannsutslipp fra et kjerne-kraftverk i Oslofjord-området. Metoden som er anvendt ved beregningene, er basert på et observasjonsmateriale fra svenske vassdrag som er generalisert ved hjelp av teori om turbulent blanding.

Tåkedannelse er avhengig av en rekke meteorologiske parametre, og en beregning av tåkehyppighet er derfor meget usikker. De beregninger av økt tåkehyppighet som er gjort i denne rapporten må derfor betraktes som et forsøk på å kvantifisere fenomenet, og usikkerheten i resultatene er sannsynligvis meget stor. En har imidlertid forsøkt å gjøre antagelser slik at sannsynligheten er størst for at en har beregnet for stor økning.

Beregningene er gjort for representative temperaturøkninger i vannoverflaten. Hvor stort område som vil få en gitt temperaturøkning er avhengig av blant annet størrelsen av kraftverket og inntaks- og utslippsarrangementet for kjølevannet. Beregningene i denne rapporten bør derfor sammenholdes med hydrofysiske beregninger for et gitt alternativ.

Økningen i tåkehyppighet vil være sterkt influert av lokale forhold, med størst økning i innelukkede farvann med stor sannsynlighet for kaldluftdannelse. Siden en ikke nøyaktig kjenner de aktuelle utslippssteder for kjølevann, og heller ikke temperaturforholdene på disse stedene, har det ikke vært mulig å skille mellom de aktuelle byggestedene i ønskelig grad. Beregningene for kjølevannsutslipp i midtre Oslofjord og ved Naverfjorden gir således omtrent samme resultat. Temperaturøkninger i vannoverflaten på 1, 2 og 4°C gir ifølge beregningene en økning i tåkehyppighet på

henholdsvis ca 4, 8 og 21 dager pr år. I indre og ytre Oslofjord vil en temperaturøkning i vannoverflaten på 1°C etter beregningene gi en økning på henholdsvis ca 4 og 2 dager pr år. Økningen i tåkehypighet vil kunne bli noe større på steder hvor kjølevannsutslippet vil føre til at normal islegging hindres.

De beregnede økninger i tåkehypighet er forventede middelve verdier, og en må vente store variasjoner fra år til år.

Uten praktiske erfaringer med virkninger av kjølevannsutslipp, er det vanskelig å si hvor tett tåken kan ventes å bli, og hvor stor den vertikale og horisontale utstrekning blir. Generelt antar en at tåken horisontalt stort sett blir begrenset til kjølevannsstrømmens utbredelse. Tåkens tetthet vil variere fra lett frostrøyk uten praktiske problemer til relativt tett tåke som kan være til hinder for skipsfarten. Dette vil avhenge av de øvrige meteorologiske forhold, men det er ikke mulig å skille mellom disse tilfeller i beregningene.

Tåken eller frostrøyken vil når den består av underkjølte vanndråper, kunne medføre isdannelse på f eks veier og kraftledninger. En antar imidlertid at tåkedannelsen først og fremst vil forekomme i situasjoner med vindstille eller svak fralandsvind, og dette vil redusere sannsynligheten for isdannelser på land.

## 7 LITTERATURLISTE

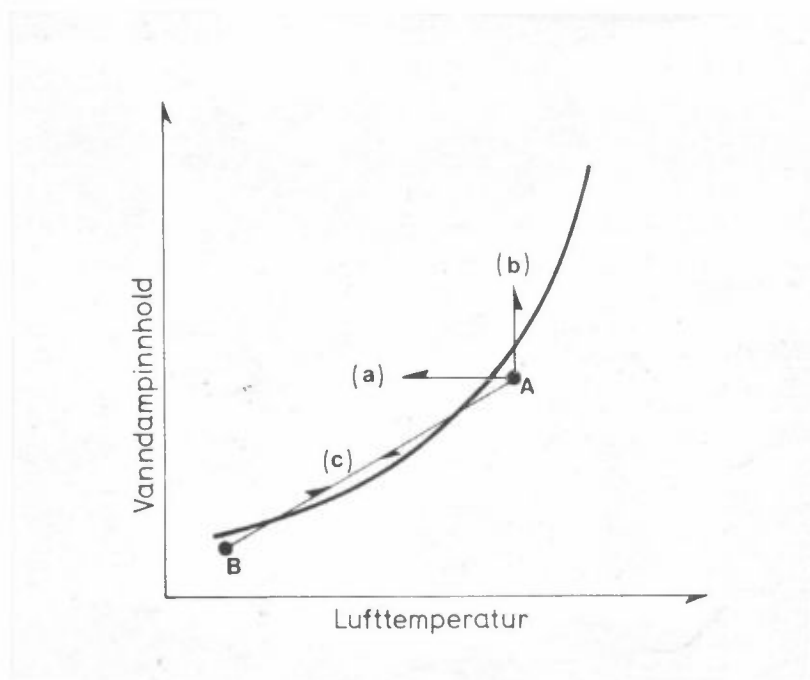
- (1) Bruun, I. og Håland, L. Standard normals 1931-60 of numbers of days with various weather phenomena. Meteorologisk Institutt, Oslo 1970.

GENERELT OM TÅKEDANNELSE  
OG BEREGNING AV ØKNING I  
TÅKEHYPPIGHET



### A.1 GENERELT OM TÅKEDANNELSE

Tåke dannes ved tre forskjellige prosesser som er skissert i figur A.1. Kurven viser hvordan vanndampens metningstrykk varierer med temperaturen. Til høyre for kurven er luften umettet. Til venstre for kurven er luften overmettet, det vil i praksis si at kondensasjon finner sted og det dannes tåke.



Figur A.1: Skjematisk fremstilling av metningskurven for vanndamp og prosesser som fører til tåkedannelse. Se forklaring i teksten.

En luftmasse i en tilstand representert ved punktet A vil kunne bli overmettet ved tre forskjellige prosesser (se figur A.1):

- (a) Avkjøling av en luftmasse
- (b) Tilførsel av vanndamp til en luftmasse
- (c) Blanding av to luftmasser med vesentlig forskjellige temperaturer. (Temperatur og vanndampinnholdet i blandingen vil en finne langs den tilnærmet rette linjen mellom de to punktene A og B).

Flere av disse prosesser vil ofte kunne virke samtidig.

Blandingsprosessen (c) skjer ved at en mindre luftmasse blandes inn i den omkringliggende luft. Under blandingsprosessen vil blandingens tilstand være beskrevet ved punkter som "beveger" seg langs linjen angitt i figur A.1, og slutt-tilstanden vil være den omkringliggende lufts tilstand. Kjente eksempler på dette er skorsteinsutslipp som inneholder vanndamp, kondensstriper fra fly og frostrøyk.

#### A.1.1 Dannelse av frostrøyk

Når kald luft strømmes over en relativt varm vannflate, vil luften nærmest vannflaten oppvarmes og tilføres fuktighet. Ved vannoverflaten er det en god tilnærmelse å anta at luften er mettet med samme temperatur som vannet. Denne luften vil blandes inn i den overliggende kaldere og tørrere luften. Disse to lufttilstandene vil prinsipielt svare til henholdsvis A og B i figur A.1. Hvis temperaturforskjellen er tilstrekkelig stor, vil det under blandingen kunne bli overmetning, kondensasjon og tåkedannelse. Denne type tåke kalles ofte frostrøyk eller alvedans. Når vannet vil temperaturen avta raskt med høyden, og blandingen i dette sjiktet vil være meget effektiv. Dette er ofte synlig ved at tåkeluften stiger til værs i turbulente spirallignende bevegelser; det "ryker" av vannet. Et stykke over vannflaten vil den tørre luften dominere blandingen (dvs blandingen nærmer seg tilstanden B i figur A.1), og frostrøyken løses opp. Frostrøyken vil oftest forekomme i kald fralandsvind. Den vertikale utstrekning er ofte liten.

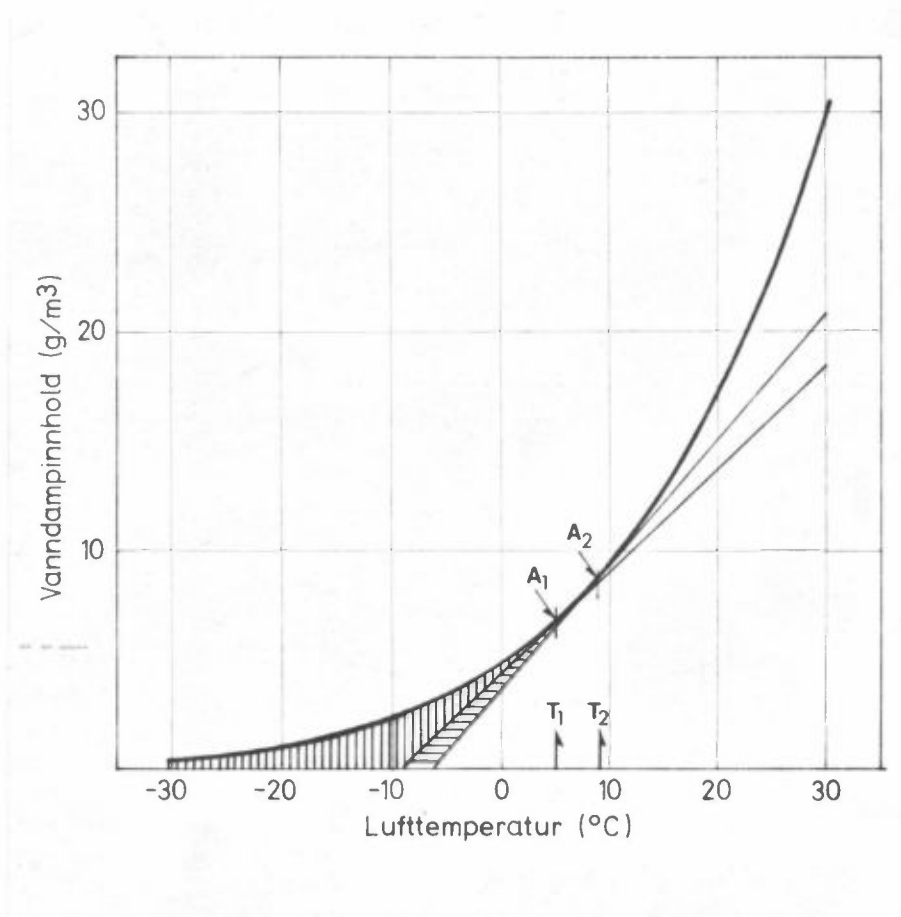
I stille vær med en inversjon over vannflaten, vil tilførselen av vanndamp kunne bli så stor at en får sammenhengende tåke, altså uten de synlige virvlende strukturer som kjennetegner frostrøyken. Denne tåken betegnes ofte frostrøyk. Selv om luften også tilføres varme fra vannet, vil denne tapes igjen ved stråling fra toppen av tåkelaget, og tåken vil kunne holde seg så lenge det stille været varer. Frosttåken vil være tettere, og dermed skape større problemer f eks for skip, enn frostrøyken.

Det vil være en gradvis overgang mellom frostrøyk og frosttåke, en vil her betegne begge fenomener som frostrøyk.

Hvor stor temperaturforskjellen mellom luft og vann må være for at en skal få dannet frostrøyk, vil være avhengig av luftens vanndampinnhold. Den kritiske temperaturforskjellen avtar med økende vanndampinnhold. En generell regel er at frostrøyk dannes når temperaturforskjellen er større enn  $10^{\circ}\text{C}$ .

Siden frostrøyk i første rekke dannes når lufttemperaturen er under  $0^{\circ}\text{C}$ , består den oftest av underkjølte dråper.

Figur A.2 viser mer detaljert betingelsene for dannelsen av frostrøyk. Luften nærmest vannoverflaten antas mettet med fuktighet ved vannets temperatur ( $T_1$ ). Punktet  $A_1$  i figur A.2 angir tilstanden for denne luften. Når denne luften blandes med den overliggende luft, vil luftblandingens tilstand være beskrevet ved den tilnærmet rette linjen som forbinder de to lufttilstandene (sml. prosess (c) i figur A.1). Dersom blandingslinjen skjærer metningskurven, vil en få overmetning og kondensasjon. Den kritiske linjen vil derfor være tangenten til metningskurven i punktet  $A_1$ . Frostrøyk vil derfor bare kunne oppstå når den overliggende lufts tilstand er gitt ved punkter som ligger til venstre for tangenten, dvs i det området som er skravert med vertikale streker på figur A.2. Dette er



Figur A.2: Metningskurven for vanndamp, og betingelser for dannelse av frostrøyk. Se nærmere forklaring i teksten.

en nødvendig, men ikke tilstrekkelig, betingelse for at det skal dannes tåke. For at det skal dannes synlig tåke, må blandingen være overmettet så lenge at dråpene vokser nok til å bli synlige. Dette avhenger foruten av temperaturforskjellen mellom luft og vann, også av hvor raskt blandingen skjer, dvs av vindstyrke og vertikal temperatursjiktning.

Hvis temperaturen i sjøen øker, f eks som følge av kjølevannsutslipp fra et kjernekraftverk, vil mengden av lufttilstander som kan gi tåkedannelse øke. Dette er anskueliggjort i figur A.2, hvor en økning i vanntemperaturen fra  $T_1$  til  $T_2$  medfører at også lufttilstander innen det horisontalt skraverte område nå vil kunne gi tåke, dvs den totale sannsynligheten for tåke har økt. (Siden ikke alle lufttilstander er like sannsynlige, er ikke forholdet mellom de skraverte arealene et direkte mål for økningen i tåkehypighet).

## A.2. METODER FOR BEREGNING AV ØKNING I TÅKEHYPPIGHET

### A.2.1 Bruk av metningskurven for vanndamp

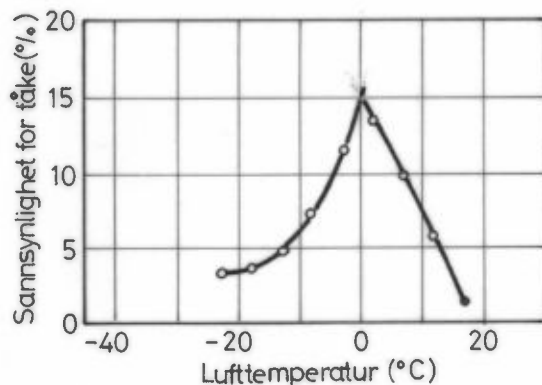
Ved hjelp av statistikk over samhørende verdier av sjøtemperatur, lufttemperatur og luftfuktighet, kan en på grunnlag av prinsippene i figur A.2 beregne økningen i tåkehypighet for en gitt økning i sjøtemperaturen. Siden vanndampens metningstrykk er lavere over saltvann enn over ferskvann, bør også vannets saltholdighet inngå som parameter.

Siden ikke alle lufttilstander som teoretisk kan gi frostrøyk fører til synlig frostrøyk som er av praktisk interesse, har metoden sin begrensning.

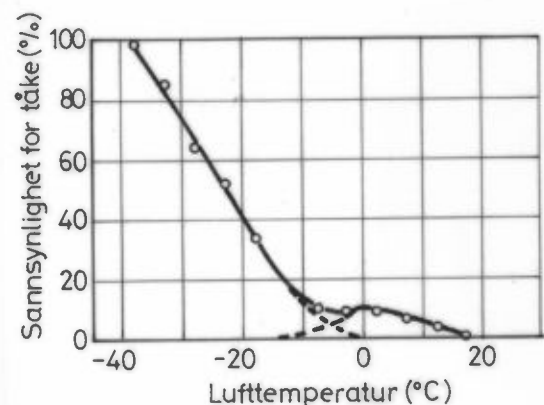
### A.2.2 Sammenheng mellom vanntemperatur, lufttemperatur og sannsynlighet for tåke

I Sverige har en for beregning av økt tåkehyppighet ved kjølevannsutslipp fra kjernekraftverk (A1) benyttet en metode som bygger på empiriske meteorologiske data generalisert ved teoretiske beregninger (A2).

De empiriske data omfatter i første rekke lufttemperatur og tåkehyppighet. Observasjonsmaterialet er delt i to hovedgrupper. Den ene gruppe inneholder observasjoner fra steder nær elver og vann som ikke islegges og den andre gruppen inneholder de øvrige observasjoner. Av observasjonene har en beregnet tåkehyppigheten i forskjellige temperaturintervaller. Resultatene er vist på figur A.3 og A.4, og en ser tydelig forskjell mellom de to gruppene. "Normalt", dvs på steder som ikke ligger nær åpent vann (figur A.3), avtar sannsynligheten



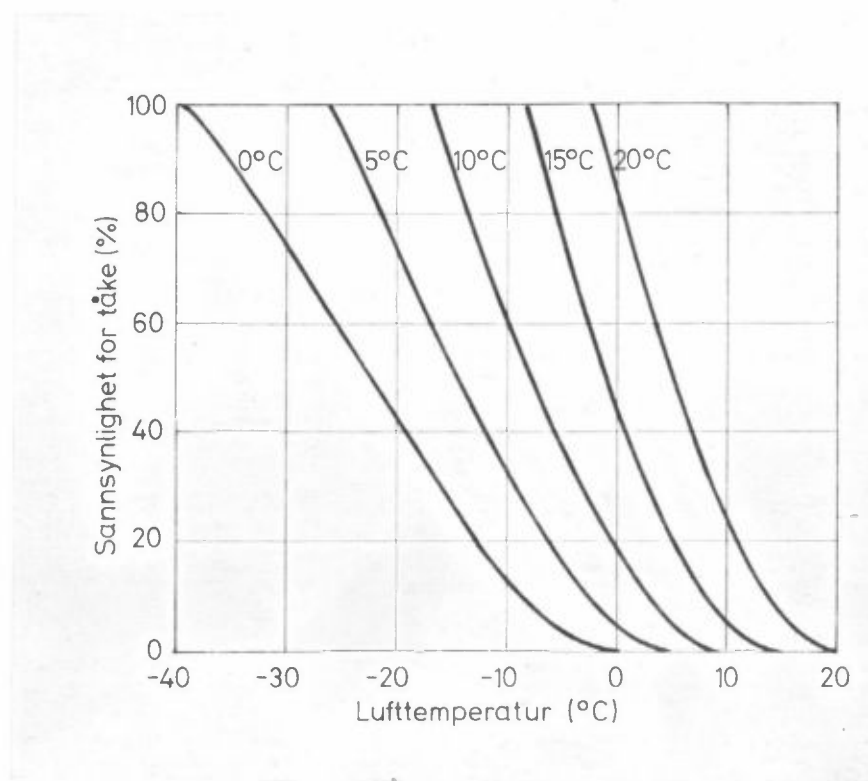
Figur A.3: Tåkehyppighet for et sted som ikke ligger ved åpent vannflate (A2).



Figur A.4: Tåkehyppighet for et sted som ligger ved en vannflate som ikke islegges om vinteren (A2).

for tåke sterkt når lufttemperaturen synker under  $0^{\circ}\text{C}$ . Nær åpent vann (figur A.4) blir fordelingen en annen. Sannsynligheten for tåke øker sterkt når lufttemperaturen synker under  $-10^{\circ}\text{C}$ , dvs når temperaturdifferansen mellom luft og vann overstiger ca  $10^{\circ}\text{C}$ . Når lufttemperaturen er under  $-30^{\circ}\text{C}$  vil det nesten alltid dannes tåke.

Ved hjelp av teorier for turbulent blanding av luft, er det empiriske datamaterialet nyttet til å beregne sannsynligheten for tåkedannelse ved gitte luft- og vanntemperaturer. Resultatene er vist i figur A.5 (A1). Disse kurvene gir sannsynligheten for tåkedannelse ved turbulent tilførsel av vanndamp fra underlaget, dvs den type tåke som det er aktuelt å vurdere i forbindelse med kjølevannsutslipp. Kurven for vanntemperatur 0°C på figur A.5 er identisk med venstre del av kurven på figur A.4. De øvrige kurvene på figur A.5 er teoretiske og bygger på 0°C-kurven. Disse er ikke verifisert ved observasjoner.



Figur A.5: Sannsynlighet for tåke over ferskvann som funksjon av lufttemperatur og vanntemperatur. Tallene ved kurvene angir vanntemperaturen (A1).

#### A.2.2.1 Anvendelse av metoden

Hvis antall tåkeobservasjoner innen et gitt temperaturintervall kalles  $f$ , og antall observasjoner med lufttemperatur innen det samme intervallet er  $F$ , gir kurvene i figur A.5 for en gitt vanntemperatur forholdet  $100 \cdot \frac{f}{F}$ . Når frekvensfordelingen  $F$  for lufttemperaturen er kjent, og en dessuten kjenner nåværende

vanntemperatur og den forventede temperaturøkning, kan en på grunnlag av kurvene i figur A.5 finne økningen i tåkehyppighet.

### A.2.3 Tåkehyppighet og lufttemperatur i Oslofjorden

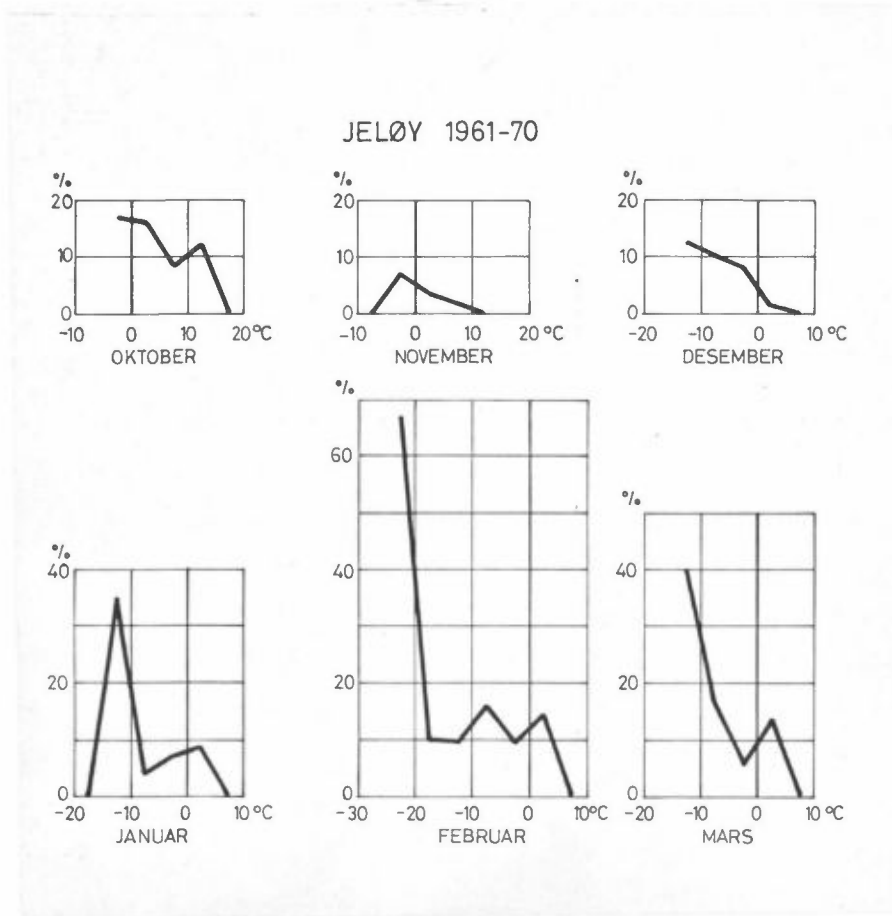
De empiriske data som er benyttet ved utarbeidelsen av sannsynlighetskurvene på figur A.5, er tatt fra et observasjonsnett opprettet spesielt for formålet. Ved offisielle meteorologiske stasjoner er tåke definert ved horisontal synsvidde mindre enn 1 km. For dette spesielle observasjonsnettet har en ikke benyttet denne definisjonen, men har også regnet lettere tåke (tåkedis) og lokal frostrøyk over elver som tåke. Det er derfor vanskelig å verifisere sannsynlighetskurvene på figur A.5 ved hjelp av observasjoner fra det offisielle meteorologiske stasjonsnett. For i det minste å kunne foreta en kvalitativ sammenligning, har en for kortere perioder talt opp antall tåkeobservasjoner kl 07 innen gitte intervall av lufttemperaturen for tre meteorologiske stasjoner i Oslofjorden.

I figur A.6 er vist hyppigheten av tåke innen hvert fem-graders intervall for Jeløy for månedene oktober - mars 1961-70. Månedene oktober, desember, januar, februar og mars viser kvalitativt samme forløp som figur A.4.

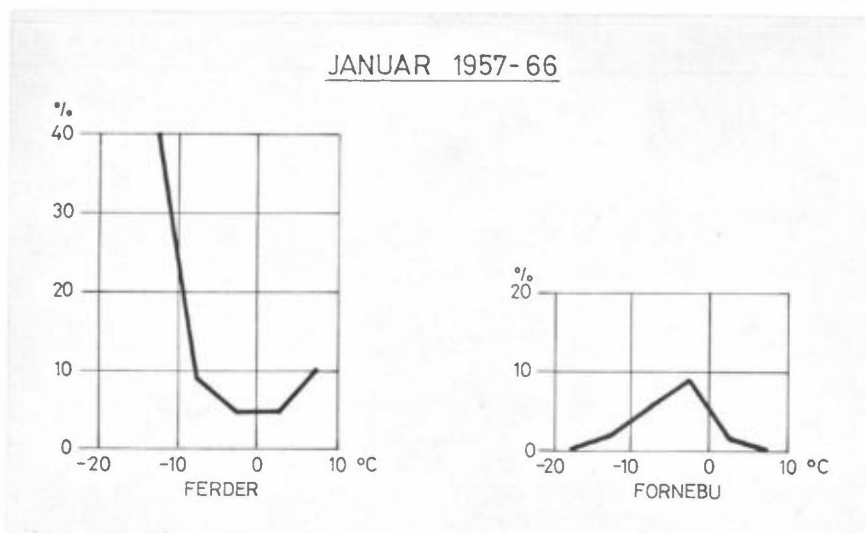
Tilsvarende hyppighetskurver for Fornebu og Ferder er vist bare for januar 1957-66 (figur A.7). Kurven for Ferder viser et forløp typisk for en stasjon ved åpent vann, mens kurven for Fornebu er typisk for stasjoner som ikke ligger ved åpent vann (sml. figur A.3).

De relativt korte dataseriene som her er brukt, viser kvalitativt at en nær åpent vann i Oslofjorden har en sammenheng mellom tåkehyppighet og lufttemperatur som er i samsvar med den typiske sammenheng vist i figur A.4. For kvantitativt å kunne verifisere sannsynlighetskurvene i figur A.5 trenges imidlertid et langt mer omfattende datagrunnlag.





Figur A.6: Observert tåkefrekvens som funksjon av lufttemperaturen for Jeløy 1961-70.



Figur A.7: Observert tåkefrekvens som funksjon av lufttemperaturen for Ferder og Fornebu januar 1957 - 66.

A.3 LITTERATURLISTE

- (A1) Rohde, B. Forsmark kärnkraftstation (AD 77/70).  
Preliminärt utlåtande angående inverkan  
av kylvattenutsläpp på dimfrekvensen i  
Öresundsgrepar.  
Sveriges Meteorologiska och  
Hydrologiska Institut.  
Stockholm, 3/8 1971.
- (A2) Rohde, B. The concentration of liquid water in the  
atmosphere.  
Tellus, 18, 86 - 104, 1966.