

Ola Einbu Baugerød  
Lauritz Haakon Berg  
Brendon Gocaj  
Georg Horntvedt

# Ventilasjonsanlegg for vannkraftverk i fjell

**Mai 2021**

**NTNU**

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk

**Bacheloroppgave**

**2021**





Ola Einbu Baugerød  
Lauritz Haakon Berg  
Brendon Gocaj  
Georg Horntvedt

# Ventilasjonsanlegg for vannkraftverk i fjell

Bacheloroppgave  
Mai 2021

## **NTNU**

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden



<b>Oppgavens tittel:</b> Ventilasjonsanlegg for vannkraftverk i fjell	Gitt dato: 12.01.2021 Innleveringsdato: 20.05.2021
<b>Project title:</b> Ventilation in underground hydropower plants	Gradering <input checked="" type="checkbox"/> åpent <input type="checkbox"/> lukket <input type="checkbox"/> åpent fra _____ Antall sider/bilag: 122
<b>Gruppedeltakere:</b> Ola Einbu Baugerød Lauritz Haakon Berg Brendon Gocaj Georg Horntvedt	Veileder internt: Ola Furuhaug email: ola.furuhaug@ntnu.no tlf: +47 73 41 27 13
<b>Studieretning:</b> Elkraftteknikk	Prosjektnummer: 44
<b>Oppdragsgiver:</b> Pål André Glimen Safet Trto Statkraft AS	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Pål André Glimen email: pal.glimen@statkraft.no

Stikkord:	Keywords:
Ventilasjon	Ventilation
Vannkraftverk	Hydropower plant
Fjellanlegg	Underground hydropower plant





## Abstract

This study is to be used as a tool for Statkraft AS for understanding and designing future ventilation systems in their hydropower plants. In this thesis there will be attached a guide/specification as an aid for designing ventilation systems.

When designing a ventilation system there are multiple standards that need to be followed. These standards are connected to documentaiton of the ventilation system, work environment, indoor climate et al. The project contains a list with standards to help uphold the requirements for maintenance and design of ventilation systems.

The group has visited *Leirfossene vannkraftverk*, one of Statkrafts hydropower plants in Trondheim. Seeing parts of the ventilation system, the inside of a power plant and how it works was educational and made for a great understanding of what was to come. Supervisors Pål Glimen and Safet Trto have provided documents, illustrations and help along the project. The received materials, along with the visit to *Leirfossene vannkraftverk*, supplied a good basis of knowledge regarding ventilation systems in hydropower plants.

For the components in a power plant to operate as projected, and for as long as possible, the ventilation system needs to be designed correctly. After the designing process, the ventilation system also has to be maintained and monitored. Implimenting an industrial control system will serve this purpose.

The project is written in conjunction with a bachelor's degree in electrical power engineering, and the project group has therefore decided to include theory linked to hydropower plants, as this is a relevant subject for electrical engineers.

Included in the project, are examples of the scaling of some components regarding both ventilation and hydropower. This makes it easier to visualize the size of the operations one has to relate to during the scaling process.



## Sammendrag

Denne studien skal brukes for å hjelpe Statkraft med planlegging, innkjøp, prosjektering og drift av fremtidige ventilasjonsanlegg i deres kraftverk. Som et resultat av denne oppgaven legges det frem en spesifikasjon som hjelpemiddel for prosjektering av ventilasjonsanlegg.

Ved prosjektering av et ventilasjonsanlegg må flere krav og normer følges. Dette gjelder dokumentasjon av anlegget, arbeidsmiljø, inneklime osv. Oppgaven inneholder en liste over normer og standarder som må følges for å opprettholde kravene som stilles til dokumentasjon av ventilasjonsanlegg.

Som grunnlag for prosjektet har gruppen vært på befarings ved Leirfossene vannkraftverk i Trondheim. Det var lærerikt å kunne se deler av ventilasjonsanlegget og hvordan et vannkraftverk ser ut på innsiden. Veiledere Pål Glime og Safet Trto, har bidratt med dokumenter, illustrasjoner og hjelp gjennom prosjektet. Det mottatte materialet har vært et godt bidrag som har bedret forståelsen for både vannkraftverk og ventilasjonsanlegg.

Ventilasjonsanlegget bør prosjekteres slik at alle komponentene i et kraftverk virker optimalt og har lengst mulig levetid. Etter prosjektering og dimensjonering må også ventilasjonsanlegget driftes på en god måte. Ofte blir det brukt SD-anlegg, eller Sentral Drift-anlegg, for å automatisere og overvåke anleggene.

Opgaven skrives i forbindelse med en bachelorgrad i elkraftteknikk og gruppen har valgt å også fordype seg i vannkraftverk ettersom det er relevant for utdanningen. Å beskrive vannkraftverk for deretter å sette det i sammenheng med ventilasjonstemaet var en naturlig inngang til oppgaven.

Det er utført beregninger for å demonstrere dimensjonerende størrelser på visse komponenter, i tillegg til luft og kjølebehov. Dette er gjort for å vise metode, fremgangsmåte og typisk størrelsesorden på dimensjonerende parametre.



## Forord

Denne rapporten er skrevet i forbindelse med avsluttende arbeid i bachelorutdanningen for elkraftteknikk. Oppgaven er skrevet ved *Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)* i samarbeid med oppdragsgiver *Statkraft AS*. Arbeidet er utført våren 2021.

Vi vil gjerne takke til vår interne veileder Ola Furuhaug, høyskolelærer ved institutt for elkraft, for gode tilbakemeldinger og hjelp gjennom prosjektarbeidet. Statkraft har gjennom de eksterne veilederne Pål Glimen og Safet Trto gitt oss muligheten til å skrive om et faglig relevant og interessant tema. En stor takk rettes derfor til de for gode innspill og hjelp gjennom prosjektet.

Etter å ha arbeidet med oppgaven har vi fått kompetanse rundt vannkraftverk og tilhørende ventilasjonsanlegg. Disse erfaringene er vi svært takknemlige for å kunne ta med oss videre.

(sign.)



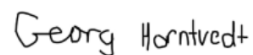
Ola E. Baugerød



Brendon Gocaj



Lauritz H. Berg



Georg Horntvedt



# Innhold

<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemstilling . . . . .	2
1.3 Avgrensninger . . . . .	2
<b>I</b>	<b>4</b>
<b>2 Normer og standarder til ventilasjon</b>	<b>5</b>
2.1 Arbeidsmiljøloven . . . . .	5
2.2 Byggteknisk forskrift (TEK17) . . . . .	5
2.3 NEK . . . . .	6
2.4 IEC/ISO 81346 referansebetegnelsessystem . . . . .	6
<b>3 Ventilasjonsanlegg</b>	<b>7</b>
3.1 Tunneler og sjakter . . . . .	7
3.2 Komponenter . . . . .	8
3.2.1 Vifter . . . . .	8
3.2.2 Filter . . . . .	9
3.2.3 Varmegjenvinnere . . . . .	9
3.2.4 Spjeld . . . . .	10
3.2.5 Kanalsystem . . . . .	10
3.2.6 Avfuktere . . . . .	12
3.3 Sentral Driftsovervåkning . . . . .	15
3.4 Brannventilasjon . . . . .	15
3.5 Radon . . . . .	16
3.6 Geologi . . . . .	16
3.7 Ventilasjonsprinsipper . . . . .	18
3.7.1 Omrøringsventilasjon . . . . .	18
3.7.2 Fortrengningsventilasjon . . . . .	19
3.7.3 Naturlig ventilasjon . . . . .	20
3.8 Mollierdiagram . . . . .	20
<b>4 Vannkraftverk</b>	<b>25</b>
4.1 Turbiner . . . . .	26
4.2 Generator . . . . .	30
4.2.1 Asynkrongenerator . . . . .	30
4.2.2 Synkrongenerator . . . . .	31

4.2.3	Børsteavsug . . . . .	34
4.2.4	Krav til omgivelser . . . . .	36
4.2.5	Kjøling av generator . . . . .	36
4.3	Transformator . . . . .	38
4.3.1	Kjøling av transformator . . . . .	40
4.3.2	Ventilasjon av tørrisolert transformator . . . . .	43
4.4	Hovedkjølesystem . . . . .	44
4.4.1	Arrangement . . . . .	44
4.5	Hjelpeanlegg . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Teori</b>	<b>48</b>
5.1	Effekttap . . . . .	48
5.2	Nettap . . . . .	50
5.3	Leder . . . . .	50
5.3.1	Isolasjonsmateriale . . . . .	52
5.3.2	Isolasjonsklasser . . . . .	53
5.4	Konveksjon . . . . .	55
5.5	Fukt . . . . .	57
5.5.1	Relativ luftfuktighet . . . . .	57
5.5.2	Absolutt luftfuktighet . . . . .	58
5.5.3	Kondens og dugg . . . . .	58
5.5.4	Fuktig isolasjon . . . . .	58
5.6	Beregning av avfukningskapasitet . . . . .	59
<b>II</b>		<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Resultat av undersøkelser</b>	<b>62</b>
6.1	Lufttilførsel og distribusjon . . . . .	62
6.1.1	Distribusjon . . . . .	63
6.1.2	Viftekonfigurasjon . . . . .	64
6.2	Prinsippskisser og funksjonsbeskrivelser . . . . .	65
6.3	Turbinetasje . . . . .	78
6.4	Generator . . . . .	79
6.5	Styring og overvåking . . . . .	80
6.5.1	Sentral driftsovervåking . . . . .	82
6.5.2	Spjeldstyring . . . . .	84
6.6	Geografi og årstider . . . . .	86
6.7	Brannventilasjon . . . . .	88



<b>7</b>	<b>Beregningseksempel</b>	<b>91</b>
7.1	Stasjonstransformator . . . . .	91
7.2	Avfukter . . . . .	95
<b>8</b>	<b>Referansebetegnelser og symbolikk</b>	<b>100</b>
8.1	System for referansebetegnelser . . . . .	100
<b>9</b>	<b>Kostnader</b>	<b>108</b>
9.1	Kostnadsgrunnlaget av ventilasjonsanlegg . . . . .	108
9.2	Energioppfølgingssystem . . . . .	108
9.3	Kraftverksbransjens investering . . . . .	110
<b>10</b>	<b>Refleksjonsnotat</b>	<b>112</b>
<b>11</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>113</b>
<b>12</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>114</b>
<b>13</b>	<b>Vedlegg</b>	<b>122</b>
13.1	Vedlegg 1 – Artikkel . . . . .	122
13.2	Vedlegg 2 – Kravspesifikasjon . . . . .	122

# Formler

3.1	Friksjonstap i kanal . . . . .	11
3.2	Energiinnhold . . . . .	21
4.1	Rotasjonshastighet til rotor . . . . .	33
4.2	Dimensjonering av kjøleluftventil transformator . . . . .	43
4.3	Dimensjonering av kjøleluft transformator . . . . .	44
5.0	Resistans i leder . . . . .	50
5.1	Resistans i leder når temperaturen er kjent . . . . .	51
5.2	Varmepunkts temperatur . . . . .	53
5.3	Termisk konduktivitet gjennom materialet . . . . .	55
5.4	Naturlig konveksjon . . . . .	56
5.5	Tvungen konveksjon . . . . .	56
5.6	Relativ luftfuktighet . . . . .	57
5.7	Absolutt luftfuktighet . . . . .	58
5.8	Kapasitet for fuktete flater i stillestående luft . . . . .	59
5.9	Avfukting av fuktig frisk- og omluft . . . . .	59
5.10	Nødvendig avfuktingskapasitet . . . . .	60
6.1	Tvungen konveksjon . . . . .	79
6.2	Kjøleluft maskin . . . . .	79
7.1	Effekt strålevarme . . . . .	92

## Figurer

3.1	Luftvei ved kun A-tunnel . . . . .	7
3.2	Luftvei ved A-tunnel og U-tunnel . . . . .	7
3.3	Luftvei ved A-tunnel og K-tunnel . . . . .	8
3.4	Luftvei ved A-tunnel, U-tunnel og K-tunnel . . . . .	8
3.5	Prinsippskjema kondensavfukter . . . . .	13
3.6	Arbeidsområde kondens- og sorpsjonsavfukter . . . . .	13
3.7	Prinsippskisse sorpsjonsavfukter . . . . .	14
3.8	Avfukter CDT90 . . . . .	15
3.9	Avfukter ML420 . . . . .	15
3.10	Radiumkonsentrasjon . . . . .	17
3.11	Saltutslag fjell . . . . .	18
3.12	Omrøringsventilasjon . . . . .	19
3.13	Fortrengningsventilasjon . . . . .	20
3.14	Mollierdiagram . . . . .	22
3.15	Temperaturendring mollierdiagram . . . . .	24
3.16	Avfukting kondensavfukter . . . . .	24
4.1	Tverrsnitt av kraftverk . . . . .	25
4.2	Illustrasjon peltonturbin . . . . .	26
4.3	Løpehjul peltonturbin . . . . .	26
4.4	Francisturbin illustrasjon . . . . .	27
4.5	Francisturbin . . . . .	28
4.6	Kaplansturbin . . . . .	29
4.7	Illustrasjon av kaplansturbin med generator . . . . .	29
4.8	Kortslutningsmotor . . . . .	31
4.9	Rotor med utpregede poler . . . . .	32
4.10	Statisk magnetisering . . . . .	33
4.11	Generator fra maskinsal . . . . .	34
4.12	Radial kjøling av generator . . . . .	37
4.13	Aksial kjøling av generator . . . . .	38
4.14	Ideell transformator . . . . .	39
4.15	Tørrisolert transformator . . . . .	41
4.16	Fortrengningsventilasjon tørrisolert transformator . . . . .	43
4.17	Åpent kjølesystem . . . . .	45
4.18	Hjelpeforsyning kjølesystem . . . . .	46
4.19	Klasse 2 stasjonsanlegg . . . . .	47
5.1	Resistans i leder . . . . .	50
5.2	Temperatureffekten på kobber . . . . .	50

5.3	Innvirkning på levetiden til komponenter . . . . .	52
5.4	Isolasjonsklasser . . . . .	53
5.5	Aldringsprosess for isolasjon med hensyn på temperatur og tid . . . . .	54
5.6	Varmeutveksling leder . . . . .	55
5.7	Termisk konduktivitet . . . . .	56
6.1	Vifter i serie . . . . .	64
6.2	Kun A-tunnel tilgjengelig . . . . .	69
6.3	Omlagt ventilasjonsanlegg . . . . .	70
6.4	Luftflyt stor stasjon . . . . .	71
6.5	Luftflyt ved brann . . . . .	72
6.6	Luftflyt stor stasjon . . . . .	73
6.7	Luftflyt middels stor stasjon . . . . .	74
6.8	Middels stor stasjon . . . . .	75
6.9	Påkostet ventilasjonsanlegg middels stor stasjon . . . . .	76
6.10	Fysisk luftfordeling . . . . .	77
6.11	Brukergrensesnitt SD-anlegg . . . . .	83
6.12	Brukergrensesnitt SD-anlegg . . . . .	84
6.13	Styrestrømsskjema spjeld . . . . .	85
6.14	Styrestrømsskjema spjeld . . . . .	86
6.15	Styrestrømsskjema spjeld . . . . .	86
6.16	Beredskapsrom . . . . .	90
7.1	Legrand tørrisolert transformator . . . . .	92
7.2	Avfukting kondensavfukter . . . . .	97
7.3	MX40-guide . . . . .	98
7.4	Ventilgrop Sima vannkraftverk . . . . .	99
8.1	Illustrasjon av et objek . . . . .	101
8.2	Aspekter av et objekt . . . . .	102
8.3	Aspekter av et objekt . . . . .	103
8.4	Aspekter av et objekt . . . . .	104
8.5	Eksempel på korrekt og ukorrekt referansebetegnelse . . . . .	104
8.6	Grafisk presentasjon av klimaanlegg . . . . .	106
8.7	Symboler ventilasjon . . . . .	107
9.1	Energioppfølgingssystem . . . . .	109

# TEGNFORKLARINGER

## LISTE OVER SYMBOLER

Symbol	Enhet	Forklaring
$\Delta p_f$	$Pa$	Trykkdifferanse luftinntak
$\Delta P$	$Pa/m$	Trykk - tapsgradient
$E$	$kJ/(kg\ luft)$	Energiinnhold (entalpi)
$t$	$^{\circ}C$	Temperatur
$X$	$kJ/kg$	Vanninnhold i tørr luft
$n_s$	$rpm$	Omdreiningshasighet for stator og rotor
$f$	$Hz$	Frekvens
$p$	–	Antall poler i stator
$I$	$A$	Strøm
$R$	$\Omega$	Resistans/motstand
$S$	$VA$	Tilsynelatende effekt
$TL$	$kW$	Totalt tap i transformator
$H$	$m$	Høydedifferanse mellom midtpunkt på transformator og avtrekk
$dT$	$^{\circ}C$	Temperaturdifferanse kjøleluft og varmluft/avtrekk
$Q$	$m^3/s$	Kjøleluft
$P$	$W$	Effekt
$T_i$	$^{\circ}C$	Absolutt nullpunkt for gitt materiale
$T$	$^{\circ}C$	Temperatur
$\lambda$	$W/^{\circ}C \cdot m$	Termisk konduktivitet for gitt materiale
$A$	$m^2$	Areal
$p_v$	$Pa$	Partialtrykket til fuktinnholdet i luften
$p_s$	$Pa$	Trykket til fuktig luft i mettet tilstand
$V$	$m^3$	Volum
$M_v$	$g\ vann/time$	Fordampet vann
$M_l$	$g\ vann/time$	Vann som skal fjernes
$M_a$	$g\ vann/time$	Avfukningskapasitet
$\alpha$	$W/^{\circ}C \cdot m^2$	Varmeovergangskoeffisient
$c_p$	$J/^{\circ}C \cdot kg$	Spesifikk varmekapasitet
$Q_v$	$m^3/sek$	Luftmengde
$\rho$	$kg/m^3$	Lufttetthet
$V_a$	$m/s$	Nødvendig kjøleluft
$Q$	$m^3/s$	Kjøleluftbehov for transformator
$k$	$W/m^2 \cdot K^4$	Varmestrålingskonstant

## Definisjoner og forklaringer

**A-tunell** - Adkomsttunnel/transporttunnel aggregattilstand

**AH** - Absolutt fuktighet (Absolute humidity)

**Avtrekksluft** - Forurenset luft

**Avkastluft** - Forurenset luft utenfor stasjonen

**Branncelle** - Område i bygg hvor brann kan spre seg fritt uten å spre seg videre til andre områder

**Dielektrisk egenskap** - Stoffets isolasjonsegenskap

**Diffundere** - Å spre til alle kanter

**Diffusjon** - Spredning av ett stoff i et annet stoff

**Ekom** - All form for elektrisk kommunikasjon

**Entalpi** - Energiinnhold

**Enøk** - Energiøkonomisering

**Friskluft** - Kraftstasjonens inntaksluft

**Hygroskopisk** - Brukt om stoffer som tiltrekker seg vann

**K-tunell** - Kabelsjakt

**Kjølebatteri** - Kjøleelement i ventilasjonsanlegg

**Kondisjonere** - Bestemme fuktighetsgraden

**Konsesjon** - Tillatelse/godkjenning til å gjøre/utføre noe av myndighet

**Rekuperativ** - Gjenvinnende

**RH** - Relativ fuktighet (relative humidity)

**Omluft** - Avtrekksluft som resirkuleres tilbake til stasjonen

**Permeabilitet** - hvor lett en gass eller væske passerer gjennom et medium (geologi)

**Portalbygg** - Første område ved inngang til vannkraftverket

**Potent** - Kan brukes som en synonym for mektig og kraftig

**Trafo** - Brukt i dagligtalen som et annet ord for transformator

**U-tunell** - Avløpstunnel for vann

**Varmebatteri** - Varmeelement i ventilasjonsanlegg

# 1 Innledning

“Statkraft har mer enn 125 års erfaring med vannkraft” [1]. Den teknologiske utviklingen har skutt fart siden mange av disse anlegge ble utbygd. Som følge av dette har også kravene til ventilasjon og luftkvalitet blitt større og flere. Mange vannkraftverk er eldre anlegg bygget for flere titalls år siden, og flere av disse mangler derfor et velfungerende ventilasjonsanlegg. Oppgradering av ventilasjonsanlegg i fjellanlegg kan være krevende da utformingen gjerne ikke legger til rette for utbygging av et moderne anlegg. Det er mange variasjoner og hensyn som må vurderes, og det er utgangspunktet for denne oppgaven.

Per i dag har Statkraft 346 vannkraftverk rundt om i verden som totalt produserer  $55,7 \text{ TW/h}$ , og har en samlet installert effekt på  $14.402 \text{ MW}$ . De fleste av kraftverkene til Statkraft i Norge er fjellanlegg. Kraftstasjoner som er bygget inn i fjell kan oppleve problemer med fukt og varierende temperatur på en helt annen måte enn i vanlige bygninger. I vannkraftverk er det en rekke elektriske komponenter som helst skal ha så lang levetid som mulig. Tilstrekkelig ventilasjon av disse komponentene kan bidra til dette, og følgelig er det ønskelig å dimensjonere ventilasjonsanleggene deretter [1].

Rapporten er bygget opp i to deler. *Del 1* er en teoretisk gjennomgang av oppbygging og funksjonen til henholdsvis ventilasjonsanlegg og vannkraftverk. Deretter følger en del med elektroteknisk teori og fysiske prinsipper.

I *Del 2* kommer beskrivelser av nåværende løsninger, forslag til nye, og ønsker om fremtidige løsninger og funksjoner fra Statkraft. Her følger også noen eksempler på beregninger. Som vedlegg til rapporten ligger en spesifisering som Statkraft kan bruke som utgangspunkt for videre arbeid på dette temaet.

## 1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for prosjektet er Statkraft sitt ønske om å standardisere måten ventilasjonsanlegg i vannkraftverk prosjekteres og spesifiseres. Statkraft er ikke fornøyd med flere av sine eksisterende ventilasjonsanlegg. Problemet ligger i at vannkraftverk ikke nødvendigvis følger de samme kravene for ventilasjon som boliger og næringsbygg. Det eksisterer mye god kompetanse på dette området, men mindre om spesielle utfordringer som kan oppstå i vannkraftverk. Det er mange forskjellige faktorer og parametere som spiller inn i et fjellanlegg som skal ventileres. De mest

relevante utfordringene ventilasjonen skal hanskles med er fukt, varme og radon. Statkraft ønsker en spesifisering som beskriver særskilte behov for leverandørene sine. Denne skal omfatte anbefalte komponenter, byggetekniske variasjoner, og krav som stilles for komponenter eller områder i kraftverket. Håpet er at dette også kan bidra til kompetanseheving på området internt i Statkraft.

## 1.2 Problemstilling

*Hva må spesifiseres for at ventilasjonsanlegg skal bidra til å optimalisere drift og levetid til komponenter i Statkraft sine vannkraftverk?*

Utgangspunktet for problemstillingen er å identifisere hovedutfordringer rundt Statkrafts ventilasjonsanlegg i fjell. De primære utfordringene er fukt, varmeutvikling, radongass og brannsikkerhet. Dokumentasjon fra leverandør er også en del av dette, og ønskes utført på en spesifikk måte. Vekting av nevnte utfordringer må vurderes slik at de mest kritiske kan prioriteres. Dette skal samles til en felles spesifisering som legger gjeldene normer, regler og behov til grunn. Formålet er å oppnå en felles forståelse mellom Statkraft og leverandør rundt hvilke behov som skal dekkes.

## 1.3 Avgrensninger

Som en del av oppgaven står det skrevet: “Det er interessant å berøre enøk tematikk i denne oppgaven, særlig i anlegg der det brukes mye energi til oppvarming av tilluft (særlig der eventuelle tiltak er gjennomførbare i praksis).” Dette var utenfor oppgavens hovedfokus. Etter samtaler med fagpersoner i bransjen har det kommet frem hvordan problemstillingen ikke er et stort fokusområde.

Et av punktene i oppgaveteksten sier: “Gruppen skal designe et typisk eksempel-anlegg, med komplett el-dokumentasjon.” Etter kommunikasjon med oppdragsgiver har gruppen og veiledere blitt enige om at dette ikke skal utføres i full skala. Det ble derimot tatt utgangspunkt i utvalgte komponenter eller områder og sett nærmere på dette.

Hovedfokuset i denne oppgaven har vært sentrert rundt spesifiseringen. Fokus har også vært rettet mot forskrifter, normer og krav som må etterleves ved drift, dimensjonering og dokumentasjon av ventilasjonsanlegg. Håpet er at dette skal forenkle arbeidet med å finne frem til nødvendige forskrifter for oppdragsgiver. I



tilleg er det utført dimensjoneringseksempler av transformatorrom og avfukter i turbinkjeller.

Fokuset har vært på ventilasjon av selve vannkraftverket. Ventilering av oppholdsrom for personalet er ikke spesielt relevant med tanke på problemstillingen, og er derfor ikke omtalt i særlig grad.

# **Del I**

## 2 Normer og standarder til ventilasjon

Det stilles forskjellige krav til nye anlegg som bygges. Relevante standarder, krav og normer skal følges for å sikre kvalitet og regelmessighet i konstruksjonen.

### 2.1 Arbeidsmiljøloven

For å få godkjent søknad om samtykke fra Arbeidstilsynet skal dokumentene utføres i henhold til veiledning som regelverket og arbeidsmiljøloven [2] krever:

- *Krav til det fysiske arbeidsmiljøet* - Arbeidsmiljøloven §§ 4-1 første og andre ledd, og 4-4 første og andre ledd.
- *Krav til inneklima og ventilasjon* - Arbeidsforskriften §§ 2-14 og 7-1
- *Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen* - Ventilasjonssystemet bør være basert på normene i veiledningen.

### 2.2 Byggteknisk forskrift (TEK17)

Forskrift om tekniske krav til byggverk skal følge veiledning [3].

- *Sikkerhet ved brann* - § 11-10 Prosjektering
- *Inneklima og helse* - § 13-1 Generelle krav til ventilasjon. § 13-5 Radon.
- *Installasjoner og anlegg* - Krav til bruk av SD-anlegg gitt § 15-1 Generelle krav til varme- og kjøleinstallasjoner.
- *Tavlenormen - Lavspenningstavler og kanalskinnesystem* - NEK 439

## 2.3 NEK

- *Brann* - NS-EN 12101 Brannventilasjonssystemer.
- *Visuell utførelse* - NEK 144:2017 Grafiske symboler for el- og ekom-dokumentasjon.
- *Grafiske symboler*-NS-EN 12792 Omfatter grafiske symboler for ventilasjon i bygninger.
- *Dokumentasjon* - IEC 61082. Dokumentutførelse.
- *Forskrift* - NEK FEF Forskrift om elektriske forsyningsanlegg med veiledning. § 4-8
- *Informasjonsutveksling* - IEC 60870-5. Gjeldende norm for kommunikasjon mellom kraftstasjonen og driftssentral.
- *Maskinsikkerhet* - NEK EN 60204-1
- *Elektriske lavspenningsinstallasjoner* - NEK 400, ventilasjon av batterirom og andre lavspenningsinstallasjoner.

## 2.4 IEC/ISO 81346 referansebetegnelsessystem

Ventilasjonen skal utføres i henhold til:

- IEC/ISO 81346-1 *Generelle Krav*
- IEC/ISO 81346-2 *Klassifisering av objekter og koder for klasser, referansebetegnelsessystem med tabell til objektets funksjon*
- IEC/ISO 81346-10 *Power Supply Systems*, det skal komme ut en egen IEC/ISO -10 for *Hydropower Production* i løpet av året (2021).
- IEC/ISO 81346-12 *Construction Works*, inneholder informasjon om hvordan ventilasjonsanlegget skal utføres

### 3 Ventilasjonsanlegg

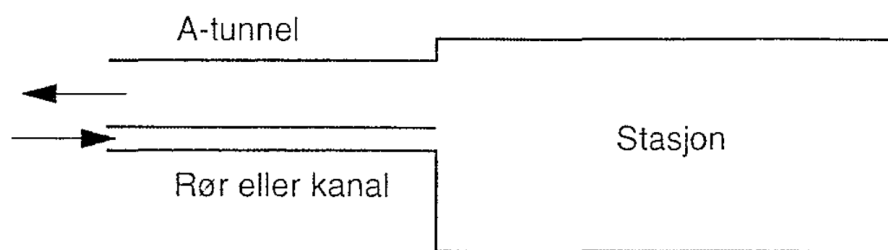
Nedenfor kommer generell teori om komponenter i et ventilasjonsanlegg og hvordan de fungerer. Ventilasjonsanleggets oppbygging og prinsipper for ventilasjon omtales også.

#### 3.1 Tunneler og sjakter

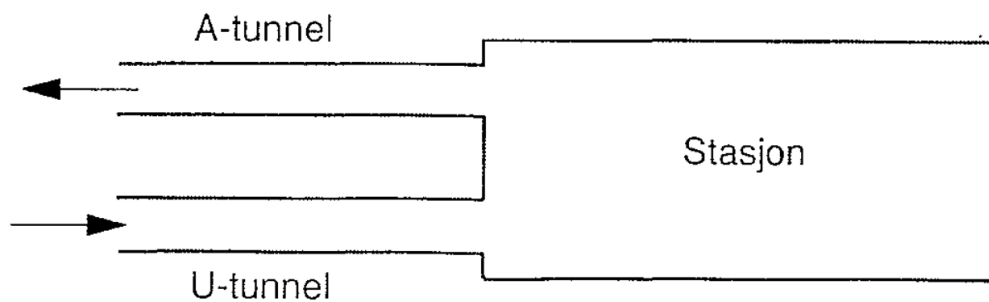
Det finnes hovedsaklig tre mulige sjakter og tunneler som kan anvendes for tilførsel eller avtrekk av luft.

- A-tunell står for adkomsttunnel eller transporttunnel.
- U-tunnel er vannavløpet. Luft over vannspeilet i tunnelen.
- K-tunnel er kabelsjakt eller tunnel.

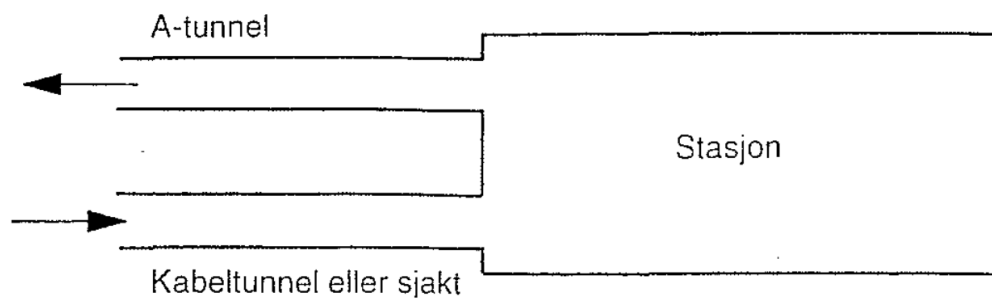
Nedenfor illustreres fire forskjellige kombinasjoner.



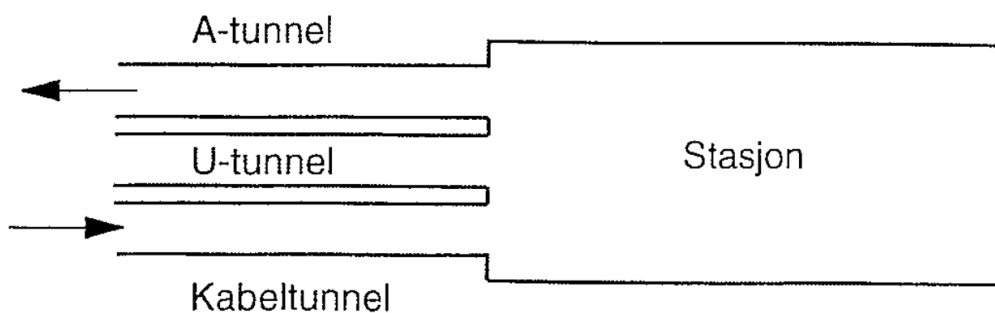
Figur 3.1 – A-tunnel [4, s. 7]



Figur 3.2 – A og U-tunnel [4, s. 8].



Figur 3.3 – A og K-tunnel [4, s. 9].



Figur 3.4 – A, U og K-tunnel [4, s. 10].

## 3.2 Komponenter

Ventilasjonsanlegget er bygget opp av en rekke hovedkomponenter. I hovedsak består det av et aggregat med vifter, varme- og kjølebatterier, spjeld, kanaler, ventiler, luftfilter og eventuelt andre løsninger for varme og kjøling. Aggregatet består gjerne av to vifter, én for friskluft og én for avtrekk.

### 3.2.1 Vifter

Det er viftene som sørger for at luften blir satt i bevegelse i systemet. Størrelse og effekt på disse blir bestemt av nødvendig luftskift og lengde på kanaler inn og ut fra stasjonen. Det er trykkdifferansen i kanalen som avgjør hvor mye effekt som trengs for å få nødvendig mengde friskluft. De tre vanligste viftetyperne er *radialvifte*, *aksialvifte* og *kammervifte*. Disse viftetyperne har forskjellige egenskaper og kan benyttes etter hva som passer utforming av rom og kanaler.

Kammervifte og radialvifte kan begge betegnes som sentrifugalvifter. I kammerviften blir luftstrømmen sendt videre i aksialretning, mens i radialviften blir luftstrømmen bøyd av  $90^\circ$  i forhold til innløpet. For en aksialvifte er retningen på innløp- og utløpsstrømning den samme. Plassering og antall vifter påvirker hvordan luftflyten blir i anlegget. De bør plasseres slik at trykkdifferansene ikke blir for store, og slik at tilstrekkelig luftskift oppnås i stasjonen [5].

### **3.2.2 Filter**

Filtrene i anlegget har flere funksjoner. De skal beskytte komponenter i aggregatet fra partikler og støv, samt legge til rette for at hovedkomponentene i kraftverket får de driftsforholdene som er nødvendig. Hva slags forurensning kraftverkkomponentene avgir vil bestemme hva slags filter som må brukes. Det antas at oljestøv/oljedamp som avgis fra oljefylte transformatorer er den viktigste forurensningen å transportere/filtrere ut. Dersom det skulle oppstå kortslutning mellom vindinger på transformatoren vil en eventuell lysbue kunne antenne oljedampen. Det kan resultere i eksplosjon og brann i anlegget. Behovet for å fjerne denne forurensningen vil kunne ha innvirkning på valg av varmegjenvinner som omtales i neste avsnitt. Filteret vil påvirke trykkfallet i anlegget etter hvor fint det er, og hvor lenge det har vært i bruk. Det vil over tid tettes igjen av partikler, og må byttes regelmessig [5].

### **3.2.3 Varmegjenvinnere**

Varmegjenvinneren er en komponent som gjør det mulig å varme opp friskluft med energien fra avtrekksluften. Dette er en energibesparende løsning. Det må nevnes at dette er mindre aktuelt i denne problemstillingen på grunn av det enorme kjølebehovet til kraftverket. De tre mest brukte løsningene er plategjenvinner, rotasjonsgjenvinner og vann-glykol gjenvinner. Disse kan igjen klassifiseres som regenerative og rekuperative gjenvinnere. Regenerative gjenvinnere kan utnytte både følt og latent temperatur.

Latent temperatur er den temperaturen som skal til for at et stoff skal endre aggregatstand. Et problem med denne typen gjenvinnere er at friskluft og avtrekk kan komme i kontakt med hverandre. Det vil si at friskluften kan bli forurenset. Det er ikke ønskelig i visse tilfeller. I denne kategorien finnes roterende gjenvinner.

Regenerative gjenvinnere utnytter kun den følte varmen, men fordelene er at luftstrømmene ikke er i kontakt med hverandre og forurensning av friskluft unngås. I denne kategorien finner vi vann-glykol- og plategjenvinner.

**Roterende gjenvinner** er den mest brukte løsningen i Norge. Energien fra avtrekksluft overføres til friskluften i et roterende hjul der virkningsgraden kan være opp mot 85 %. Luftstrømmene er ikke adskilt og friskluft kan forurenses. Overført varme kan reguleres ved å endre hastighet på hjulet.

**Plategjenvinnere** lar friskluft og avkast passere på hver sin side av et antall plater. Luftstrømmene går på kryss av hverandre, og kan ha virkningsgrad opp mot 60 %. Her er det ikke kontakt mellom luftstrømmene og sjansen for forurensning er veldig lav.

**Vann-glykol gjenvinner** benytter seg av et rørsystem med et sirkulerende medium. Dette er gjerne vann tilsatt en frostvæske. Den ene delen av rørsystemet går gjennom avtrekkskanalen og den andre delen i friskluftkanalen. Væsken blir varmet opp når den befinner seg i avkastkanalen og avgir igjen denne varmen når den sirkulerer videre til friskluftkanalen. Dette systemet har en virkningsgrad på rundt 45-60 % [5].

### 3.2.4 Spjeld

Spjeld gjør det mulig å styre mengde og vinkel på luftstrømmen, samt å distribuere den til ønskede soner. Det brukes dynamiske og statiske spjeld etter behov. Statiske spjeld er låst i en fast posisjon/vinkel, i motsetning til dynamiske spjeld der vinkel kan reguleres etter behov. I spesielle situasjoner som brann, har spjeld en viktig funksjon i å sperre eller styre luftstrømmen slik at anlegget tar minst mulig skade. Brannspjeld vil bli omtalt senere [5].

### 3.2.5 Kanalsystem

Kanalsystemet i ventilasjonsanlegget distribuerer luft til forskjellige områder. Ønsket luftmengde til kraftverket er avgjørende for dimensjonene på kanalsystemet. Det er ønskelig at kanalene gir minst mulig trykkfall slik at energien som kreves for å flytte luften ikke blir unødvendig stor. Det er ønskelig å legge kanalene slik at de blir så korte som mulig og har færrest mulig svinger og hjørner. Vifter må dimensjoneres etter den kanalveien med størst trykkfall, såkalt "kritisk vei" [5]. Det



er vanlig å benytte sirkulære kanaler da disse gir den mest optimale strømmingen. Kanaler er ofte isolert for å beskytte mot ytre påvirkninger. Dette kan hindre kondens og gjøre at lavere kulde- eller varmetap oppnås. Ved brann vil riktig isolasjon hindre transport av varmestråling som kan antenne i andre rom.

Bruken av dedikerte ventilasjonskanaler er varierende. For å oppnå best mulige forutsetninger for ventilasjonsanlegget er det hensiktsmessig, men kanaler er dyrere enn å føre luft gjennom allerede etablerte tunneler og kanaler i stasjonen. Dette kan være adkomsttunnel, kabelsjakt, vannavløp eller andre løsninger.

Fra luftinntak og inn til tunnelen vil det som regel være lite avbøyninger på en eventuell ventilasjonskanal. Det er friksjonen mot kanalens vegger som skaper trykktapet. Dette beskrives i Formel 3.1 [5].

$$\Delta p_f = l \cdot \Delta P \quad (3.1)$$

$\Delta p_f$  = Trykkdifferanse [ $Pa$ ]

$l$  = Lengde på kanal [ $m$ ]

$\Delta P$  = Trykk - tapsgradient [ $Pa/m$ ]

Videre vil det oppstå tap også på grunn av forskjellige komponenter, for eksempel filter, spjeld og vifter. Avbøyninger vil også skape trykktap. Alle disse tapene omtales som "støt-tap". Det vil også oppstå trykktap over avgreininger i kanalen.

### 3.2.6 Avfuktere

Luftavfuktere brukes ofte i vannkraftverk. Avfukterens funksjon er å trekke vann-damp ut av luften. I et vannkraftverk kan det være gunstig fordi ulike komponenter kan bli skadet av for høy luftfuktighet. Det er hovedsakelig snakk om to typer avfuktere, kondensavfuktere og sorpsjonsavfuktere.

	$\leq 0^{\circ}\text{C}$	1-15 $^{\circ}\text{C}$	$\geq 15^{\circ}\text{C}$
Kondensavfukter	Ingen effekt	Ingen effekt/ dårlig effekt	Godt egnet
Sorpsjonsavfukter med tørkerotor	Ikke anbefalt	Godt egnet	Godt egnet
Sorpsjonsavfukter med utblåsing	Godt egnet	Godt egnet	Godt egnet

Tabell 3.1 – Arbeidsområdene til avfuktere [6].

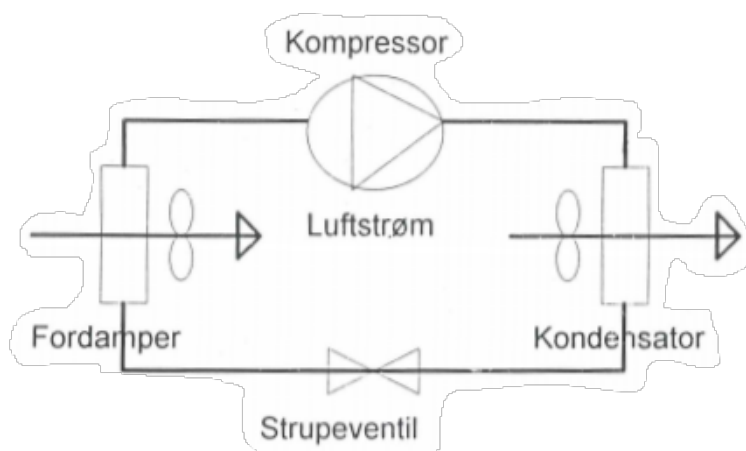
Tabell 3.1 beskriver tre måter å bli kvitt fuktigheten fra luften på under gitte temperaturer. Det er viktig å merke seg at ved å velge utblåsing av fuktig luft, kan fuktproblemet bli flyttet fra innsiden av stasjonen til tunnelen der det kan skaper nye problemer som blir beskrevet i underkapittel 6.1.

#### Kondensavfuktere

Kondensavfukteren er den mest brukte avfukteren. Disse finnes i flere forskjellige utforminger til forskjellige bruksområder. Prinsipielt består en kondensavfukter av en kompressor, kondensator, ekspansjonsventil og fordamper. Luften trekkes gjennom en kald fordamper som kjøler den ned. Den avkjølte luften har ikke evnen til å holde på like mye vann, og en del av dette skilles ut. Luften blir så ført gjennom en kondensator, hvor energien som luften mistet under avkjøling, tilbakeføres. Den tilføres i tillegg elektrisk energi fra kompressoren. Dermed har lufttemperaturen delvis økt sammenlignet med temperaturen den hadde fra før. I tillegg er vanninnholdet betraktelig redusert[5].

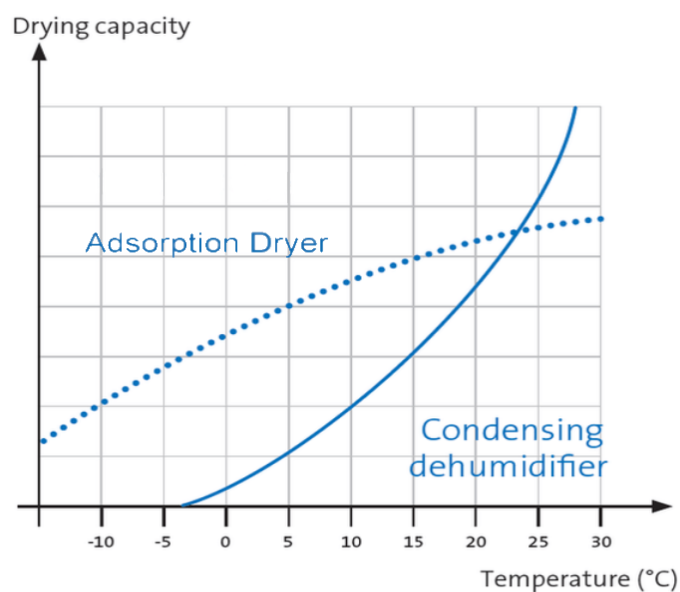
Gjennom et lukket rørsystem sirkuleres en kjøleveske mellom de forskjellige komponentene. I fordamperen tar væsken opp varme, fordamper og går over til gassform. Trykket økes i kompressoren og gassen går over til væske ved å gi fra seg varme

i kondensatoren. Trykket reduseres så i strupeventilen, og prosessen repeteres. Figur 3.5 illustrerer dette.



Figur 3.5 – Prinsippskjema for en kondensavfukter [4, s. 32].

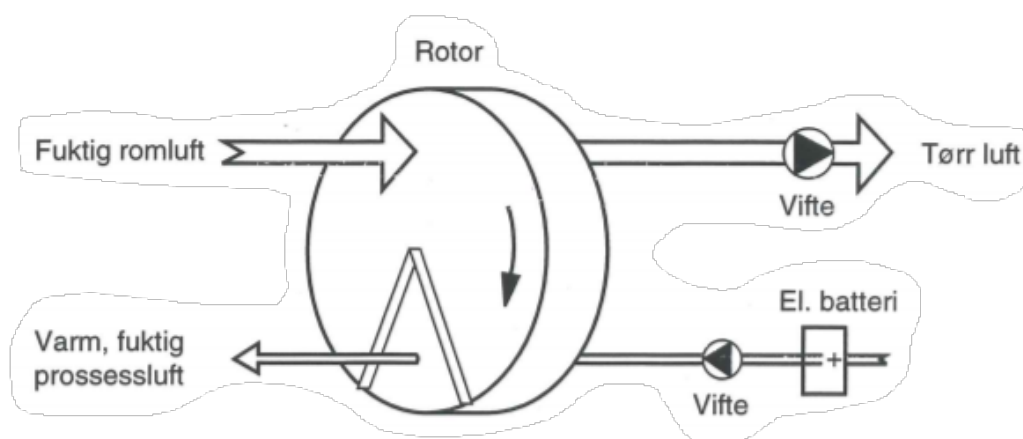
Kondensavfuktere benyttes ved lufttemperaturer over ca.  $12^{\circ}\text{C}$  [4]. Mange kondensavfuktere kan operere fra  $0^{\circ}\text{C}$  og oppover, men de vil ha betraktelige dårligere egenskaper. Ved lufttemperaturer under ca.  $10^{\circ}\text{C}$  vil det utskilte vannet fryse på fordamperflatene. Det vil da være gunstig å benytte seg av en sorpsjonsavfukter. Figur 3.6 viser arbeidsområde og effektivitet til kondens- og sorpsjonsavfuktere. Grafen viser avfuktingseffekt som en funksjon av temperatur, og illustrerer blant annet hvordan ytelsen til en kondensavfukter blir dårligere ved lave temperaturer.



Figur 3.6 – Arbeidsområde for kondens- og sorpsjonsavfuktere [7].

## Sorpsjonsavfuktere

Figur 3.7 illustrerer sorpsjonsprinsippet. Luften trekkes gjennom en saktegående motor. Materialet rotorflaten er laget av danner små kanaler luften kan trekkes gjennom, og er designet slik at kontaktarealet mellom luft og rotoren blir størst mulig. Kanalveggene er belagt med et hygroskopisk materiale som suger til seg fuktighet, og tørr luft blir sendt ut på andre siden. Avfuktere har i tillegg en del hvor en vifte blåser oppvarmet luft gjennom rotor. Den varme luften absorberer vannet fra det hygroskopiske materialet. Den fuktige oppvarmede luften kan så blåses ut i omgivelsene, resirkuleres eller få vannet skilt ut.



Figur 3.7 – Prinsippskisse for en sorpsjonsavfukter [4, s. 33].

Sorpsjonsavfuktere har god avfuktningsevne helt ned til  $-20^{\circ}\text{C}$ . Dette lar seg gjøre fordi den baserer seg på fordamping i motsetning til kondensering. De er derfor mer anvendelige enn kondensavfuktere, og er å foretrekke ved lavere temperaturer. Figur 3.6 viser derimot at sorpsjonsavfuktere ikke bare er gunstige når det er snakk om lave temperaturer.[4]

En *Dantherm CDT90* kondensavfukter vil ha en avfuktingskapasitet på omtrent 2,5 liter i timen ved  $30^{\circ}\text{C}/60\% \text{ RH}$ , og ca. 0,5 liter i timen ved  $10^{\circ}\text{C}/60\% \text{ RH}$ . Den er veldig sensitiv for temperaturforandringer.

En *Munters ML420* vil ha en avfuktingskapasitet på omtrent 3 liter i timen ved  $30^{\circ}\text{C}/60\% \text{ RH}$ , og ca. 2,6 liter i timen ved  $10^{\circ}\text{C}/60\% \text{ RH}$ . Den påvirkes i liten grad av temperaturforandringer. Figur 3.8 og Figur 3.9 viser bilder av disse avfukterne.



Figur 3.8 – CDT90 [8].



Figur 3.9 – ML420 [9].

### 3.3 Sentral Driftsovervåkning

Sentral driftsovervåkning er et system som brukes til å overvåke og eventuelt styre ventilasjonsanlegget. Dette er et verktøy brukt av driftspersonell i stasjonen. Kan bygge på et behovsstyrt ventilasjonsanlegg, men ikke nødvendigvis.

### 3.4 Brannventilasjon

Ved brann i kraftverk, kan ventilasjonsanlegget bidra til å hindre spredning. Det er også viktig å påpeke at dersom det ikke foreligger en god strategi ved brann, vil ventilasjonen kunne bidra til ytterligere spredning. Det er vanlig å dele anlegg inn i adskilte brannceller som isolerer rom fra hverandre og vil hjelpe til å begrense skadeomfanget. De to hovedstrategiene som gjelder ved brann, er *trekk ut*, eller *steng inne*. Begge løsningene har fordeler og ulemper [10].

#### Trekk ut

Prinsippet baserer seg på å kjøre alle viftene for fullt i en periode. Trykket i kanalene skal være høyt nok for å forhindre at røyk og eventuelle andre gasser sprer seg i kanalsystemet. Hvis brannen tiltar og trykket øker vil det etter hvert oppstå spredning i kanalen likevel, og viftene må stanses. Denne løsningen krever en omfattende analyse for å bli godkjent i henhold til forskrifter.

## **Steng inne**

Dette prinsippet bruker spjeld for å hindre spredning av brannen. Dersom brann detekteres vil disse lukkes slik at kanalen sperres av. Denne løsningen hindrer effektivt spredning av brannen uten videre analyse av anlegget. Brannspjeld bør også være isolert slik at varmestråling ikke slipper inn i kanalen. “Steng inne” er ofte en billigere, enklere og sikrere måte å håndtere brann på enn “trekk ut”. Det trengs ikke tas videre hensyn i prosjektering av anlegget, og vil tilfredsstillende forskrifter uten vurdering av anlegget.

Ved brann i kraftverket er det viktig at det finnes en trygg rømningsvei. Det finnes forskjellige løsninger på dette. De fleste kraftverk har én adkomsttunnel og én kabelsjakt. En av disse tunnelene brukes gjerne som rømningsvei ved å manipulere luftstrømmen med dedikerte brannvifter eller ventilasjonsviftene.

Redningsrom er også brukt i visse kraftverk. Dette skal være et sikkert rom med tilstrømning av friskluft ved brannsituasjon. Et slikt rom vil kreve dedikert luftkanal og vifte for å sikre frisk luft uten forurensing fra områder med brann. Dette omtales detaljert i kapittel 6.7[11].

## **3.5 Radon**

Radon er en radioaktiv edelgass som kan øke risikoen for lungekreft hvis det trekkes inn i lungene, og er den nest største årsaken for lungekreft i Norge [12, s24]. Radon er et biprodukt av uran og finnes naturlig mange steder i jordluft. Ved lekkasjer fra grunnen vil radongassen sige inn, og blande seg med inneluften. Grenseverdien for radon er satt til  $200 \text{ Bq/m}^3$ , men tiltak bør vurderes dersom konsentrasjonen overstiger  $100 \text{ Bq/m}^3$  [3, § 13-5]. Fjellanlegg er spesielt utsatt da de er omringet av fjellvegger hvor det kan sige inn høye konsentrasjoner av edelgassen. Det anses som en risiko for ansatte som jobber der, selv om kraftstasjoner oftest er ubemannet. Det må derfor gjøres tiltak for å redusere konsentrasjonen eller fjerne gassen. Oversikt over radiumkonsentrasjon i bergarter blir vist i Figur 3.10

## **3.6 Geologi**

Fjell som stasjonen er utført i, har også en innvirkning på miljøet inne i stasjonen. Permeabiliteten til fjellet kan være med å påvirke inneklima, enten ved at vann

eller radon kan sile inn. Slik det ble nevnt i underkapittel 3.5, er radium også et biprodukt av uran. I 1996 utga Statens Strålevern hefte hvor det var gjort undersøkelser av byggegrunn og radon i inneluft. Der finnes det geologiske vurderinger av radiumkonsentrasjon i undergrunnen og således innvirkning på radonkonsentrasjon i inneluften. Det er viktig å påpeke at det er flere faktorer som påvirker byggegrunnens egenskaper til å skille ut radon i tillegg til konsentrasjonen av de radioaktive elementene i fjellveggen. Tabell fra hefte gitt i Figur 3.10 [13]:

Bergart/jordtype	Radiumkonsentrasjon ( Bq/kg )
Normal granitt	20 – 120
Uranrik granitt	100 – 600
Gneis	20 – 100
Dioritt	1 – 120
Sandstein	5 – 60
Kalkstein	5 – 20
Skifer	10 – 120
Alunskifer 1) fra midtre kambrium	120 – 600
Alunskifer 2) fra øvre kambrium eller nedre ordovicium	600 – 5000
Alunskifer rik jord	100 – 2000
Morenejord	20 – 80
Leire	20 – 120
Sand og silt	5 – 25

Figur 3.10 – Radiumkonsentrasjon i undergrunnen[13].

Fjellets permeabilitet har også innvirkning på inntrengning av vann gjennom veggene og kan tas i betraktning ved planlegging av luftavfuktning, og kan ha ekstra innvirkning på miljøet i stasjonen. Fuktigheten er vist i Figur 3.11.



Figur 3.11 – Saltutslag, lekkasje fra fjellet og en diffuser-doner.

Den grå boksen på Figur 3.11 er blant en av flere, som står i maskinhallen på Leirfos-sene kraftverk. Dette er diffuser-doner som er en del av fortrenningsventilasjonen i kraftverket. Fortrenningsventilasjonen er beskrevet i underkapittel 3.7.2

## 3.7 Ventilasjonsprinsipper

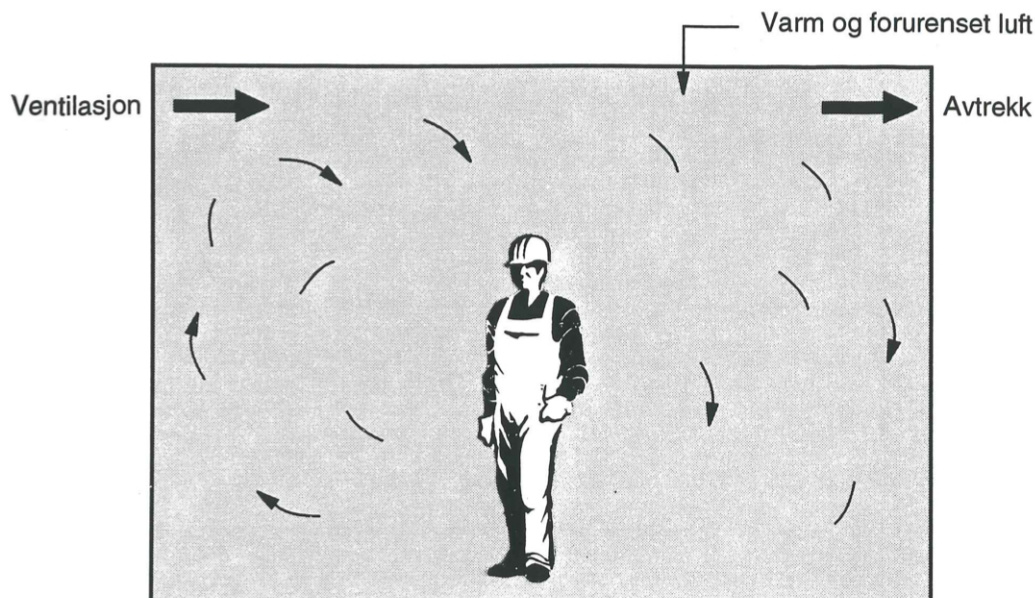
Det er stort sett tre forskjellige prinsipper som benyttes i ventilasjonsteknikk. I vannkraftverk er det forskjellig fra kraftverk til kraftverk hva som blir brukt, men som oftest er det en blanding av de tre forskjellige prinsippene.[5]

### 3.7.1 Omrøringsventilasjon

Omrøringsventilasjon baserer seg på å fortynne luften. For å skape god omrøring i rommet tilføres det luft med høy lufthastighet. Dette skjer utenfor oppholdssonen



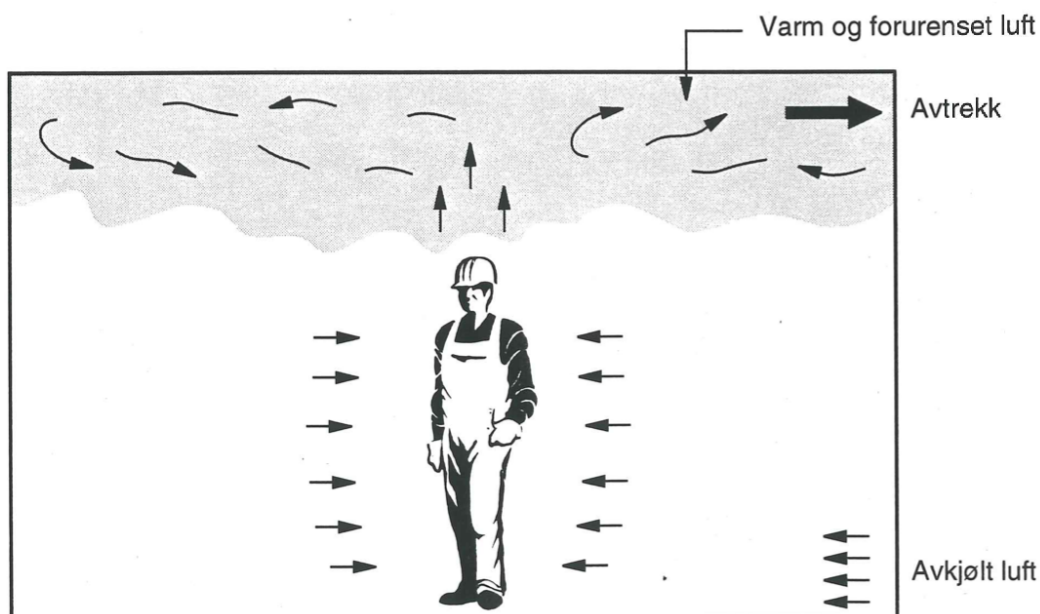
for å unngå trekk. Innblandingen sikrer en ensartet luftkvalitet, og en homogen temperatur. Denne egenskapen gjør omrøringsprinsippet ideelt for bruk i barnehager, skoler og kontorbygg.



Figur 3.12 – Omrøringsventilasjon [4, s. 25].

### 3.7.2 Fortrengningsventilasjon

Ved bruk av fortrengningsprinsippet tilføres luften med lav hastighet direkte i oppholdssonen. Lav innblåsningshastighet sørger for trekkfrie forhold. Det tilføres undertemperert luft fra ventiler plassert på bakkenivå. Maskiner og mennesker i rommet sørger for at det oppstår en konvektiv luftstrøm der kald luft stiger opp, tar med seg overskuddsvarme og forurensninger opp mot taket der avtrekket er plassert. Det gjør at fortrengningsventilasjon egnes for ventilasjon og avkjøling, men ikke for oppvarming. Benyttes i industri med maskiner, biblioteker, kinosaler o.l. [5].



Figur 3.13 – Fortrengningsventilasjon [4, s. 24].

### 3.7.3 Naturlig ventilasjon

“Ved naturlig ventilasjon benytter man vindkrefter og termisk oppdrift i ventilasjonspiper” [14]. Temperaturforskjellene inne og ute i inngangstunnelen skaper luftbevegelse som fører til luftskifte. En annen drivkraft er vindsug ved utløpet. Mange fjellanlegg benytter naturlig ventilasjonsprinsipp i inngangspartiet frem til fordelingsrommet. Deretter benyttes mekanisk ventilasjon for resten av anleggsdelene og vi oppnår blandingsventilasjon.

## 3.8 Mollierdiagram

For å forstå hva som foregår når luft varmes opp, kjøles ned eller avfuktes, er Mollierdiagram et av de beste hjelpemidlene. Det gjør det mulig å forstå tilstandsendringene i luften på en oversiktlig måte. Diagrammet viser sammenhengen mellom energiinnhold, vanninnhold, relativ luftfuktighet og temperatur. Det er et viktig verktøy for å gjennomføre dimensjonering av komponenter i et ventilasjonsanlegg [4].

Energiinnholdet defineres som 0 ved  $0^{\circ}\text{C}$  og ved vanninnholdet  $X = 0$ . Dette er fordi temperaturskalaen er relativ og gir relative verdier for energiinnholdet. Det

er vanlig å benytte måleenheten Celsius, og normaltrykk på 1013 *mbar* gjelder for diagrammet. Utrykket gjelder for utregning av energiinnholdet ved normaltrykk.

$$E = 1 \cdot t + 1.8 \cdot X \cdot t + 2450 \cdot X \quad (3.2)$$

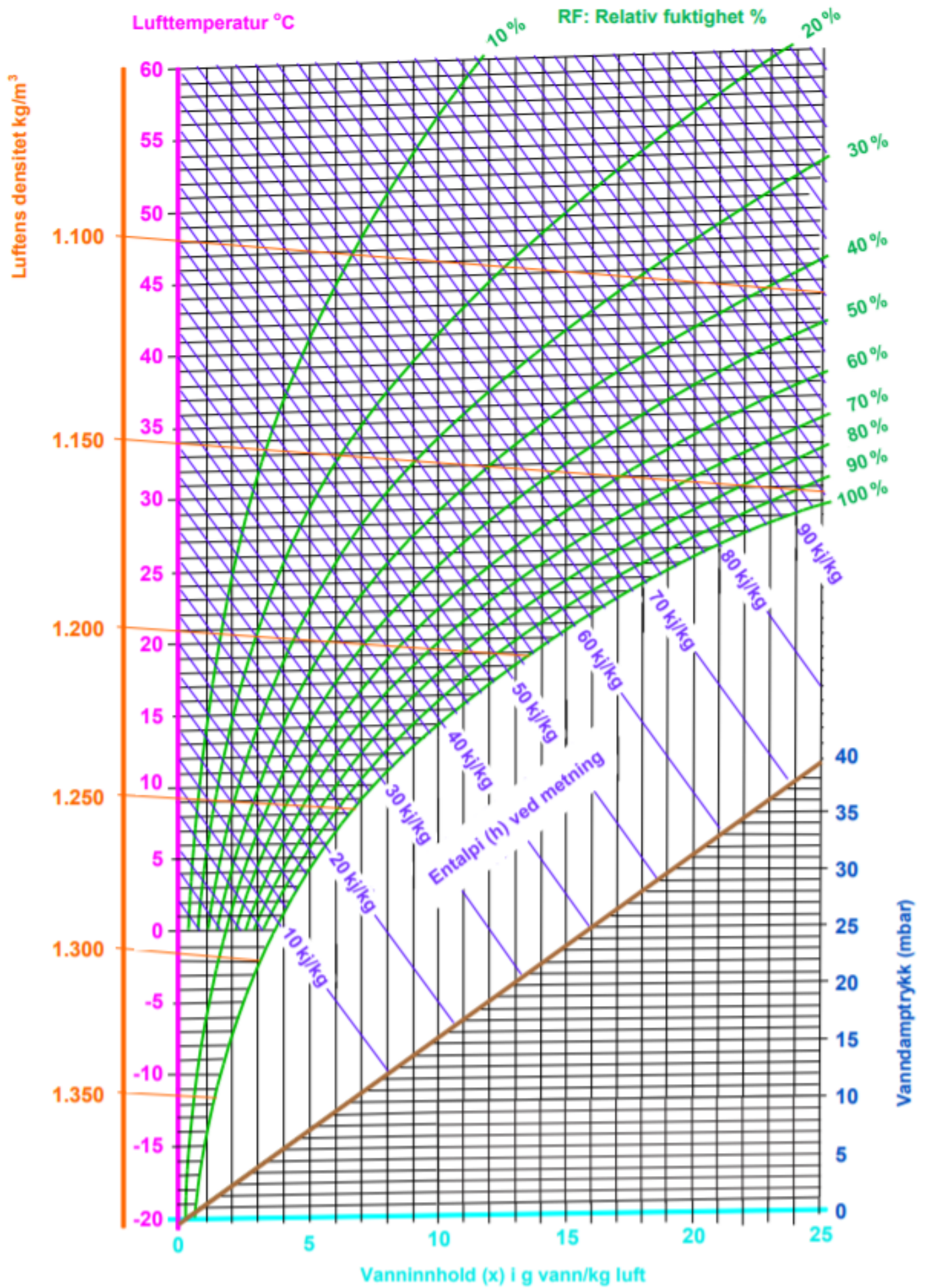
$t$  = temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$X$  = vanninnhold i tørr luft [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]

De viktigste begrepene og linjene i Mollierdiagrammet er:

- *Relativfuktighet* - De grønne kurvene viser relativ fuktighet gitt i %.
- *Metningslinjen* - Den grønne linjen som angir 100 % relativ fuktighet for luften er metningslinjen. Her er ikke luften lenger i stand til å ta opp mer vann ved gjeldende temperatur.
- *Entalpi* - De lilla diagonale linjene viser konstant energiinnhold, altså luftens varmeinnhold.
- *Lufttemperatur* - Den rosa loddrette aksene. Lufttemperatur er målt i  $^{\circ}\text{C}$
- *Vanninnhold* - Den lyseblå horisontale linjen representerer vanninnhold. Dette er målt i *g vann/kg luft*.

Diagrammet viser også sammenhengen mellom vanndamptrykk og luftens densitet, men det er ikke relevant. Mollierdiagrammet fra Figur 3.14 er tatt fra Dantherm Group [15].



Figur 3.14 – Mollierdiagram [15].

## Eksempler:

Figur 3.15 viser hvordan oppvarming, nedvarming og avkjøling føres på et Mollier-diagram. Linje A illustrerer oppvarming av luft. Linjen stiger vertikalt og parallelt med den loddrette akse for lufttemperatur. Det betyr at luftens vanninnhold er konstant.

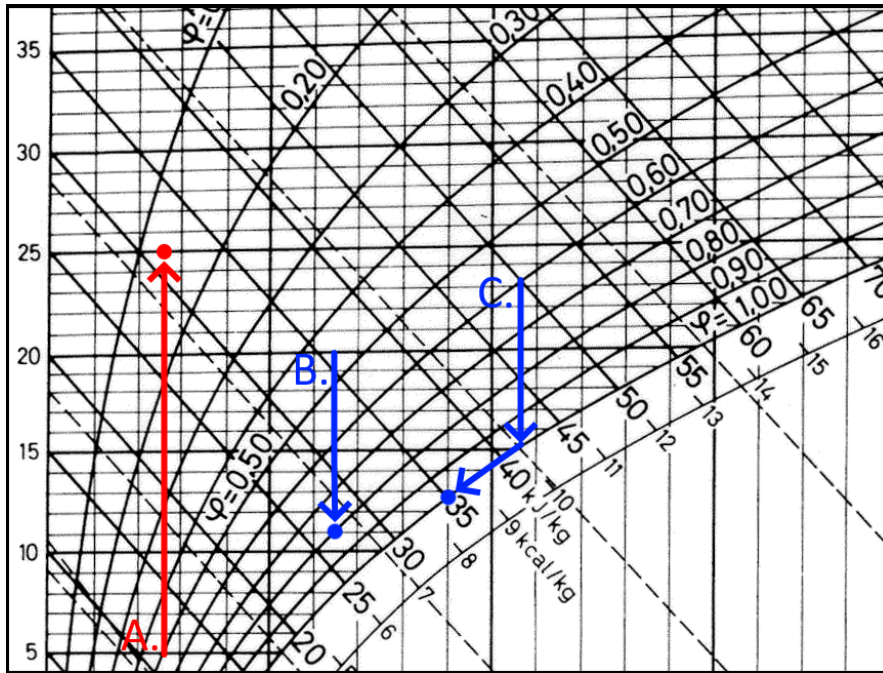
Den relative fuktigheten i luften går gjennom en stor endring under oppvarmingen. Luften går fra  $5^{\circ}\text{C}$  og 50 % RH til  $25^{\circ}\text{C}$  og omtrent 12-13 % RH.

Den tilførte energien som kreves for å endre temperaturen er differansen til energiinnholdet ved start- og slutt punktet. Linje A viser et vanninnhold på 0,0025 g vann/kg luft.

$$\begin{aligned}\text{Tilført energi} &= 31,2 - 11,1 \\ &= 20,1 \text{ kJ/kg} \\ &= 0,00558 \text{ kWh/kg}\end{aligned}$$

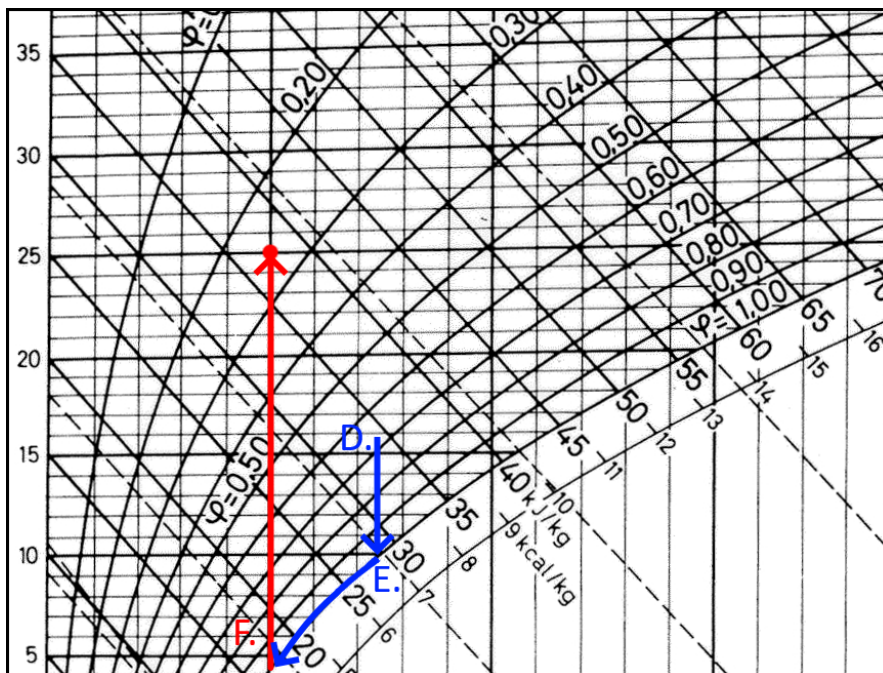
Linje B viser avkjøling, og følger det omvendte forløpet til linje A. Dette er kjent som tørr kjøling, og gjelder når overflatetemperaturen for kjøleflaten er høyere enn duggpunktstemperaturen. Presiserer at kjøling uten kondensering kun skjer ned til 90-95 % RH i praksis [4].

C viser avkjøling av tørrluft med kondensering. Når kurven nærmer seg metningslinjen vil luften som berører den kalde overflaten starte å kondensere. Når overflate-temperaturen er lavere enn duggpunktstemperaturen, kalles det for våt kjøling. Noe av luften kommer derimot ikke i kontakt med kjøleflaten og forblir i tørr kjølt tilstand. Temperaturen utjevnes og slutttilstanden er en blanding av de to luftmengdene. Luften vil få en relativ fuktighet på ca. 95-99 % RH [4].



Figur 3.15 – Temperaturendring mollierdigram.

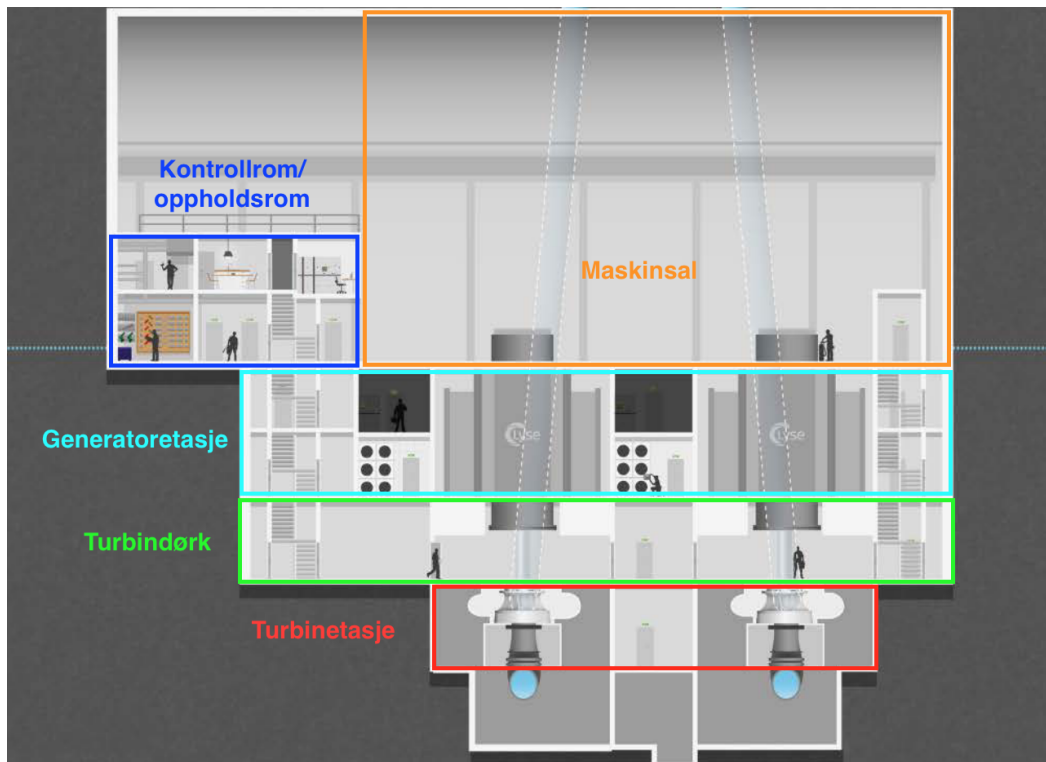
Figur 3.16 illustrerer avfukking med kjølemaskin. Ved avfukking er det fordelaktig med høy lufttemperatur og høy RH. Linje A og C kan kombineres for å få ønsket resultat. Først kjøles luften ned, og vann kondenseres. Hvis luften så varmes opp vil det gi tørr og varm luft.



Figur 3.16 – Avfukking med kondensavfukter.

## 4 Vannkraftverk

Det finnes to hovedprinsipper for hvordan et kraftverk kan bygges opp. Akslingens orientering avgjør hvilket prinsipp som benyttes. Står akslingen vertikalt vil vannkraftverket bygges i etasjer oppover. Turbin med vanntilførsel er plassert nederst, akslingen går så opp til generator, og øverst i maskinsalen sitter generatortopp med sleperinger og børster.



Figur 4.1 – Tverrsnitt av Lysebotn II, med vertikal turbinoppbygning [16].

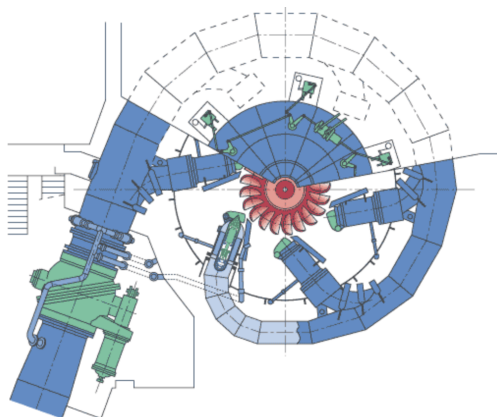
Dersom akslingen ligger vannrett vil vannkraftverket bygges opp annerledes. Akslingen vil gå horisontalt fra turbin til generator. Denne løsningen anvendes vanligvis i mindre kraftverk, ofte med pelton- eller kaplanturbin. Det finnes også løsninger for horisontal aksling til små kraftverk med francisturbin, men vertikal oppbygging benyttes der det praktisk lar seg gjøre.

## 4.1 Turbiner

Vannkraftverk benytter seg av forskjellige turbiner basert på vannvolum og fallhøyde. Leirfossene kraftverk har for eksempel francisturbin ettersom det er forholdsvis mye vann med lav fallhøyde. Dersom fallhøyden er stor er det derimot mer gunstig å bruke Peltonturbin. Dette forklares i de kommende kapitlene

### Peltonturbin

Dagens peltonturbiner har ofte seks dyser som skyter en konsentrert vannstråle på skovlene til turbinen. Figur 4.3 viser dette. Effektivisering har ført til at virkningsgraden idag ligger opp mot 92-93 % [17, s. 24-36].



Figur 4.2 – Illustrasjon av moderne peltonturbin [18].

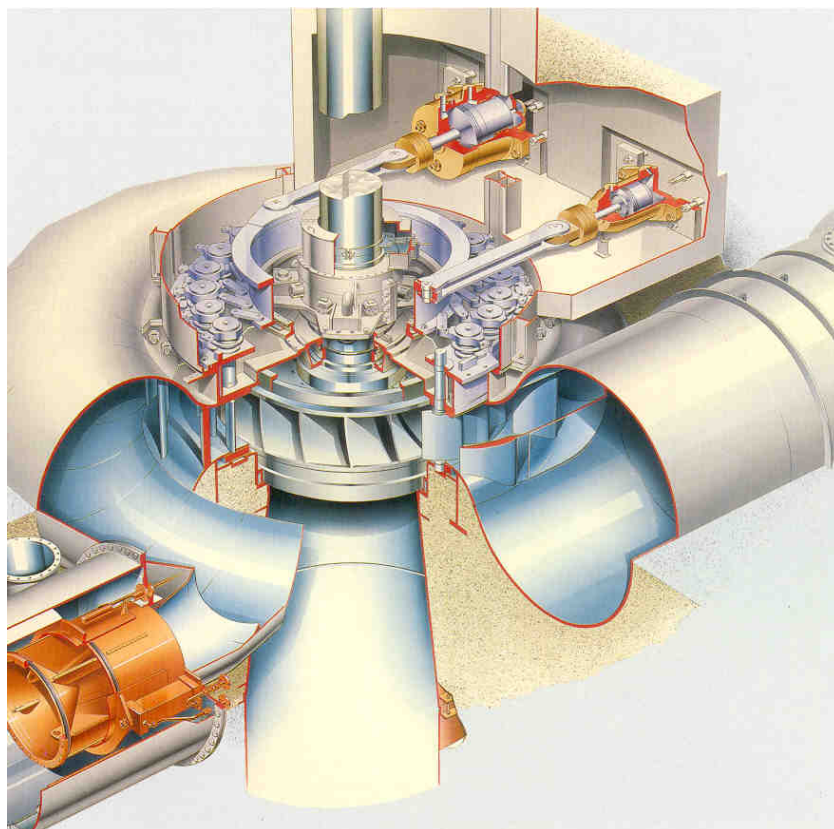


Figur 4.3 – Løpehjulet til en peltonturbin [19].



## Francisturbin

Den mest brukte turbinen i norske vannkraftverk er Francisturbinen. Dette er fordi den egner seg godt til bruk på mellomstore fallhøyder. I Norge blir det ofte installert francisturbiner på omtrent 200 til 600 meter. På disse fallhøydene kan også peltonturbiner benyttes [17, s. 55]. Figur 4.4 viser en francisturbin med utsnitt for å kunne se løpehjulet.



Figur 4.4 – Illustrasjon av francisturbin [20].

Karakteristisk for francisturbiner er spiraltrommen. Denne ligger før turbinen og fordeler vannstrømmen med jevn fart før den treffer turbinen. Figur 4.5 illustrerer en francinturbin med spiraltromme. Her er halvparten av dekslet på venstre side i senter fjernet for å vise ledeskovlene og deler av løpehjulet. Den hvite delen helt i senter er akslingen. Sugerøret er også avbildet, og er det krumme røret som peker vertikalt nedover.

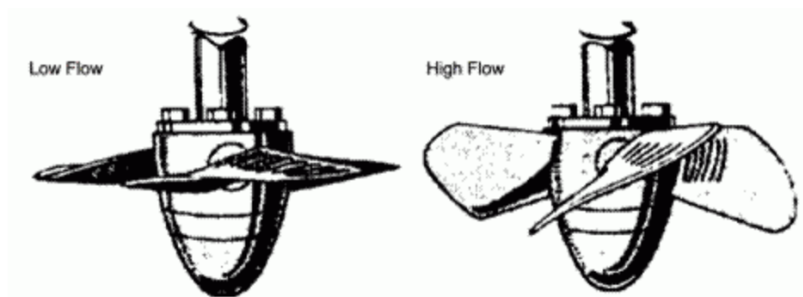


Figur 4.5 – Francisturbin med spiraltrømme [21].

Sugerøret er et slags avløpsrør som gjør at fallhøyden fra løpehjulet til undervannet utnyttes bedre. Francisturbinen har også ledeskovler som kan reguleres etter behov. Disse kan hjelpe med å justere både retning og hastighet på vannstrømmen. Denne turbintypen har høyest virkningsgrad (ved riktig fallhøyde og vannmengde) på 95-96 %.

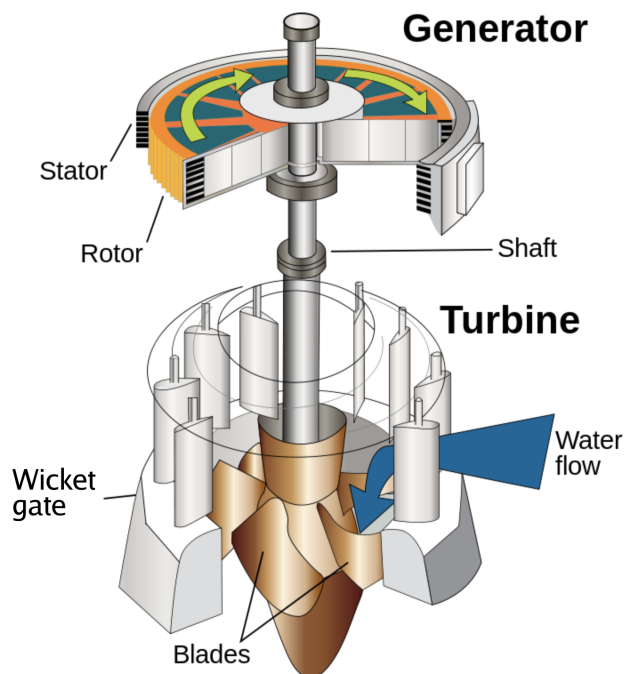
## Kaplanturbin

Kaplanturbinen er mer brukt på lave fallhøyder og stor vannføring. Løpehjulet til en kaplanturbin er formet som en propell der propellbladene er justerbare. Dette hjelper med å få virkningsgraden til turbinen opp mot 92-93 % selv ved varierende vannføring.



Figur 4.6 – Justerbare propellblader til Kaplanturbin. [22]

Figur 4.7 viser et utsnitt av en kaplanturbin tilkoblet generator med stator og rotor. “Wicket gate” er ledeskivene, eller propellbladene, til kaplanturbinen.



Figur 4.7 – Illustrasjon av kaplanturbin med generator [23].

## 4.2 Generator

Det brukes to typer generator i vannkraftverk;

- Asynkrongenerator
- Synkrongenerator

Asynkrongeneratoren brukes ofte i de mindre anleggene på rundt 1 MW. Siden det i realiteten er en motor, er den avhengig av magnetiseringsstrømmen fra nettet. Denne strømmen er 6-9 ganger høyere enn den nominelle fullaststrømmen til asynkrongeneratoren.

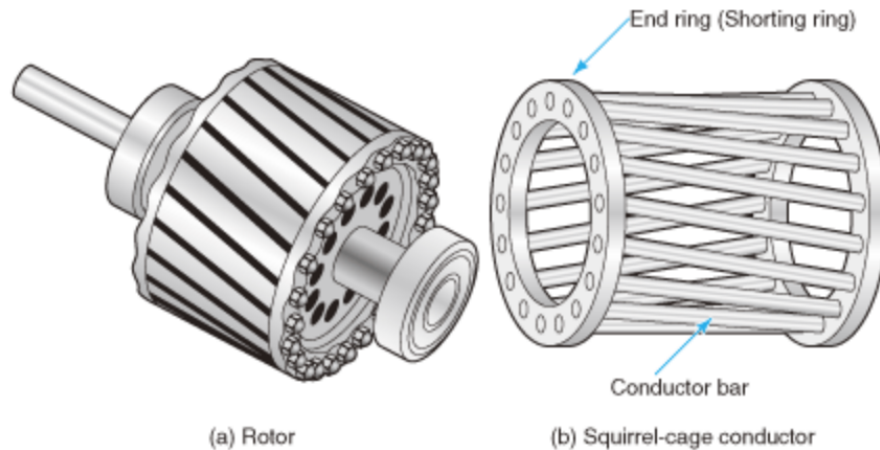
Synkrongenerator benyttes i de større kraftverkene der kostnadene til magnetiseringsutstyr, synkroniseringsutstyr og utstyr til spenningsregulering utgjør en mindre andel av kraftverkskostnaden [24, s.72].

### 4.2.1 Asynkrongenerator

Asynkrongeneratoren er bygget opp på liknende måte som synkrongeneratoren. Det finnes to forskjellige typer. Den vanligste er “squirrel cage” eller “kortslutningsmotor” på norsk. Den andre kalles “wound rotor”.

Viklingene i rotoren er kortslettet og ikke tilkoblet forsyning. Stator er forsynt av en vekselspanning som setter opp et roterende magnetfelt. Feltet dreier i maskinens synkron hastighet, gitt av frekvens og antall poler. Det roterende magnetfeltet induserer en strøm i den kortsluttede rotoren. Denne strømmen fører også til at rotor setter opp et magnetfelt og disse to feltene vil skape et dreiemoment som får rotor til å dreie.

Rotor vil aldri nå synkronturtallet til maskinen da dreiemomentet går mot null jo nærmere synkronturtallet rotoren ligger. Dette fenomenet kalles sakking. For at motoren skal kjøres i generatordrift må rotors hastighet være raskere enn synkrontall, dette gir en negativ sakking. Da vil motoren levere effekt inn på nettet i stedet for å trekke effekt som i motordrift.



Figur 4.8 – Oppbygning av en kortslutningsmotor (squirrel cage) [25].

Asynkrongenerator er egnet til mindre og isolerte nett. I og med at rotor ikke er magnetisert av egen krets kan ikke generatoren reguleres. Det er det tilkoblede nettet som regulerer motoren.

#### 4.2.2 Synkrongenerator

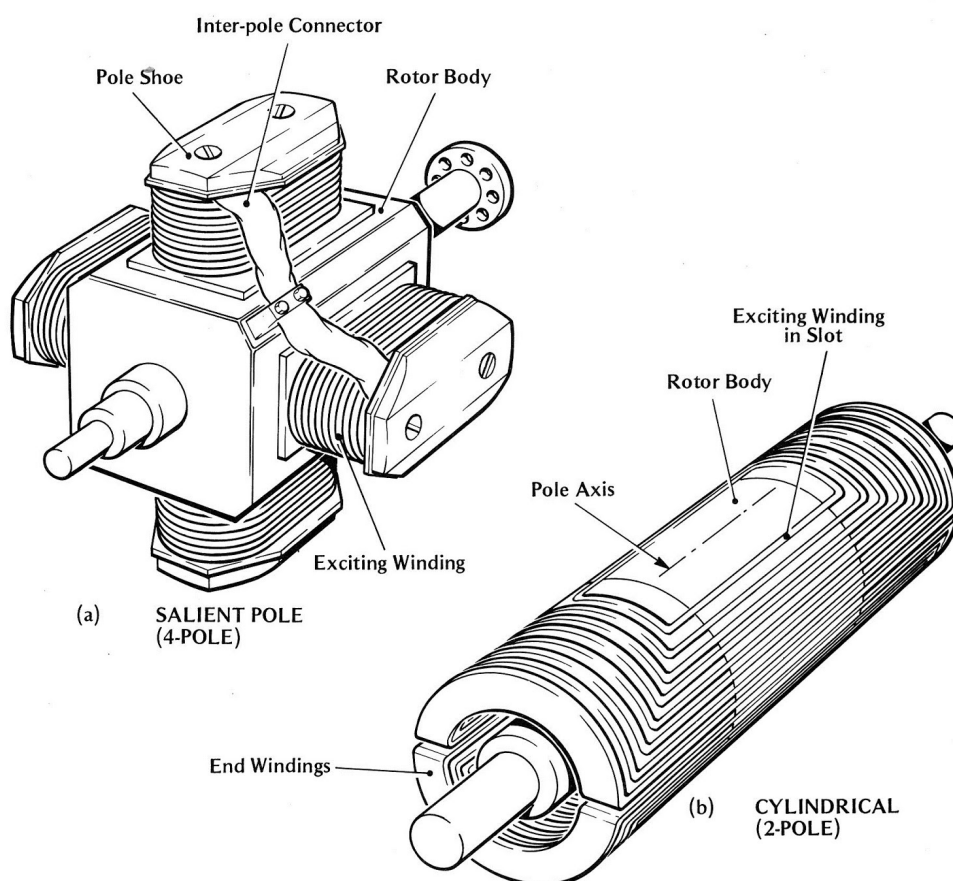
Dette er en elektrisk maskin som går synkront med nettet. Den kan både levere og forbruke den reaktive effekten som forbrukere står for. Dette gjør maskinen svært gunstig for en leverandør som ønsker å ha større kontroll på den reaktive effekten  $Q$  og dermed redusere tapene i nettet. En annen fordel med generatoren er hvordan den aktive effekten  $P$  i maskinen kan reguleres ved å endre vannmengden som treffer turbinen. Dermed kan den enkelt reguleres etter effektbehovet fra nettet. Synkrongenerator består av to hovedkomponenter; *stator* og *rotor*. Her omdannes den mekaniske energien fra turbinakselen til elektrisk energi.

#### Stator

Stator er den stasjonære delen av maskinen og består av en 3-faset feltvikling, statorviklingen. Viklingen setter opp et magnetfelt som virker på rotoren. Stator konverterer det roterende magnetiske feltet i rotoren til elektrisk energi, som videre overføres til en transformator.

## Rotor

Rotoren i maskinen er koblet til vannturbinens aksling. På rotoren finnes det en magnetiseringsvikling som inducerer strøm i generatorens statorvikling. Viklingen i rotoren tilføres likestrøm via en likeretter som er koblet til sleperingene på rotorakselen. Ved å forandre pådraget i denne magnetiseringsstrømmen kan den reaktive effekten reguleres.



Figur 4.9 – Rotor med utpregede poler (Salient pole) og sylindrisk utformet rotor med fordelte viklinger (Cylindrical) [26].

Rotor med utpregede poler er den mest brukte rotortypen i vannkraftverk. Her er det som oftest seks eller flere poler som har omdreiningshastighet på under 1500 *rpm*. Ved høyere hastigheter blir sylindrisk rotor benyttet. Antallet poler avgjøres

av rotasjonshastigheten til turbinen og ønsket frekvens generatoren operer i mot nettet [27, s. 353 - s. 387]:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (4.1)$$

$n_s$  = Omdreinings hastigheten til stator og rotor [*RPM*]

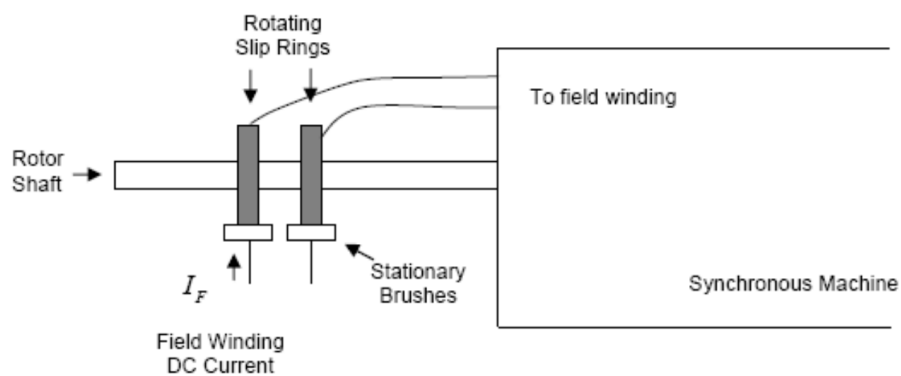
$f$  = Frekvensen til strømmen/ nettet [*Hz*]

$p$  = Antall poler i stator

## Magnetisering

Viklingene i rotor må magnetiseres ved hjelp av magnetiseringsutstyr. De mest utbredte typene for magnetisering i dag er; *Statisk, roterende og børsteløst*.

I konsesjonen som Statnett har ansvar for sies det; “Generator  $\geq 25$  MVA med nyere magnetiseringssystem skal ha statisk magnetisering” [28]. Det er ikke utenkelig at det kan bli forandring i denne type magnetisering etterhvert som teknologien med børsteløs magnetisering blir testet ut. Per dags dato er slitasje og spredning av kullstøv de viktigste faktorene å ta hensyn til.

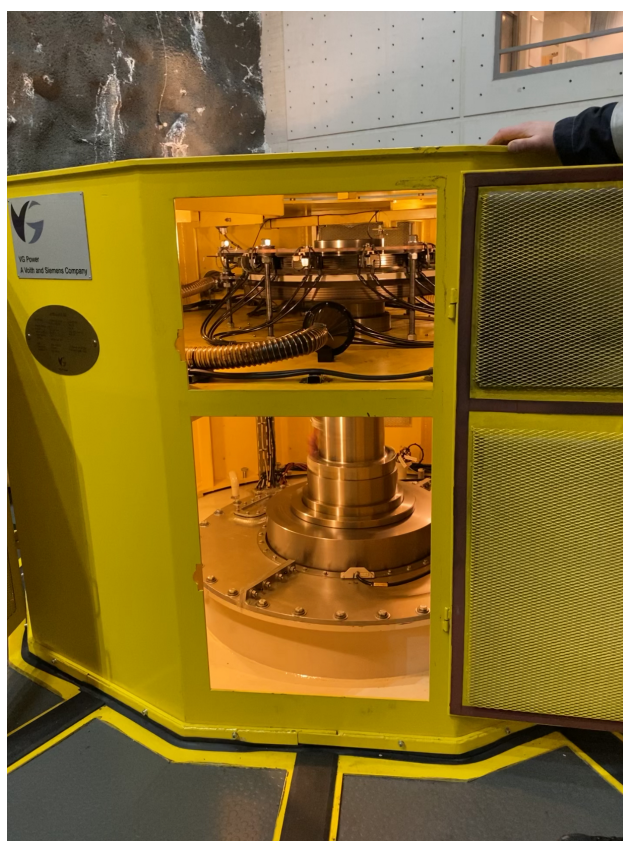


Figur 4.10 – Sleperinger og børster som sørger for likestrøm til rotoren [29].

### 4.2.3 Børsteavsug

Børsteavsug er installert på toppen av generatorkronen. Hovedformålet er å fjerne kullstøvet etterhvert som børstene på toppen av sleperingen blir slitt. I kombinasjon med oljestøv kan børstestøv blandes til en seig masse som kan forårsake jordfeil og børstebrann. Dette kan unngås ved bruk av egnede støvsugere. Disse er montert rett ved slepringer og suger inn mesteparten av støvet. På Figur 4.11 vises røret til støvsugeren mot toppen av bildet. De fleste kraftverk har dette problemet under kontroll.

Støvet festes i avsugget, som fører til dannelse av en seig masse. Oljestøv oppstår dersom lager er slitte ikke er tette nok. I noen kraftverk er det derfor også montert avsug for oljestøv på lager for å få bukt med dette problemet. [30]. Dersom lager blir tilstrekkelig vedlikeholdt kan problematikken unngås.



Figur 4.11 – Toppen av generatoren i maskinsalen på Leirfossene kraftverk, med magnetiseringsutstyr og børsteavsug.



## Standard for roterende maskiner

NEK IEC 60034 inneholder spesifikasjonskrav og generell informasjon angående kravene til roterende maskiner. Tabell 4.1 og Tabell 4.2 viser utdrag fra denne standarden;

Thermal class rating	Thermal class °C
105 (A)	105
120 (E)	120
130 (B)	130
155 (F)	155
180 (H)	180
200 (N)	200

Tabell 4.1 – Termiske klasser for roterende maskiner. 105, 120 og 200 blir skjeldent brukt i moderne systemer [31].

Anticipated thermal class	105		120		130		155		180		200		Days per ageing sub-cycle
	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	
Suggested range for ageing temperature ( $\bar{T}_A$ ) °C	170	180	185	195	195	205	220	230	245	255	265	275	1 – 2
	160	170	175	185	185	195	210	220	235	245	255	265	2 – 3
	150	160	165	175	175	185	200	210	225	235	245	255	4 – 6
	140	150	155	165	165	175	190	200	215	225	235	245	7 – 10
	130	140	145	155	155	165	180	190	205	215	225	235	14 – 21
	120	130	135	145	145	155	170	180	195	205	215	225	28 – 35
	110	120	125	135	135	145	160	170	185	195	205	215	45 – 60

Tabell 4.2 – Anbefalte temperaturer og eksponeringssyklus til isolasjonsmaterialet i roterende maskiner [32].

#### 4.2.4 Krav til omgivelser

Ventilasjonen spiller en viktig rolle når det kommer til kravene en generator stiller til miljø;

- I henholdt til IEC-standard skal ikke temperaturen være mindre enn  $0^{\circ}\text{C}$  og ikke overstige  $40^{\circ}\text{C}$ , men temperatur bør holdes innenfor med god margin og helst så stabilt som mulig, både under sommer- og vinterdrift.
- Luften skal være fri for støv, oljedamp og andre uønskede partikler. Hvis generatoren er luftkjølt vil forurenset luft ha større innvirkning på generatorens kjøling og redusere isolasjonsmotstanden.
- Flere anlegg har generatorer som ikke er i drift til enhver tid. Dette fører til uønsket fuktighet som kan bli absorbert isolasjonsmaterialet og degradere dette. Det er derfor viktig å sørge for at luftfuktigheten i generatoravlukket er lav.
- Relevant IEC-standard for generator er: *IEC 60034 Rotating electrical machines*

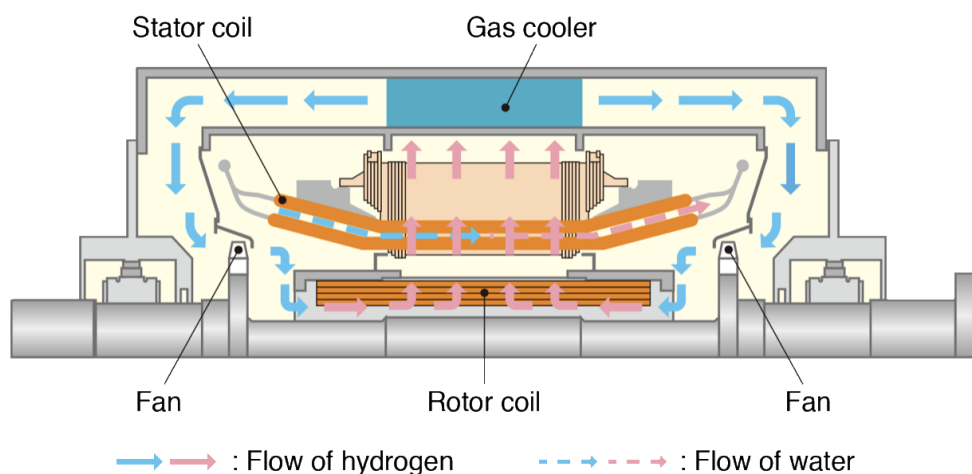
#### 4.2.5 Kjøling av generator

Avhengig av størrelse kjøles generatorer ved hjelp av ulike løsninger med luft, vann og hydrogen varmevekslere. I små generatorer med ytelse på under  $50\text{ MW}$  kan luftkjøling være nok til å holde generatoren innfor maksimal temperaturstigning. I større generatorer mellom med ytelse på  $50\text{-}300\text{ MW}$  brukes hydrogen til å kjøle. For de største generatorene på opp mot  $1000\text{ MW}$  brukes hule ledere med gjennomstrømning av kjølevann [27]. Det mest avgjørende for levetiden er temperatur på viklinger og isolasjonsmateriale. I følge Arrhenius lov om aldring av isolasjon kan en reduksjon i temperatur føre til betydelig forlenget levetid. En reduksjon på  $10^{\circ}\text{C}$  kan føre til dobling av levetid for materialet [33].

Generatorens kjølesystem er vanligvis et lukket system. Luft sirkulerer gjennom generatoren og gjennom radiatorer som kjøler ned luften igjen. Det vil si at samme luften blir brukt om igjen. Grunnen er at generatoren er svært ømfintlig for partikler i luften. Støv og lignende vil kunne tette igjen kjølekanalene i både stator og rotor. Det finnes tre forskjellige måter å sirkulere luften på i en synkrongenerator:

- Radial ventilasjon
- Aksial ventilasjon
- “Sirkulær” ventilasjon

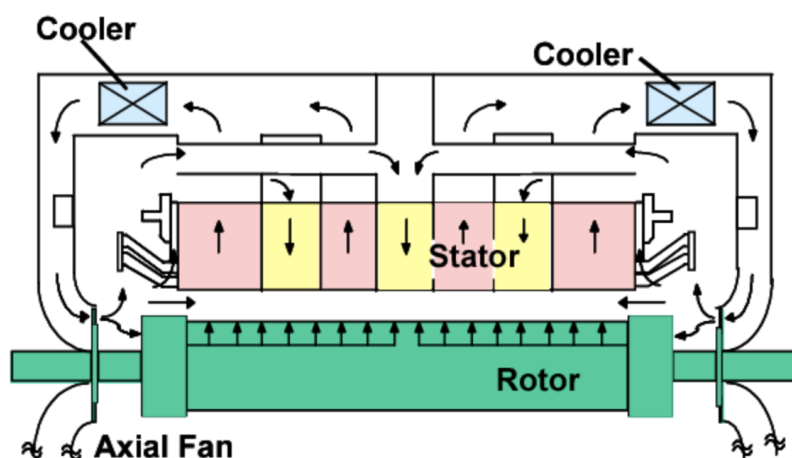
Ved radial ventilasjon sitter det gjerne vifteblader på rotor som blåser luft radiaalt gjennom stator. Luften passerer i kanaler gjennom stator før den går gjennom en varmeveksler med vann som kjøler den ned igjen. Luften fortsetter så i den lukkede kretsen og blir igjen blåst gjennom stator som vist i Figur 4.12. Dette prinsippet kan brukes både i små og større generatorer. Nedsiden med denne metoden er at hele maskinen blir større og mindre kompakt på grunn av kjølekanalene. De opptar ca. 20 % av den totale armaturlengden [34].



Figur 4.12 – Kjølestruktur for vann/radialkjølt generator [35].

Et annet prinsipp er å føre kjøleluften aksialt gjennom maskinen. Kjølekanalene går derfor i aksialretningen som vist i Figur 4.13. Denne metoden er svært effektiv, med mindre maskinen er spesielt lang i aksialretning. I slike tilfeller vil luften rekke å varme seg opp gjennom kjølekanalen slik at delen av maskinen nærmest enden

ikke vil få tilstrekkelig kjøling. Dermed vil ikke viklingene bli avkjølt like mye over hele utstrekningen [34].



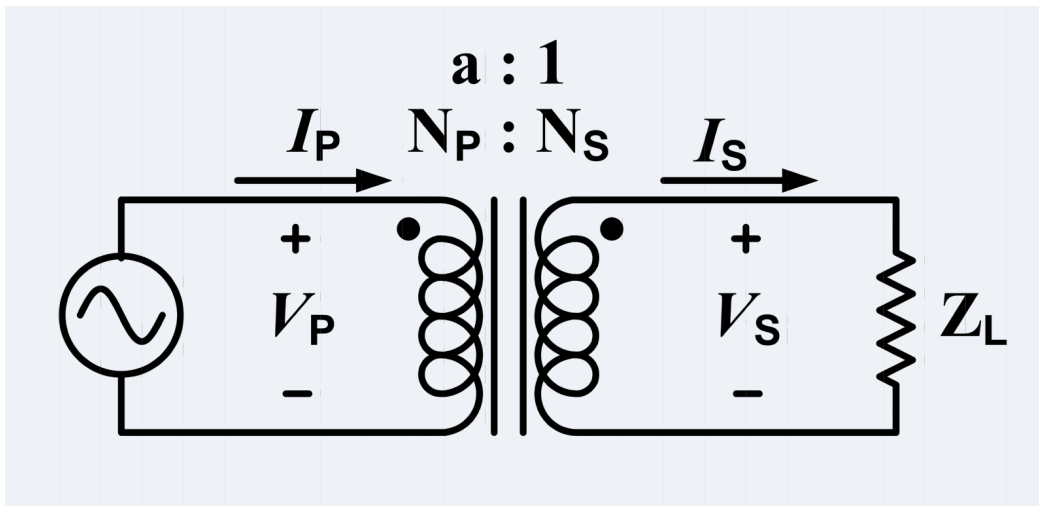
Figur 4.13 – Kjølestruktur for aksial kjølt generator [36].

En maskin kan også ventileres ved å bruke ett eller flere punkter med kjølelufttilførsel på utsiden av stator. Kjøleluften føres så sirkulært gjennom statorens kanaler mellom lamineringene. Dette kombineres gjerne med aksial ventilasjon dersom det er mulig å holde de to luftstrømmingene adskilt. [34]

### 4.3 Transformator

Et vannkraftverk har ofte to typer transformatorer. En hovedtransformator og én stasjonstransformator. Stasjonstransformatoren er plassert inne i stasjonen og er en del av hjelpeanlegget til kraftverket. De skal forsyne pumpemotorer, viftemotorer, batteriladere og eventuelt annet hjelpeutstyr med hjelpestrøm. Hovedtransformatoren er koblet mot nettet.

Transformatoren gjør det mulig å transportere energi over store avstander. Den er viktig i et vannkraftverk for å transformere spenningen opp slik at energien kan distribueres over store avstander på nettet. Dersom energien skulle vært overført på maskinspenning ville det ført til betydelig større tap. Det er illustrert i Figur 4.14 der  $V_p$  representerer maskinspenning og  $V_s$  nettspenningen.



Figur 4.14 – Ideell transformator koblet til en kilde  $V_P$  på primærsiden og en last  $Z_L$  på sekundærsiden, der  $\infty > Z_L > 0$  [37].

For vannkraftverk i fjellanlegg kan det utføres på to forskjellige måter. Transformatoren kan enten være plassert inne i fjellet eller på utsiden. En transformator installert på utsiden av fjellanlegget vil være tryggere med tanke på eksplosjons- og brannfaren en transformator kan utgjøre. Den har også bedre forutsetninger for naturlig ventilasjon fra uteluften. Nedsiden med å plassere transformatoren ute er at den vil bidra med betydelige overføringstap relativt til hvor langt inne i fjellet kraftverket ligger. Lengde og tverrsnitt på leder og strømstyrke vil avgjøre hvor mye tap avgitt i varme som vil oppstå.

Transformator plassert inne i stasjonen gjør at leder vil være kortere og tapene derfor lavere. utfordringer kan være at transformatoren står i ugunstige omgivelser. Trange avlukker med dårlig luftsirkulasjon egner seg ikke. Oljekjølte transformatorer bidrar med en betydelig eksplosjonsfare. Derfor krever transformator inne i fjellet ekstra forhåndsregler med tanke på sikring i forbindelse med brann.

Tapene i en transformator er representert ved  $I^2R$  tap i vindinger, hysteres og virvelstrømstap i kjernen og jerntap [27].  $I^2R$  tap, også kalt ohmske tap oppstår som følge av strømføringen i transformatorens viklinger. Dersom strømmen blir for høy her kan det oppstå en såkalt skinneffekt som fører til at strømmen ledes i ytterkanten av lederen. Dette fører til enda større tap. Hysteres og virvelstrømstap kalles gjerne jerntap. Når magnetfeltet snur vil det oppstå hysteres som fører til at energi går tapt i form av varme. Jerntapets varmeavgivelse avhenger av fluksens maksverdi, som igjen er avhengig av spenningen. Varmetap i transformatoren er

derfor avhengig av at spenning og strøm holder seg innenfor de nominelle verdiene. Store transformatorer er gjerne veldig effektive, gjerne opp mot 99,5 % [27].

Transformatorens totale varmetap gis av merkeeffekten. Dette oppgis alltid i Volt-Ampere og ikke Watt. Den nominelle effekten er produktet av strøm og spenning, men siden disse ikke har samme fasevinkel i en transformator oppgis ytelse i tilsynelatende effekt [VA]. Transformatoren vil avgi like mye varme uavhengig av om lasten er reint reaktiv eller reint resistiv.

#### **4.3.1 Kjøling av transformator**

Det skal skilles mellom tørrisolerte og oljefylte transformatorer. Det skal nevnes at dersom transformatoren er kjølt ved hjelp av “forced oil” (AO/FA/FOA) vil ikke kjøleluft påvirke temperaturen inne i trafoen. Her blir varmen fra oljen vekslet over til vann i kraftstasjonens hovedkjøleanlegg 4.4. Det vil derfor være unødvendig å prosjektere med kjøleluft til slike transformatorer. Dersom høy temperatur på transformatorens omgivelser tillates trengs ikke egne sjokkspjeld på grunn av liten mengde kjøleluft [38].

Mindre innendørs transformatorer er stort sett tørrisolerte og det er disse som bør tas hensynt til. I det tilfellet er tilstrekkelig kjøleluft viktig for å holde temperaturen nede.

For transformatorer med mineralolje må området eller avlukket transformatoren er plassert i være utstyrt med brannspjeld som lukkes automatisk ved brann. Dersom det ikke monteres automatiske brannspjeld her, skal det forsikres om at ventilasjonskanaler fra dette området er anlagt slik at det ikke påvirker øvrige deler av stasjonen. Dette skal redusere faren for videre brannspredning gjennom ventilasjonskanaler [39]. Dette er i henhold til prinsippet om at luft med dårligere kvalitet ikke skal blandes med luft som brukes til å ventilere områder med høyere krav til luftkvalitet.

I følge *IEC 60076-1* skal følgende omgivelsestemperaturer for transformatorer ikke overstiges:

- Årlig gjennomsnitt: 20°C
- Månedlig gjennomsnitt for varmeste måned: 30°C
- Skal aldri overstige: 40°C

Isolasjonsmaterialet i transformatoren vil degraderes betydelig ved for høy gjennomsnittstemperatur. Basert på transformatorens plassering og ytelse vil det være forskjellige anbefalinger for hvordan de bør kjøles. I boken *Electrical Machines, Drives and Power Systems* [27] er det beskrevet på følgende måte.

### Luftkjølte transformatorer

Små transformatorer på under 200 kVA installert innendørs kan ofte ventileres kun gjennom naturlig ventilasjon. Konveksjonen fører luften opp langs kjøleribber i transformatoren som gjør at vindinger og kjerne får nødvendig kjøleluft. For transformatorer med høyere ytelse kan også samme prinsipp benyttes, men da kreves fortrenningsventilasjon for å klare å transportere all varme bort. Det vil si at området må tilføres luft ved hjelp av mekanisk ventilasjon for å oppnå tilstrekkelig kjøling. Slike transformatorer kalles *tørrisolerte transformatorer*. Figur 4.15 viser en typisk tørrisolert stasjonstransformator som ofte står inne i kraftverket.



Figur 4.15 – Tørrisolert transformator [40].

## Oljekjølte transformatorer

Mindre transformatorer kan også kjøles ved hjelp av olje. En metode for oljekjøling er å senke hele transformatoren ned i olje. Inne i oljetanken vil den naturlige konveksjonen i vindinger og kjerne skape en sirkulasjon av oljen der den stiger opp langs transformatoren og ned igjen langs tankens utside. Varmen blir så avgitt til omgivelsene gjennom tanken. Dette er en bedre måte å kjøle på da olje er et mer effektivt medium å overføre varme med. For ytelser større enn 200 kVA kan det være aktuelt å bruke en kombinasjon med olje og radiator på utsiden. Radiatoren avgir varmen til omgivelsene som igjen kan bli ventilert ved hjelp av luft.

For de aller største transformatorene som gjerne ligger i *MVA* segmentet er det mest effektive å bruke en olje/vann varmeveksler. Oljen avgir varmen til et kjølevannssystem som pumper kjølig vann til varmeveksleren. Dette er også en dyr løsning, men vil likevel være økonomisk da den vil føre til høyere virkningsgrad og derav lave tap.

Transformatorer kan leveres med oppgitte merkeytelser basert på hvilken kjøleløsning som skal brukes. Tre forskjellige merkeytelser kan for eksempel oppgis avhengig av om transformatoren er kjølt ved naturlig ventilasjon, fortrenningsventilasjon eller er oljeisolert kombinert med fortrenningsventilasjon.

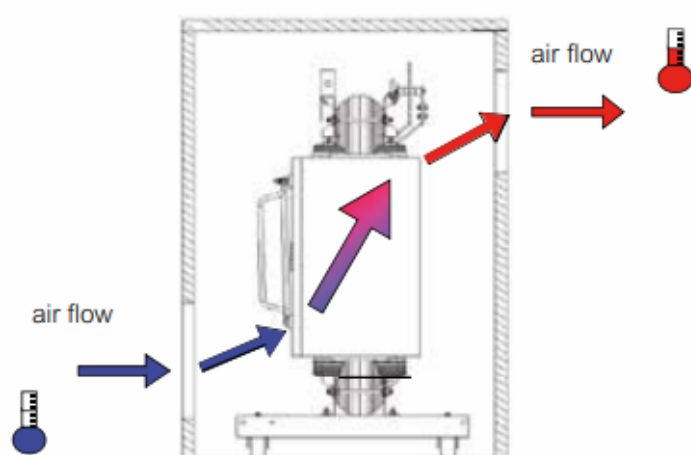
Følgende bokstavsystem er benyttet for å beskrive kjølemetoden til transformatoren [27]:

- AA - Tørrisolert med naturlig ventilasjon
- AFA - Tørrisolert med fortrenningsventilasjon
- OA - Oljefylt
- OA/FA - Oljefylt med naturlig/fortrenningsventilasjon
- AO/FA/FOA - Oljefylt med naturlig/fortrenningsventilasjon og olje-vann varmeveksler



### 4.3.2 Ventilasjon av tørrisolert transformator

Et viktig prinsipp for luftkjøling av transformatorer er at kjøleluften blåses inn lavt i rommet og har avtrekk høyere opp. På den måten oppnås det en naturlig luftstrøm gjennom rommet. Dette er omtalt som fortrenningsventilasjon.



Figur 4.16 – Fortrenningsventilasjon for tørrisolert transformator [41].

I Legrand sin manual om tørrisolerte transformatorer [41] står det at for transformatorer som enten står i små rom med dårlig naturlig luftskift, har gjennomsnittlig omgivelsestemperatur høyere enn  $20^{\circ}\text{C}$  eller er utsatt for regelmessig overlast må ventileres med fortrenningsventilasjon som vist i Figur 4.16.

#### Dimensjonering

Parametere som må tas hensyn til ved dimensjonering av kjøleluft til transformator er det totale varmetapet, temperaturstigning på kjøleluften og avtrekksluft, luftmengde, areal av friskluftventil, areal av avtrekksventil og høydeforskjell mellom midt på transformator-kassen og avtrekksventil. For å beregne størrelse på ventiler og kjøleluft kan følgende formel benyttes:

$$S = \frac{10,752 \cdot TL}{\sqrt{H \cdot dT^3}} \quad (4.2)$$

$S$  = Nettoareal kjøleluftventil [ $m^2$ ]

$TL$  = Totalt tap i transformator [ $kW$ ]

$H$  = Høydedifferanse mellom transformatorens midtpunkt og avtrekksrist [ $m$ ]

$dT$  = Temperaturstigning på kjøleluft [ $^{\circ}C$ ]

$$Q = \frac{TL}{1,15 \cdot dT} \quad (4.3)$$

$Q$  = Kjøleluft [ $m^3/s$ ]

$TL$  = Totalt tap i transformator [ $kW$ ]

$dT$  = Temperaturdifferanse mellom friskluft og varmluft/avtrekk [ $^{\circ}C$ ]

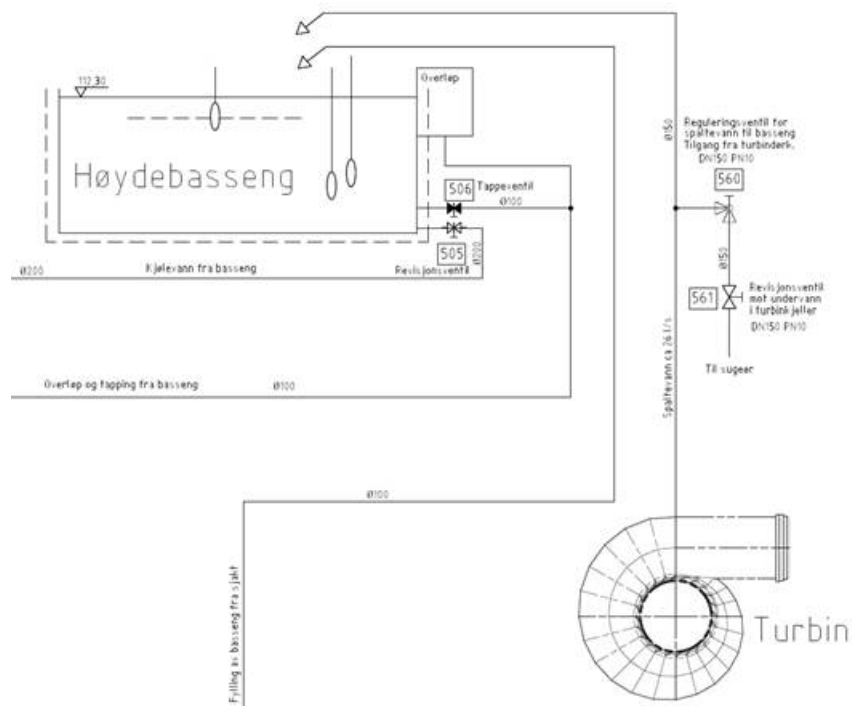
Formlene er gyldige for gjennomsnittlig omgivelsestemperatur på  $20^{\circ}C$  og 100 *moh*. For å dimensjonere avtrekksventilen må det tas hensyn til at luften varmes opp og derfor får større masse. Avtrekksventilen bør derfor dimensjoneres omtrent 15 % større enn kjøleluftventilen. Transformatorens plassering i rommet bør være minst 0,5 meter fra alle vegger og helst hevet fra gulvet for å oppnå best mulig kjøling fra bunnen. Legrand anbefaler at transformatorer ventileres med 3,5 til 4  $m^3/min$  per  $kW$  varme transformatoren avgir til omgivelsene.

## 4.4 Hovedkjølesystem

Kjølevannsystemets primære oppgave i et vannkraftverk er å absorbere og transportere avgitt varme fra kraftverkets maskiner og utstyr. Det gjelder komponenter som generatorlager, turbinlager, generator (stator/rotor), transformator, turbinregulator og ventilasjonsanlegg. Totalt kjølebehov avhenger av tapene i kraftstasjonens produksjonsutstyr. Avgitt varme transporteres bort via luftskift, driftsvann, varmeledning til omgivelsene og kjølevann. Kjølevannsystemets rolle avhenger av kraftverkets utforming og størrelse [42].

### 4.4.1 Arrangement

Om systemet skal være åpent eller lukket, avhenger av arrangementet til hovedkjølesystemet. I Norge har det vært mest vanlig med åpent system. Dette betyr at at kjølevann pumpes fra kraftverkets vannvei og inn til et kjølebasseng. Vannet drives deretter til den enkelte kjølekrets. Så blir avløpsvannet ført til kraftverkets undervannstunnel.

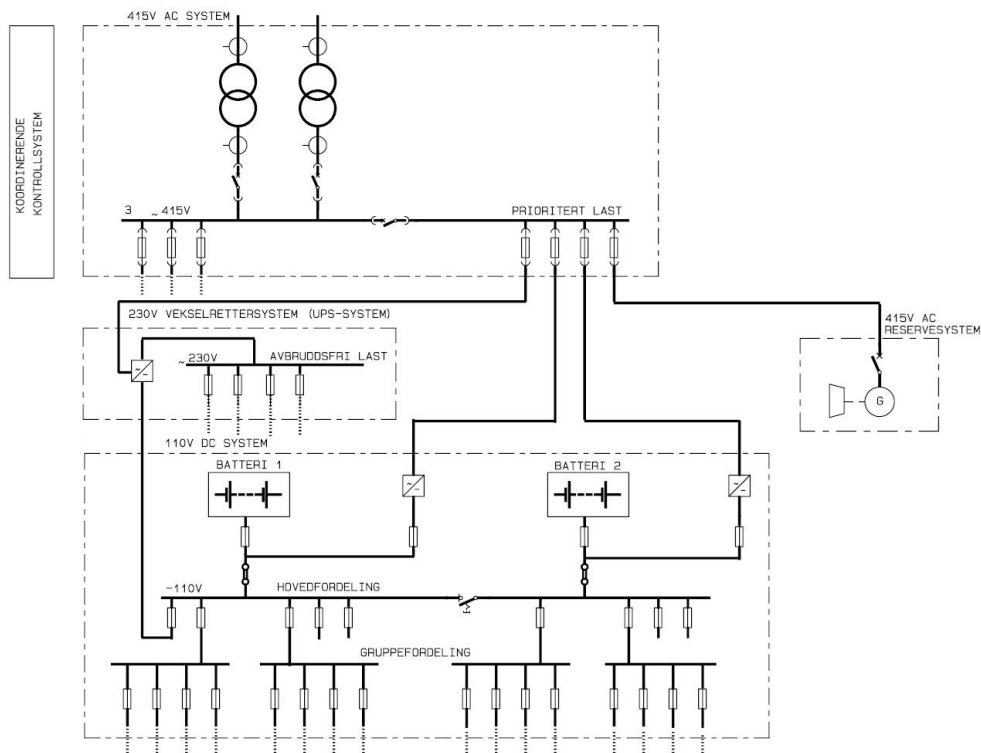


Figur 4.17 – Åpent kjølesystem [42].

De forskjellige kjølekretsene gis ofte prioritet i følgende rekkefølge:

1. Generator- og turbinlager.
2. Generator (stator/rotor) og eventuell turbinregulator. Moderne turbinregulator har ikke behov for kjølevann.
3. Ventilasjonssystem.

Kjølevannsanlegget skal ha et overvåkningssystem som begrenser skader ved svikt. Sirkulasjonsmeldere, endebrytere og tilstandsovervåkning for viktige pumper blir brukt til formålet.



Figur 4.18 – Prinsipptegning av hjelpeforsyning til kjølesystem [42].

Pumpene til kjøleanlegget i Figur 4.18 forsynes fra hovedfordeling som har spenning på 230 V AC (noen nyere systemer har 400 V TNS). Her er pumpene 3-fase kortslutningsmotor. Om det finnes noe i ventilasjonssystemet som “må” ha hjelpe-spenning – for eksempel SD-anlegg – kan dette forsynes fra 230 V avbruddsfri last [42].

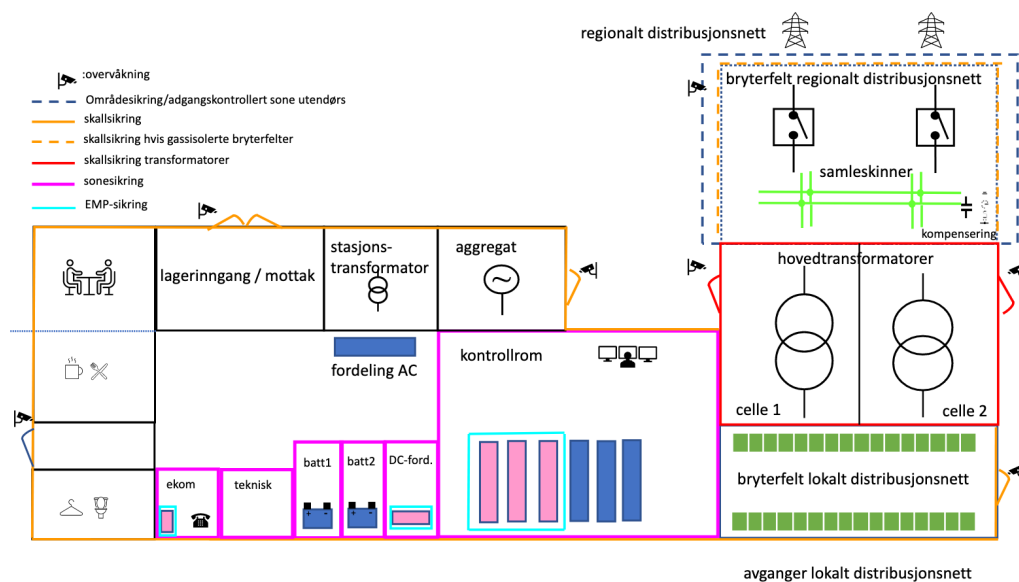
## 4.5 Hjelpeanlegg

Består av blant annet, høyspent- og lavspent stasjonsforsyning, stasjonstransformator, kabler, batterianlegg, dieselaggregat og brannvarslings og- slukkeanlegg. Hjelpeanlegget skal sørge for uavbrutt strømforsyning til kontrollanlegget og minimere konsekvensene av feil.

### Kraftberedskapsforskriften

For å sikre stabil og robust kraftforsyning er kraftstasjoner delt opp i 3 forskjellige sikkerhetsklasser, hvor det stilles strengere krav til ventilasjon for klasse 2 og 3.

Ventilasjonskravene er blant annet sikring av ventilasjonssjakter og åpninger. Den største klasseforskjellen ligger i at det er mye strengere krav til redundans, slik som dublering av utstyr som sikrer kontinuerlig leveranse til nettet. Typiske deler i hjelpeanlegget og innretning som finnes i et vannkraftverk illustreres i Figur 4.19.



Figur 4.19 – Prinsskisse for klasse 2 stasjonsanlegg [43].

### Beredskapsklasse 3

I kraftstasjoner som tilhører klasse 3, er ventilasjonsanlegg ansett som en kritisk komponent. Derfor skal batterier og nødaggregater kunne forsyne ventilasjonsanlegget ved strømbrudd i stasjonens hovedforsyning.

Ventilasjonsanlegget skal dimensjoneres med fokus på grunnventilasjon av komponentene. Isvannmaskiner står for kjøling av mye av lokalvarmen i stasjonen.

Isvannmaskiner er koblet på hovedkjølssystemet til kraftverket. Kjøleanlegget blir dyrere å installere, men til gjengjeld vil det redusere omfanget av ventilasjonsanlegget [38].

## 5 Teori

Grunnlegende fysiske lover sier at energimengden er konstant. Energien kan verken skapes eller forsvinne, bare overføres fra én form til en annen. I et vannkraftverk skjer akkurat dette. Den potensielle energien i vannet omdannes til mekanisk energi i turbinen og videre til elektrisk energi ved hjelp av generatoren. Når energien går fra én form til en annen, er produktet alltid mindre enn faktorene på grunn av tap i systemet. Tapene frigis i form av varme.

### 5.1 Effekttap

Elektrisk effekt er et mål på mottatt eller avgitt elektrisk energi per tidsenhet. [44, s. 181-288] Effekten [ $W$ ] blir målt i joule per sekund [ $J/s$ ]. Energitalp i vannkraftverk kan deles inn i to hovedkategorier;

- Elektriske tap
- Mekaniske tap

#### Typiske tap

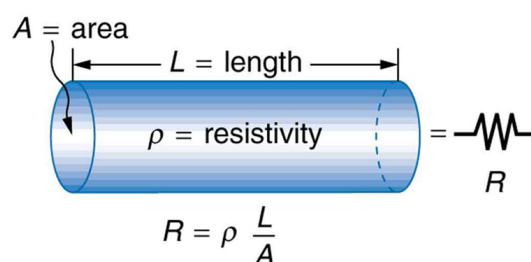
Typiske komponenter som finnes i et vannkraftverk og deres tap er gitt i Tabell 5.1. Dataen er fra 1994 og kan være noe utdatert.

APPARATUS	CAPACITY LOSSES (kW)
Generator, radiated/convected to surroundings	7
Transformer, radiated/convected to surroundings	12
Two auxiliary transformers, each 500 kVA, one in normal load and one in no load	5.5
Converter, 5 kVA. normal load	1
Rectifiers, standby charging, 0.5 kW/each	1.5
Excitation transformer	10
Voltage regulator, naturally cooled	10
Reactor coil, Short circuit limitation, 3-phase	3
Generator busbars, 120 W/m 3-phase	2-3
Governor	4
Drainage pumps, 5% losses	1
Cooling water pumps, 5% losses	0.5
Auxiliary AC distribution	1
Auxiliary DC distribution	4
Relay cubicles control room, 0.4 kW/cubicle	4
Batteries 0.2 kW/each	0.5
Communication equipment	2
Light control building	4
Light generator cellar	5
Light machine hall	25
Light turbine cellar	5
Miscellaneous	2
300 kV oil cables	15
22 kV XLPE cable	28
Light access tunnel	10
Miscellaneous	4
<b>TOTAL HEAT LOSSES FOR THIS EXAMPLE</b>	<b>168</b>

Tabell 5.1 – Eksempel på typiske effekttap på et vannkraftverk i fjell med en generatorytelse på 130 MVA [45].

## 5.2 Nettap

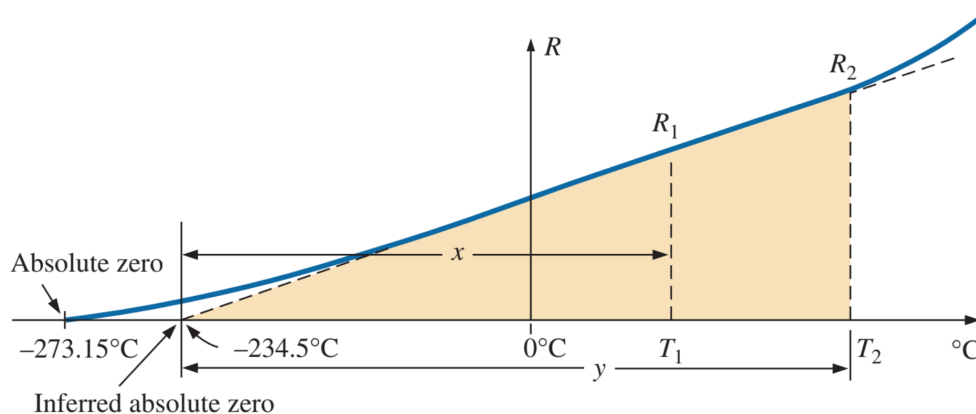
Tap som oppstår ved overføring av elektrisk energi kalles nettap, også kjent som kobbertap. Avgitt effekt i en leder kan finnes ved formelen  $W = I^2R$ . Avgitt energi avhenger av til strømmen i kvadrat og resistansen i lederen. Resistansen er igjen avhengig av resistiviteten og lengden til lederen. Ledere fra generator til transformator vil for eksempel stå for et stort varmebidrag, og enda større om transformatoren står utenfor stasjonen. Ved høy temperatur blir materialets evne til å lede redusert, og tapene blir enda større. Tap i kabel er gitt i Figur 5.1, om resistansen til kabelen ikke er oppgitt:



Figur 5.1 – Resistans i leder [46].

## 5.3 Leder

Omgivelsestemperatur har innvirkning på resistansen til en leder. Med økt varme vil resistansen øke lineært (se Figur 5.2), dette gjelder for de fleste metalliske ledere.



Figur 5.2 – Temperatureffekten på kobber [47, s. 88].



Om resistansen er gitt, kan også resistansen ved ønsket temperatur finnes ved hjelp av Formel 5.1:

$$\frac{|T_i| + T_1}{R_1} + \frac{|T_i| + T_2}{R_2} \quad (5.1)$$

$T_i$  = Absolutt nullpunkt for materialet (kobber) [ $-234.5^\circ C$ ]

$T_1$  = Angitt temperatur [ $^\circ C$ ]

$R_1$  = Angitt resistans ved  $T_1$  [ $\Omega$ ]

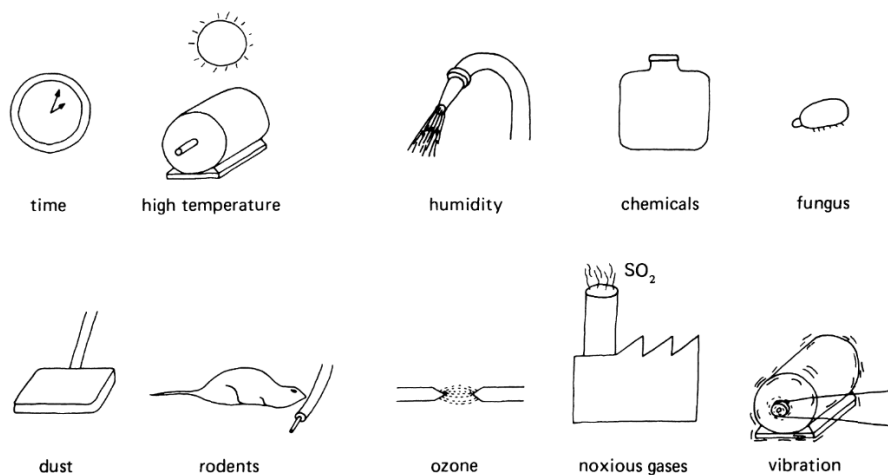
$T_2$  = Ønsket temperatur [ $^\circ C$ ]

$R_2$  = Resistansen ved  $T_2$  [ $\Omega$ ]

Ledere står for en stor andel av varmeutviklingen i et kraftverk. Spesielt avgir en leder mye tapsvarme før spenningen er transformert opp i overføring mellom generator og transformator. I et kraftverk med 130 MVA installert kan en 22 kV XLPE kabel ha et tap på så mye som 28 kW.

### 5.3.1 Isolasjonsmateriale

Ytre forhold har også innvirkning på elektrisk isolasjon. Derfor er det viktig å velge isolasjon som tåler fuktpåkjenninger og større temperatursvingninger. Figur 5.3 illustrerer faktorer som påvirker levetiden til isolasjonsmaterialer.



Figur 5.3 – Faktorer som har innvirkning på levetiden til komponentene [27, s. 128].

### 5.3.2 Isolasjonsklasser

**TABLE B** CLASSES OF INSULATION SYSTEMS

Class	Illustrative examples and definitions
105°C A	Materials or combinations of materials such as cotton, silk, and paper when suitably impregnated or coated or when immersed in a dielectric liquid such as oil. Other materials or combinations of materials may be included in this class if by experience or accepted tests they can be shown to have comparable thermal life at 105°C.
130°C B	Materials or combinations of materials such as mica, glass fiber, asbestos, etc., with suitable bonding substances. Other materials or combinations of materials may be included in this class if by experience or accepted tests they can be shown to have comparable thermal life at 130°C.
155°C F	Materials or combinations of materials such as mica, glass fiber, asbestos, etc., with suitable bonding substances. Other materials or combinations of materials may be included in this class if by experience or accepted tests they can be shown to have comparable life at 155°C.
180°C H	Materials or combinations of materials such as silicone elastomer, mica, glass fiber, asbestos, etc., with suitable bonding substances such as appropriate silicone resins. Other materials or combinations of materials may be included in this class if by experience or accepted tests they can be shown to have comparable life at 180°C.
200°C N	Materials or combinations of materials which by experience or accepted tests can be shown to have the required thermal life at 200°C.
220°C R	Materials or combinations of materials which by experience or accepted tests can be shown to have the required thermal life at 220°C.
240°C S	Materials or combinations of materials which by experience or accepted tests can be shown to have the required thermal life at 240°C.
above 240°C C	Materials consisting entirely of mica, porcelain, glass, quartz, and similar inorganic materials. Other materials or combinations of materials may be included in this class if by experience or accepted tests they can be shown to have the required thermal life at temperatures above 240°C.

The above insulation classes indicate a normal life expectancy of 20 000 h to 40 000 h at the stated temperature. This implies that electrical equipment insulated with a class A insulation system would probably last for 2 to 5 years if operated continuously at 105°C. Note that this classification assumes that the insulation system is not in contact with corrosive, humid, or dusty atmospheres.

For a complete explanation of insulation classes, insulation systems, and temperature indices, see IEEE Std 1-1969 and the companion IEEE Standards Publications Nos. 96, 97, 98, 99, and 101. See also IEEE Std 117-1974 and Underwriters Laboratories publication on insulation systems UL 1446, 1978.

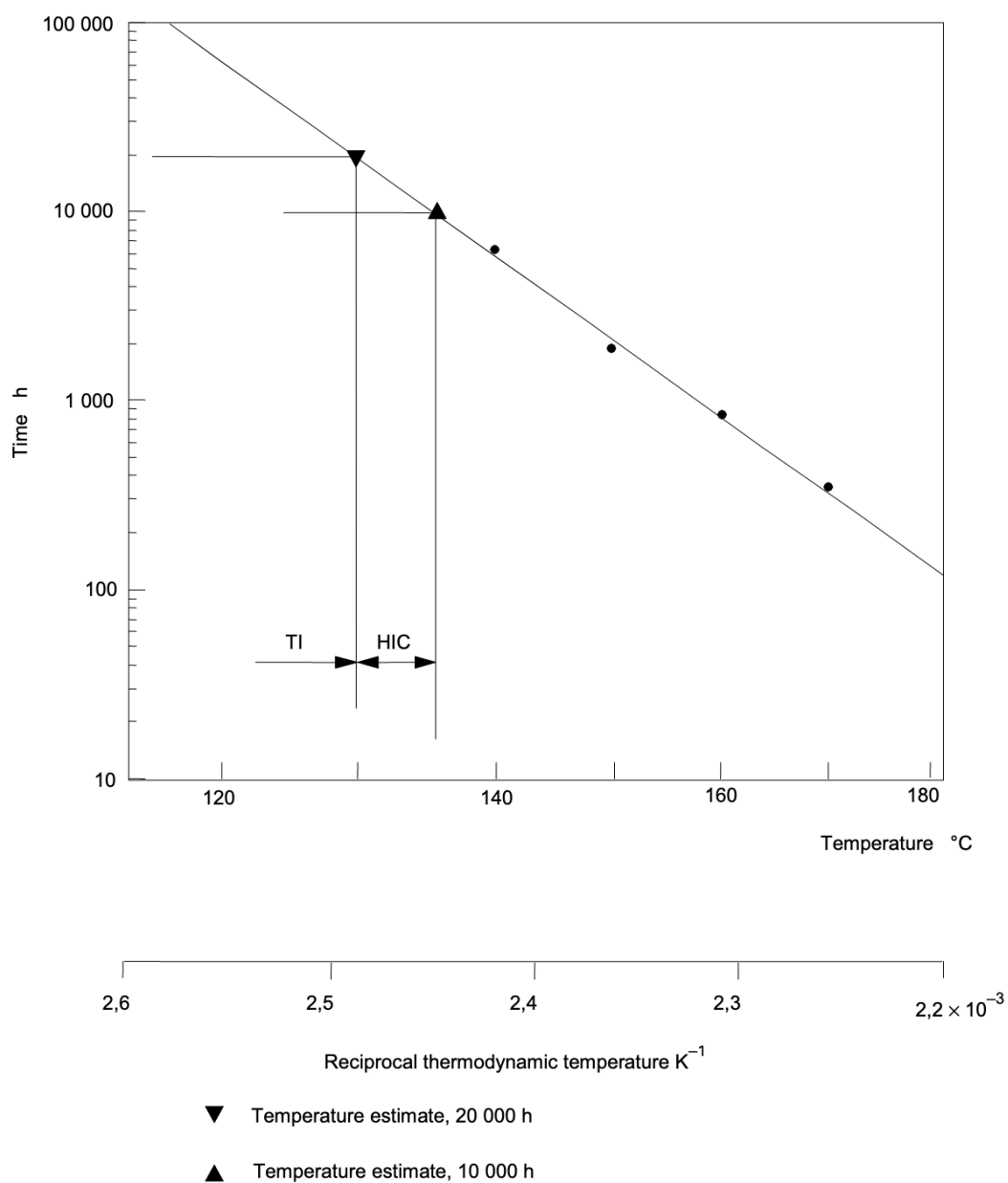
Figur 5.4 – Utdrag fra *Electrical Machines* om isolasjonsklasser [27, s. 129].

De fleste standarder for isolasjon forholder seg til omgivelsestemperatur på maks 40°C. Det varmeste området på en komponent kan fortelle om den opererer innenfor oppgitt temperaturklasse. *Hottest spot temperature* kan finnes ved å trekke maksimalt tillatte omgivelsestemperatur fra maksimumstemperaturen for gitte klasse

*Hottest spot temperature* for klasse A blir da:

$$105 - 40 = 65^{\circ}\text{C} \quad (5.2)$$

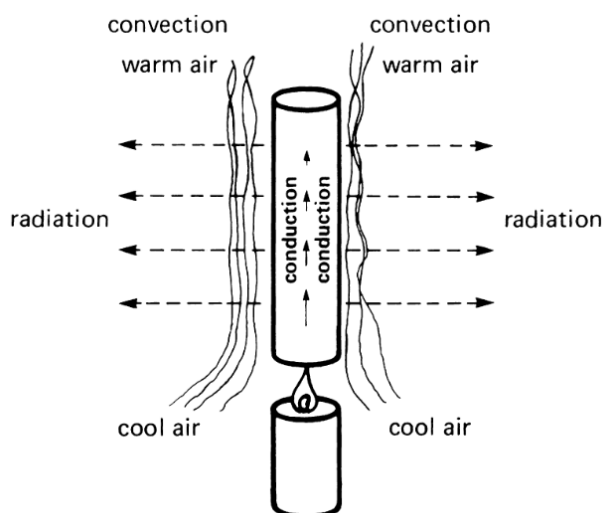
## Sammenheng mellom temperatur og levetid til komponenter



Figur 5.5 – Visuell illustrasjon på sammenhengen mellom varme og levetid for isolasjon. Utdrag fra *IEC 60216-1*, hvor TI står for *the temperature index* og HIC står for *the halving interval* [48, s. 17].

## 5.4 Konveksjon

Når den elektriske energien fraktes fra et sted til et annet skaper den varme ved at atomene i materialet vibrerer, slik som flammen fra stearinlyset virker på lederen i Figur 5.6.



Figur 5.6 – Varmeutveksling med omgivelsene ved hjelp av konveksjon, varmeledning og varmestråling [27, s. 62].

Proessen som får varmen til å gå gjennom et legeme kalles for *varmeledning*, eller *termisk konduksjon* (se Figur 5.7). SI-enheten for termisk konduktivitet er watt per meter Celcius [ $W/(m^{\circ}C)$ ]. Gitt i formel Formel 5.3 kan vi finne effekten som avgis:

$$P = \frac{\lambda \cdot A \cdot (t_1 - t_2)}{d} \quad (5.3)$$

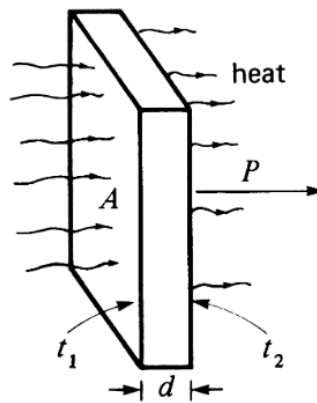
$P$  = Avgitt effekt [ $W$ ]

$\lambda$  = Stoffets termiske konduktivitet [ $W/m^{\circ}C$ ]

$A$  = Stoffets areal [ $m^2$ ]

$(t_1 - t_2)$  = Temperaturdifferansen mellom sidene [ $^{\circ}C$ ]

$d$  = Stoffets tykkelse [ $m$ ]



Figur 5.7 – Termisk konduktivitet gjennom materialet [27].

Varmen avgis som varmestråling til omgivelsene rundt lederen. Omgivelsene kommer til å fortsette å absorbere denne varmen helt til det oppnås termisk likevekt. Den overfløydige varmen kan bli fraktet bort ved hjelp av *konveksjon*. Konveksjonen kan deles opp i to deler:

- *Fri konveksjon* - Naturlige strømmer som følger fysikkens lover. Den varme luften stiger og blir erstattet av kaldere luft fra omgivelsene. Naturlig konveksjonen (se Figur 5.6) i luften er gitt i Formel 5.4:

$$P = 3 \cdot A \cdot (t_1 - t_2)^{1.25} \quad (5.4)$$

$P$  = Varmetap som følge av naturlig konveksjon [W]

$A$  = Legemets overflateareal [ $m^2$ ]

$t_1$  = Overflatens temperatur [ $^{\circ}C$ ]

$t_2$  = Luftens omgivelsestemperatur [ $^{\circ}C$ ]

- *Tvungen konveksjon* - Luften som omgir lederen blir satt i bevegelse av ekstern kraft, slik som en vifte. Den avgitte effekten kan finnes ved Formel 6.1 nedenfor:

$$P = 1280 \cdot V_a \cdot (t_2 - t_1) \quad (5.5)$$

$P$  = Varmetap som følge av tvungen konveksjon [W]

$V_a$  = Luftmengde til kjøleluften [ $m^3/s$ ]

$t_1$  = Temperatur på kjøleluften [ $^{\circ}C$ ]

$t_2$  = Temperaturen på den avgitte luften [ $^{\circ}C$ ]

## 5.5 Fukt

Kraftverk bygget i fjellanlegg må til enhver tid forsynes med luft fra utsiden. Uteluften kan være av varierende temperatur og fuktighet.

Det er mengden vanndamp i luften som avgjør hvor fuktig den er. Dersom fuktig luft med mye vanndamp treffer kjøligere overflater vil det kondensere og skape vanndråper på overflaten. I vannkraftverk er disse kjølige overflatene ofte fjellvegger og vannrør. Vannet som føres inn til turbinen er kaldt, og derfor blir røroverflater svært kalde. Relativ og absolutt luftfuktighet er to måter å beskrive luftfuktigheten på.

### 5.5.1 Relativ luftfuktighet

Temperaturen til luften er avgjørende for hvor mye vanndamp som kan tas opp. Dette angis i en prosentverdi og omtales som relativ luftfuktighet. Jo varmere luften er, jo mer energi inneholder den, og desto mer vanndamp kan den holde på. Den relative luftfuktigheten beskriver mengden vanndamp luften inneholder referert til luftens metningspunkt ved en gitt temperatur. Relativ fuktighet gis av Formel 5.6

$$RH\% = \frac{P_v}{P_s} \cdot 100 \quad (5.6)$$

$P_v$  = partialtrykket til fuktinnholdet i luften [kPa]

$P_s$  = trykket til fuktig luft i mettet tilstand [kPa]

Partialtrykket til en gass er trykket denne gassen utøver om det kun var denne gassen i et volum. 100 % luftfuktighet betyr at luften er mettet med vanndamp ved denne temperaturen som kalles duggpunktet.

### 5.5.2 Absolutt luftfuktighet

Absolutt luftfuktighet er mengden vanndamp i luften uavhengig av temperatur. Målet angis i gram vanndamp per kubikkmeter luft. Dette er derfor et absolutt mål på hvor mye vanndamp luften inneholder [49].

$$AH = \frac{m_v}{V} \quad (5.7)$$

$m_v$  = vanndampens masse [g]

$V$  = luftens volum [ $m^3$ ]

### 5.5.3 Kondens og dugg

Vannkraftverk sprengt ut i fjell med tilhørende sjakter og tunneller vil ha problemer med kondensering og dugg. I en tunnel med råsprengte fjellvegger vil temperaturen være relativt stabil gjennom hele året. Luften som passerer gjennom vil derimot kunne variere mye i temperatur. Luften kan være friskluft eller avtrekksluft. I sommerhalvåret vil det være naturlig at friskluften er varmere enn både luften inne i tunnelen og tunnelens overflater. Dersom varm og kald luft blandes inne i tunnelen vil den varmeste luften kjøles ned. Ved duggpunktstemperaturen vil luften være mettet av vanndamp og begynne å skille ut vanndråper. I en slik situasjon kan det bli tåkedannelser inne i tunnelen.

### 5.5.4 Fuktig isolasjon

Generatoren er en av de viktigste komponentene i et vannkraftverk, derfor er det ønskelig at den varer så lenge som mulig. Uønsket fuktighet kan føre til degradering av isolasjonen til statorvindingene i generatoren. Dersom isolasjonsresistansen synker vil, lekkstrømmen til generatoren øke [50]. Dette avhenger også av kvaliteten på isolasjonen. Eldre maskiner har gjerne isolasjon som absorberer mer fuktighet. Nyere isolasjon absorberer begrenset med fuktighet inn i mediet. Likevel vil fuktig luft i omgivelsene påvirke isolasjonsresistansen ved å danne en hinne utenpå isolasjonsmediet. En slik hinne vil også redusere isolasjonsresistansen.



## 5.6 Beregning av avfukningskapasitet

Det er to formler som benyttes for å beregne nødvendig kapasitet til en avfukter. Den ene gjelder for fuktete flater med stillestående luft over. Den andre for avfukning av eventuell fuktig luft som tilføres området. Nødvendig avfukningskapasitet er et resultat av de to summene.

Følgende formel benyttes for å regne ut kapasitet for fuktete flater med stillestående luft:

$$M_v = \frac{\alpha}{c_p} \cdot A \cdot (x_1 - x_2) \cdot 3600 \quad (5.8)$$

$M_v$  = fordampet vann [g/time]

$\alpha$  = varmeovergangskoeffisient, ca. 1.5 [ $W/(\text{°C} \cdot m^2)$ ]

$c_p$  = spesifikk varmekapasitet, 1000 [ $J/(\text{°C} \cdot kg)$ ]

$A$  = arealet til den fuktete flaten [ $m^2$ ]

$x_1$  = vanninnhold i mettet luft ved vanntemperatur [g vann/kg luft]

$x_2$  = vanninnhold i romluft [g vann/kg luft]

Gjeldende formel for avfuktning av fuktig frisk- og omluft som tilføres et område er som følger:

$$M_l = Q_v \cdot \rho \cdot (x_3 - x_2) \cdot 3600 \quad (5.9)$$

$M_l$  = vann som skal fjernes [g/time]

$Q_v$  = luftmengde [ $W/(\text{°C} \cdot m^2)$ ]

$\rho$  = lufttetthet [ $kg/m^3$ ]

$x_2$  = vanninnhold i romluft [g vann/kg luft]

$x_3$  = vanninnhold i tilført luft [g vann/kg luft]

Andre parametere som kan være relevante å ha med i beregningen er fukt fra mennesker og forbrenningsgeneratorer. Mennesker gir fra seg 400-300 g vann/time som tilføres i luften. Verdien påvirkes av temperatur, antall mennesker, og aktivitetsnivå. Eventuelle forbrenningsmotorer vil produsere 1,4 kg vann/kg forbrent drivstoff [4, s. 34].

En generell formel for utregning av nødvendig avfuktingskapasitet kan skrives som:

$$N_a = \frac{\alpha}{c_p} \cdot A \cdot (x_1 - x_2) \cdot 3600 + Q_v \cdot \rho \cdot (x_3 - x_2) \cdot 3600 \quad (5.10)$$

$N_a$  = Nødvendig avfuktingskapasitet [*g vann/time*]

## **Del II**

## 6 Resultat av undersøkelser

Resultatet av undersøkelsene bygger på tilbakemeldinger og samtaler med ulike fagpersoner i de aktuelle bransjene. Dette, kombinert med befarings på Leirfossene Kraftverk og litteraturstudier, legger grunnlaget for hva som legges frem. Det har ikke vært tilgang på data fra kraftverk når det kommer til ventilasjon. Grunnen er at dagens løsninger ikke gjør det mulig å hente ut historiske data fra anleggene i særlig grad.

### 6.1 Lufttilførsel og distribusjon

Felles for alle kraftstasjonene i denne oppgaven er at de er bygget inn i fjell. Ventilasjonsanlegget trenger derfor tilførsel av friskluft og mulighet til å transportere avkastluft ut et annet sted.

Tilførsel av friskluft påvirker fukt og kondensutviklingen i stasjonen i stor grad. Dersom luften tas inn fra adkomsttunnelen, kan det ofte oppstå tåkedannelse. Dette kan løses ved utbygging av ventilasjonskanaler for lufttilførsel. Problemet med denne løsningen er utfordringene som kommer av at stasjonene ofte er bygget langt inn i fjell. Inne i fjellet vil det være høyere trykk som kan føre til at vifter blir overbelastet og stopper. Forhindring av dette gjøres ved å installere trykk-avlastningskammer/rom slik at lufttrykket kan jevne seg ut før det sendes ut av kraftstasjonen. En slik løsning vil også forhindre forurensning av luften som blir sendt inn i stasjonen ettersom det her kan stå anleggskjøretøy.

Det er generelt enighet om at bruk av isolert ventilasjonskanal er den beste løsningen for slike fjellanlegg, men allikevel blir det ikke så ofte tatt i bruk fordi det er mye dyrere å anlegge enn å bruke eksisterende tunneler i råsprengt fjell. Tar man i bruk denne løsningen med kabelsjakt/ventilasjonskanal til friskluft, må avtrekk føres ut i adkomsttunnel. Utvendige porter til adkomsttunnel må ha filter dersom det skal gjøres på denne måten. Ved *Leirfossene kraftverk* er det valgt en slik løsning. Der er det også benyttet vifter ved port i adkomsttunnel som blåser varm luft for å hindre ising.

Dersom det benyttes støpt tunnel bør friskluft tas inn gjennom denne og avtrekk gå gjennom adkomsttunnel. Ved å benytte innstøpte ventilasjons- eller kabeltunneler minimeres problemer med kondensering og ising ved inntak. Den beste løsningen er om luften føres i kanalen hele veien til stasjonen, men en løsning er også å bruke

kanalen et lite stykke forbi inntak. Ved å bruke ventilasjonskanal et stykke forbi inntak kan også ising unngås.

### 6.1.1 Distribusjon

I prosjektering av ventilasjonsanlegg er det viktig å ta hensyn til hva slags forurensing forskjellige områder av kraftverket tilfører avtrekksluften. Det er viktig at ventilasjonen ikke bidrar til ugunstig spredning av forurenset luft ved bruk av for eksempel omluft.

“Luft skal ikke føres fra rom med lavere krav til luftkvalitet til rom med høyere krav til luftkvalitet” [3]. Dette prinsippet gjelder spesielt i områder der mennesker skal oppholde seg over lengre tid. Det innbefatter for eksempel kontrollrom, sanitæranlegg og liknende. Spesielt dreier dette seg om områder med oljedamp og oljestøv, børstestøv eller områder med mye fuktighet i luften. Oljekjølte transformatorer installert innendørs krever ekstra hensyn. Det er viktig å sikre at avtrekksluft fra disse ikke har mulighet til å blandes med luft som føres inn i andre deler av stasjonen. På grunn av eksplosjonsfare bør dette også være en egen branncelle med tilhørende funksjoner.

I maskinsalen kan det være spor av børstestøv i luften dersom børsteavsug ikke fungerer tilstrekkelig. I tillegg kan lager i generator føre til oljedamp i luften. Konsentrasjonen av oljedamp i luften skal ikke overstige  $1 \text{ mg}$  oljedamp per  $m^3$  luft [51]. Det er vanlig å installere avsug med hensyn på begge utfordringene. Avtrekk fra generator bør uansett ikke benyttes som omluft i stasjonen. Den står gjerne i eget avlukke da den er følsom med tanke på tilsmussing av støv fra andre områder i stasjonen.

Utpregede fuktige områder bør også unngås som omluft i stasjonen. I tillegg vil dette spesielt gjelde varm luft som trekkes inn i stasjonen om sommeren. Varm luft har høyere potensiale for å ta opp vanndamp og kan derfor føre til økt kondensering i kaldere områder i tunnelen.

Sanitæranlegg som toaletter og andre oppholdsrom inne i stasjonen skal være utført i henhold til *Byggeteknisk forskrift*. Spesielt luft fra sanitæranlegg må ha eget avtrekk til hovedavtrekket i stasjonen. I kontrollrommet vil det vanligvis ikke oppholde seg mange mennesker, men det kan være en betydelig varmeutvikling fra styretavler og annet datautstyr som er installert i dette rommet.

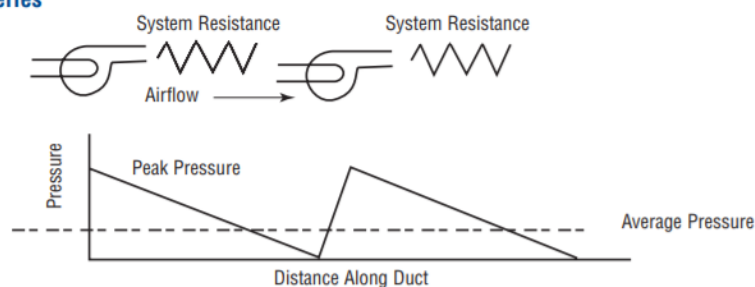
Generelt for de fleste kraftstasjoner er det en utfordring å ha kontroll på luftflyten. Det er ofte varierende bruk av ventilasjonskanaler, som fører til at luft flyter gjennom trappesjakter og andre naturlige åpninger inne i stasjonen. Dette gjør det utfordrende å oppnå fullstendig kontroll på luftflyten i et kraftverk.

### 6.1.2 Viftekonfigurasjon

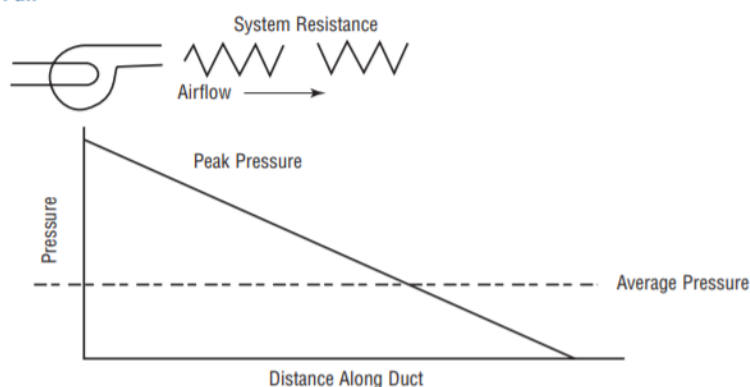
Uavhengig av hvordan luften føres inn i stasjonen bør vifter/aggregatenes arrangement vurderes. Systemet bør alltid være redundant og dekke 200 % av stasjonens behov. Dette er et viktig prinsipp for å opprettholde tilstrekkelig ventilasjon til enhver tid, og samtidig gjøre det enklere med planlagt vedlikehold.

Dersom ventilasjonskanalene, eller tunnel, er spesielt lang må det tas hensyn til trykkfall. Det kan være at flere vifter bør installeres i serie for å få et mer effektivt kanalsystem.

#### Two Fans in Series



#### Single Fan



Figur 6.1 – To vifter i serie sammenlignet med én større vifte [52].

I Figur 6.1 sammenlignes gjennomsnittlig trykk for to mindre vifter over en gitt kanallengde med gjennomsnittstrykket fra en større vifte. Det gjennomsnittlige

trykket i kanalen blir lavere dersom to vifter i serie benyttes til fordel for én. Slike vurderinger må tas hensyn til ved bestemmelse av tverrsnitt og lengde på kanaler.

Dersom det skal være mulig å regulere luftstrømmen inn i stasjonen er det to hovedprinsipp som benyttes.

- Konstant viftehastighet med spjeldregulering
- Variabel viftehastighet

Ved å benytte konstant viftehastighet må luftstrømmen reguleres ved hjelp av spjeldstyring. Denne løsningen er lite energieffektiv, og enda mindre ved lave luftmengder. Ved maksimal innluftkapasitet vil det derimot ikke være noe forskjell da spjeld vil være i åpen posisjon. Det mest optimale er å benytte vifter med regulerbar hastighet for å kontrollere mengden luft inn i stasjonen. Virkningsgrad på vifte og motor vil ikke være optimal ved alle hastigheter, men tapene vil samlet sett være mye lavere enn ved bruk enten av oppstrøms eller nedstrøms spjeldstyring. I tillegg vil det kunne spare viften for slitasje ved at den ikke trenger å driftes på samme høye effekt konstant. På bakgrunn av dette bør det alltid benyttes variabel hastighet for å regulere mengde friskluft der det er mulig.

Dersom viftekapasiteten er dekket med 200 % i form av to vifter kan en parallell drift av disse vurderes. Å drifte vifter i parallell kan spare mye energi i forhold til å drifte kun én med full last. Total effekt kan reduseres med så mye som 40 % i noen tilfeller [53]. Dette er en effektiv løsning i et system med lite motstand, som for eksempel en kortere eller større kanal. I system med høyere motstand vil seriekoblede vifter prestere bedre. Motstanden i systemet basert på kanalens lengde kan finnes ved bruk av Formel 3.1

## **6.2 Prinsippkisser og funksjonsbeskrivelser**

I dette underkapitlet er det vist en del eksempler på luftflytskjemaer for konkrete kraftstasjoner. Det er en blanding av prinsippkisser, og funksjonsdiagram. De viser ventilasjonsanleggets oppbygging, samt hvordan luften fordeler seg gjennom de forskjellige stasjonene. Stasjonenes navn er ikke oppgitt av sivilforsvarsmessige grunner. Alle illustrasjonene er hentet fra [4, Appendix A, s. 1 - s. 13], med tillatelse av forfatter *Edvin Nordrik*.

### **Figur 6.2 - Kun A-tunnel tilgjengelig**

Figuren illustrerer luftflyten i en kraftstasjon hvor kun A-tunnelen er tilgjengelig. Tunnelen har støpt kanal som benyttes som friskluftsinnntak, kabelkanal og nødutgang. Portalbygget inneholder en innblåsningsvifte, filter, varmebatteri og spjeld. Avtrekksviften er plassert i nærheten. Det blir tilført friskluft direkte fra nødutgangskanalen inn til turbinetasjen, generatoretasjen, og kontrollrommet. Luften beveger seg oppover i stasjonen, flyter fra turbinetasjen, gjennom generatoretasjen og videre til maskinsalen før den forlater stasjon. Kontrollrommet har egen friskluftsinnntak hvor luften strømmer videre til batterirommene før den går ut adkomsttunnelen ved hjelp av egen avtrekksvifte. Oppholds- og redningsrommet har egen vifte for lufttilførsel hvor avtrekksluften blir brukt, og sendt tilbake inn i stasjonen.

### **Figur 6.3 - Fullstendig omgjort ventilasjon**

Tegningen viser en stasjon hvor ventilasjonen har blitt fullstendig omgjort. Den originale gjennomføringen hadde lufttilførsel gjennom A-tunnelen, og måtte endres på grunn av stor fuktighet og høyt radoninnhold. Ombyggingen fører til at A-tunnelen tar inn friskluft ved portalen. Stasjonen får friskluft gjennom en kanal i kabelsjakt. Mengde tilført friskluft økes betydelig, og den varmes opp til 7°C. Avtrekksluften blir sendt ut kabelsjakten.

### **Figur 6.4 - Stor stasjon ved normal driftssituasjon**

Skjemategning av ventilasjonsanlegget frem til kraftstasjonen. Dette er en relativ stor stasjon hvor friskluft tas inn gjennom K-tunnel og tas ut gjennom en parallell tunnel. Det er lang avstand fra portalbygget inn til kraftstasjonen. Skjemaet viser luftflyten inn til stasjonen ved normal drift. Portalbygget har et dobbelsett med vifter som blåser friskluft inn i stasjonen gjennom kabeltunnelen. Det er også dobbelt sett vifter som trekker brukt luft ut adkomsttunnelen. Alle viftene går bortsett fra brannvifte VA1 – AV1. Spjeld VA1 – SM1, VA1 – SM5 og VA1 – SM7 er alle stengt. Alle andre spjeld er åpne. Brannør VA2 – SM6 er lukket.

### **Figur 6.5 - Stor stasjon ved nødsituasjon**

Skjemategning av samme ventilasjonsanlegg som i Figur 6.4, men det viser luftflyt ved brann. Ved brann vil alle vifter stoppes og spjeld stenges. En egen brannvifte vil starte. Ved start av brannvifte vil Spjeld VA1 – SM5 og VA1 – SM7, samt brannør åpne. Porten til stasjonen og portalbygget vil åpnes. Dette fører til at røyken blir trukket ut K-tunnel, mens det dras inn friskluft inn A-tunnel. Denne automatiske



omkoblingen snur retningen på luften i praksis. De fleste stasjonene som sender avkastluften gjennom A-tunnelen bruker denne omkoblingen ved brann slik at friskluft blåses inn A-tunnelen.

### **Figur 6.6 - Stor stasjon med alle tunneler tilgjengelig**

Et eksempel på en stor stasjon med både A-tunnel, K-tunnel og U-tunnel tilgjengelig. Et dobbelsett med vifter blåser friskluft inn i stasjonen gjennom U-tunnelen, samtidig som et dobbelsett med vifter trekker brukt luft ut A-tunnel. Luften fordeles i stasjonen via hulrom bak stasjonsvegg. Luften føres gjennom stasjonen før den trekkes inn i tilsvarende hulrom bak stasjonsveggen på andre side av stasjonen. Her blir en del luft sendt tilbake inn i stasjon som omluft, mens resten blir sendt ut A-tunnel. En egen vifte trekker luft ut kabeltunnel.

### **Figur 6.7 - Middels stor stasjon**

Figur 6.7 illustrer luftflyten gjennom en middels til stor stasjon. Luftfordelingen i de forskjellige etasjene skjer via hulrom bak stasjonsveggene. En vifte i portalbygget tilfører friskluft til stasjonen gjennom A-tunnelen. Luften sirkulerer gjennom stasjonen i rekkefølgen vist på bilde, frem til den blir trukket ut som brukt luft gjennom nødutgangstunnel. Batterirommene har egen vifte som hjelper med å dra ut bruktluft.

### **Figur 6.8 - Tversnitt av middels stor stasjon**

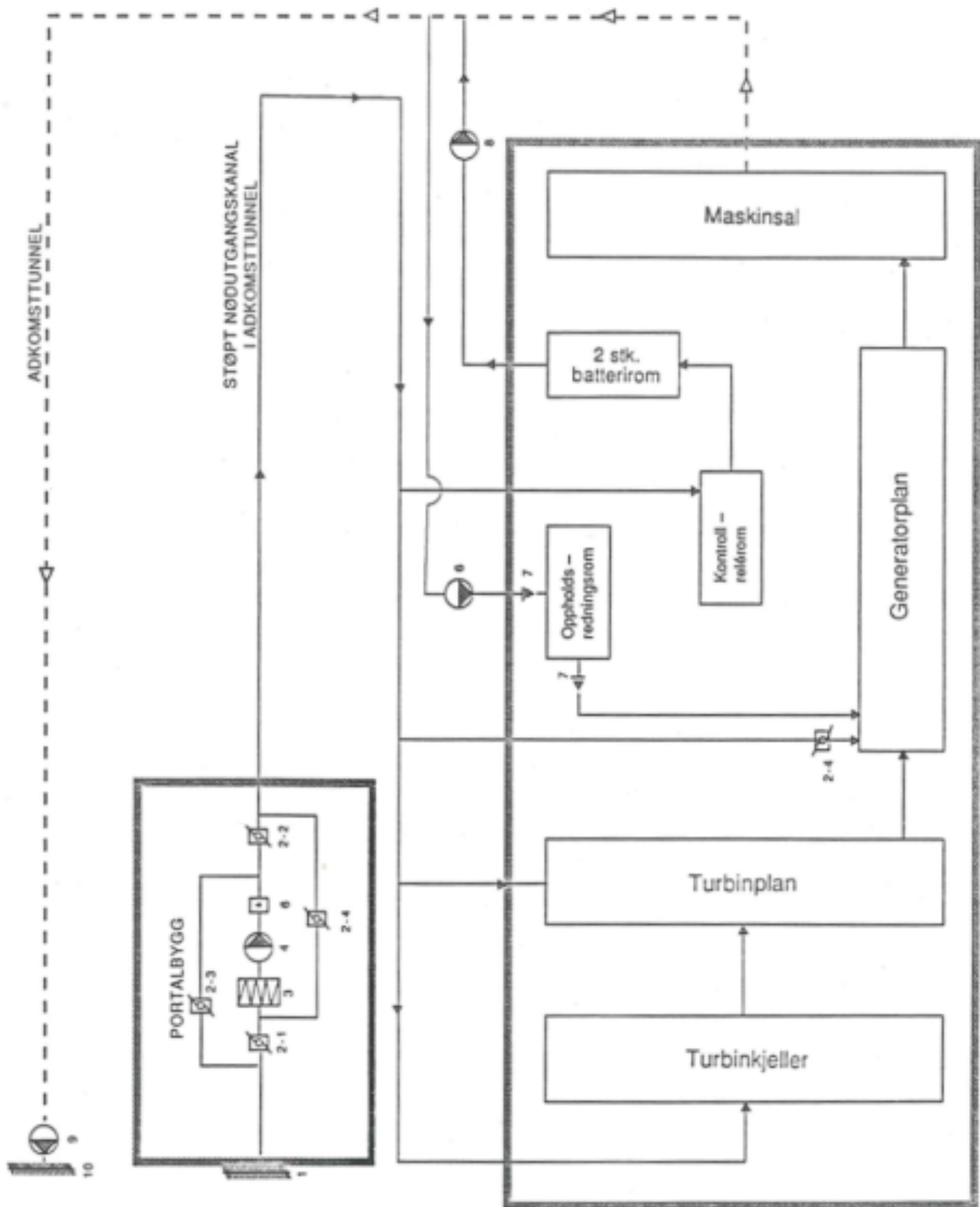
I likhet med Figur 6.7, er dette et annet eksempel på luftflyten gjennom en middels stor stasjon. Friskluft tas inn via kabelsjakt, og bruktluft sendes ut A-tunnel. Eksempellet er et skissert tversnitt av en kraftstasjon. Bilde viser stasjonens oppbygging, og hvordan det henger sammen med ventilasjonsanlegget.

### **Figur 6.9 - Påkostet ventilasjonsanlegg**

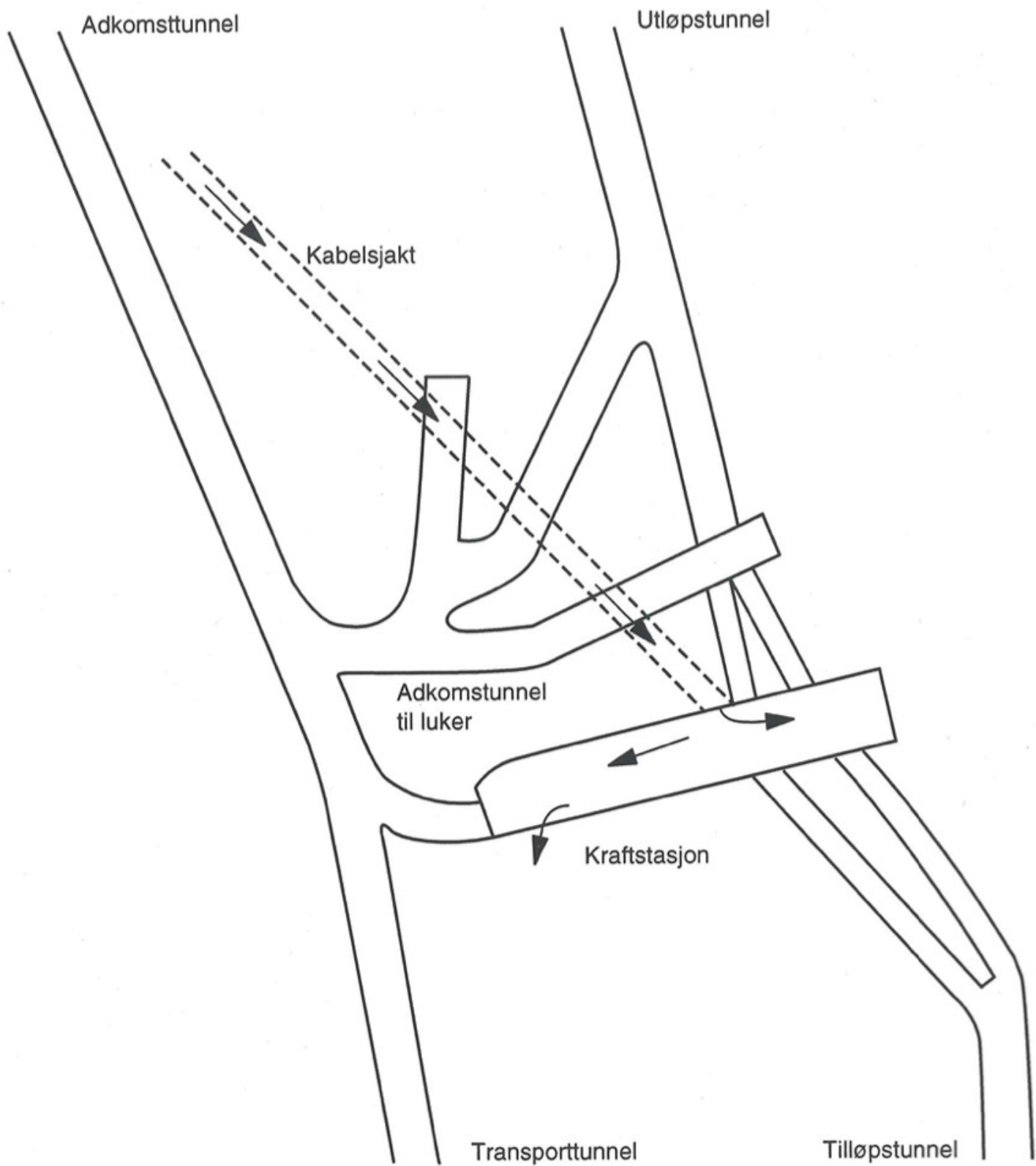
Stasjonen vist i eksempelet er middels stor og har et relativt påkostet ventilasjonsanlegg. Luften fordeles gjennom rørkanaler, og det er montert flere avtrekksvifter som sørger for god luftgjennomstrømning. Det er også montert to avfuktere i turbinetasjen. Prinsippskissen viser ventilasjonsanleggets oppbygging, og hvordan det strekker seg gjennom stasjonen på en oversiktlig måte.

### **Figur 6.10 - Fysisk skisse**

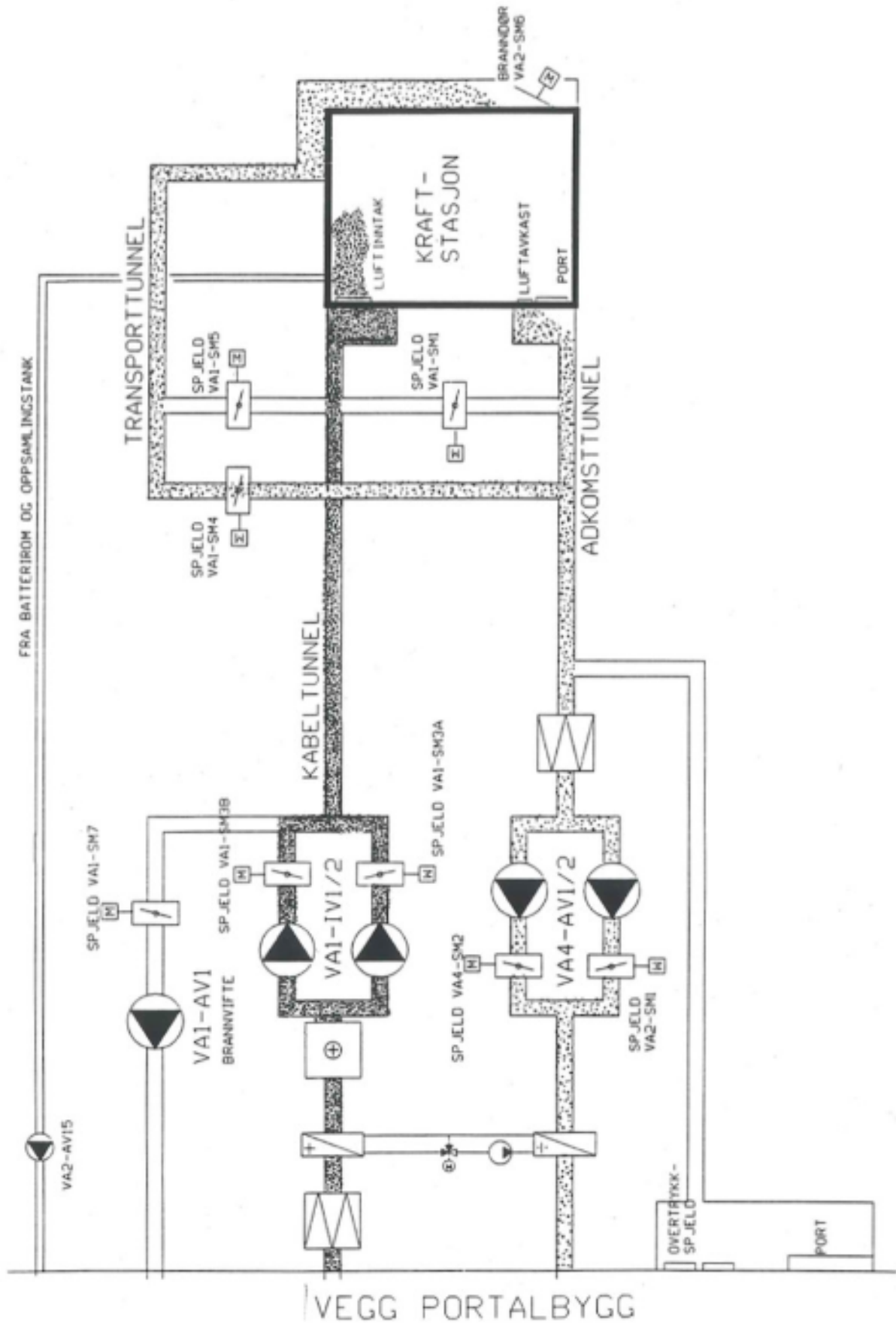
Eksempelet viser en prinsippskisse med en mer fysisk forklaring på hvordan luften fordeles rundt i stasjonen. Hulrom bak stasjonsveggene benyttes som fordelingskammer, og oppsamlingskammer på hver sin side av stasjonen. Stasjonen har både K-tunnel, U-tunnel og A tunnel. Her benyttes U-tunnelen for inntak av friskluft, og A-tunnel for avkast av brukluft. Flere luftveier inn i stasjonen gjør det mulig å alternere mellom sommer- og vinterdrift. Det kan ikke gjøres i denne stasjonen på grunn av høy fuktighet i K-tunnel.



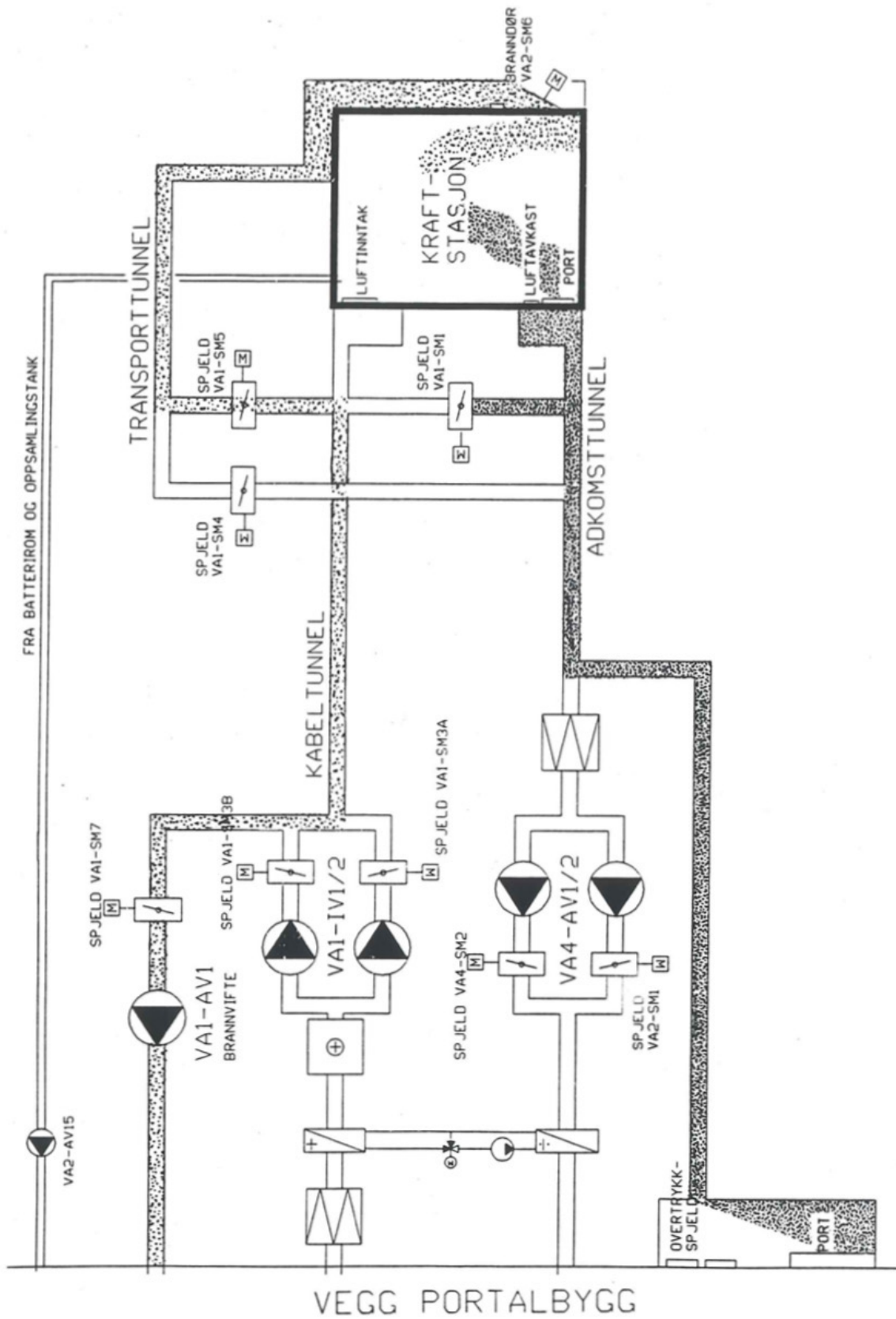
Figur 6.2 – Kraftstasjon hvor kun adkomsttunnel er tilgjengelig.



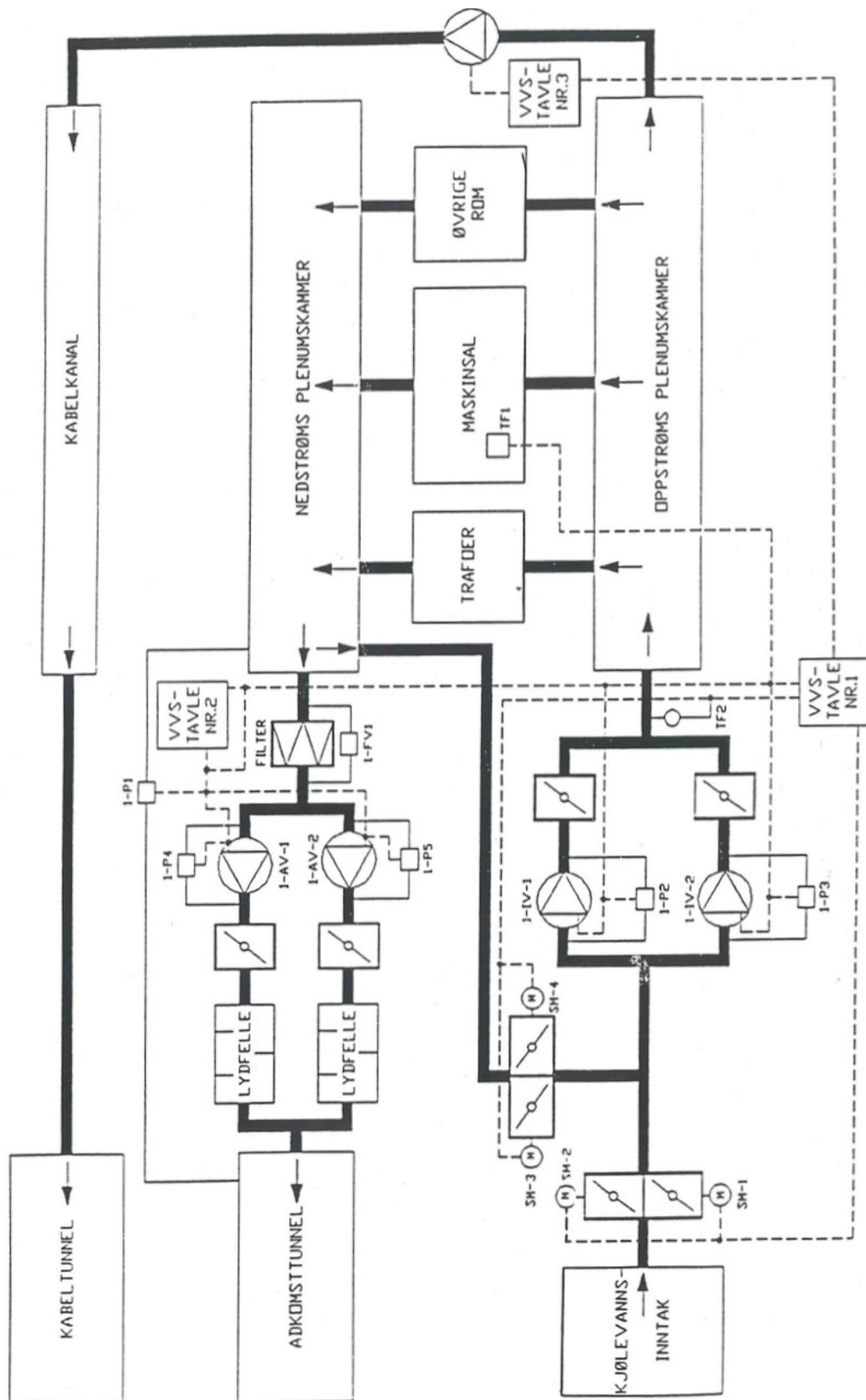
Figur 6.3 – Ventilasjonsanlegget her har blitt fullstendig omlagt og utvidet.



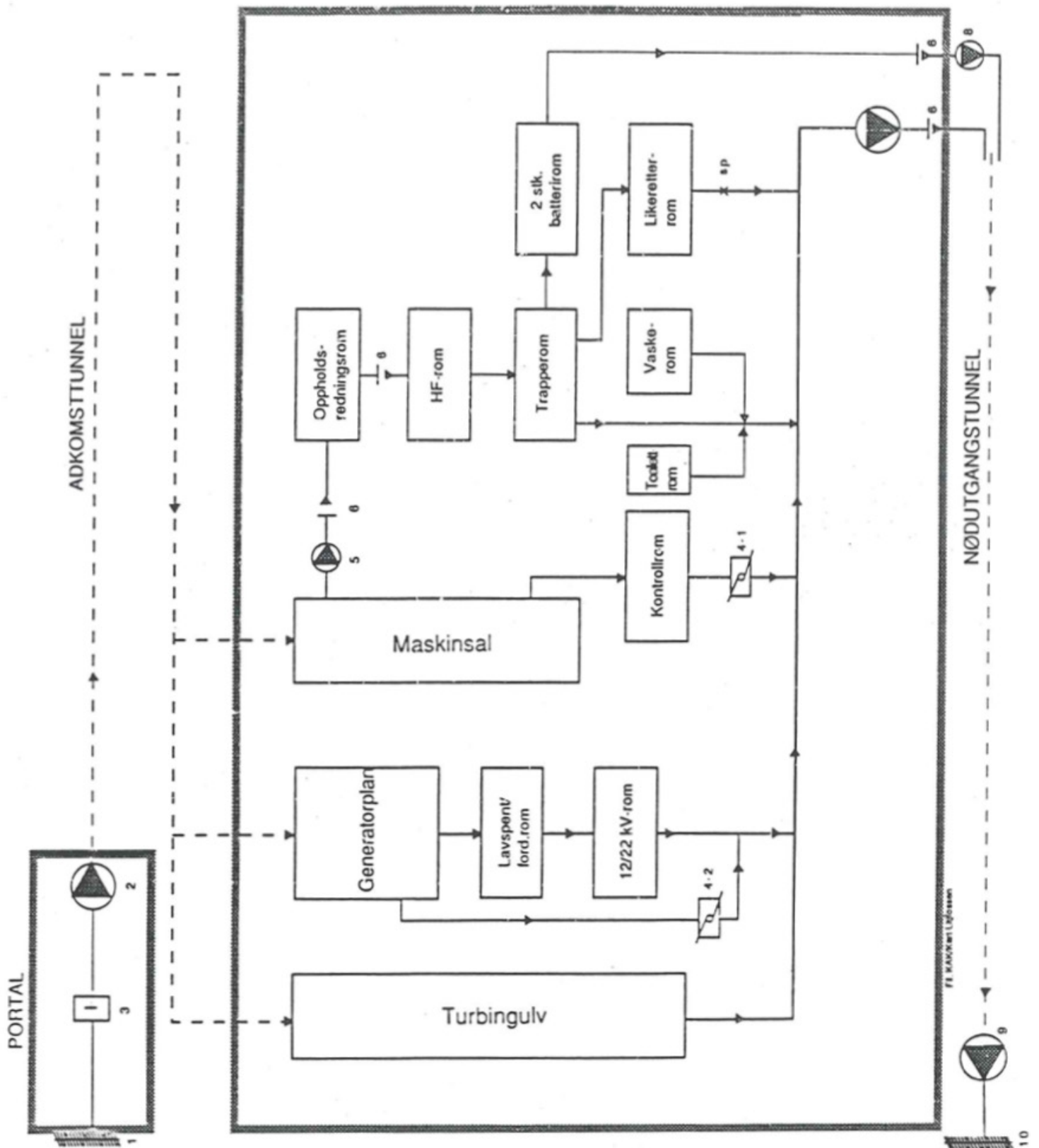
Figur 6.4 – Her vises luftflyten til en stor kraftstasjon ved normal drift.



Figur 6.5 – Skjemaet viser luftflyten ved brann i samme stasjon som i Fig. 3.18.

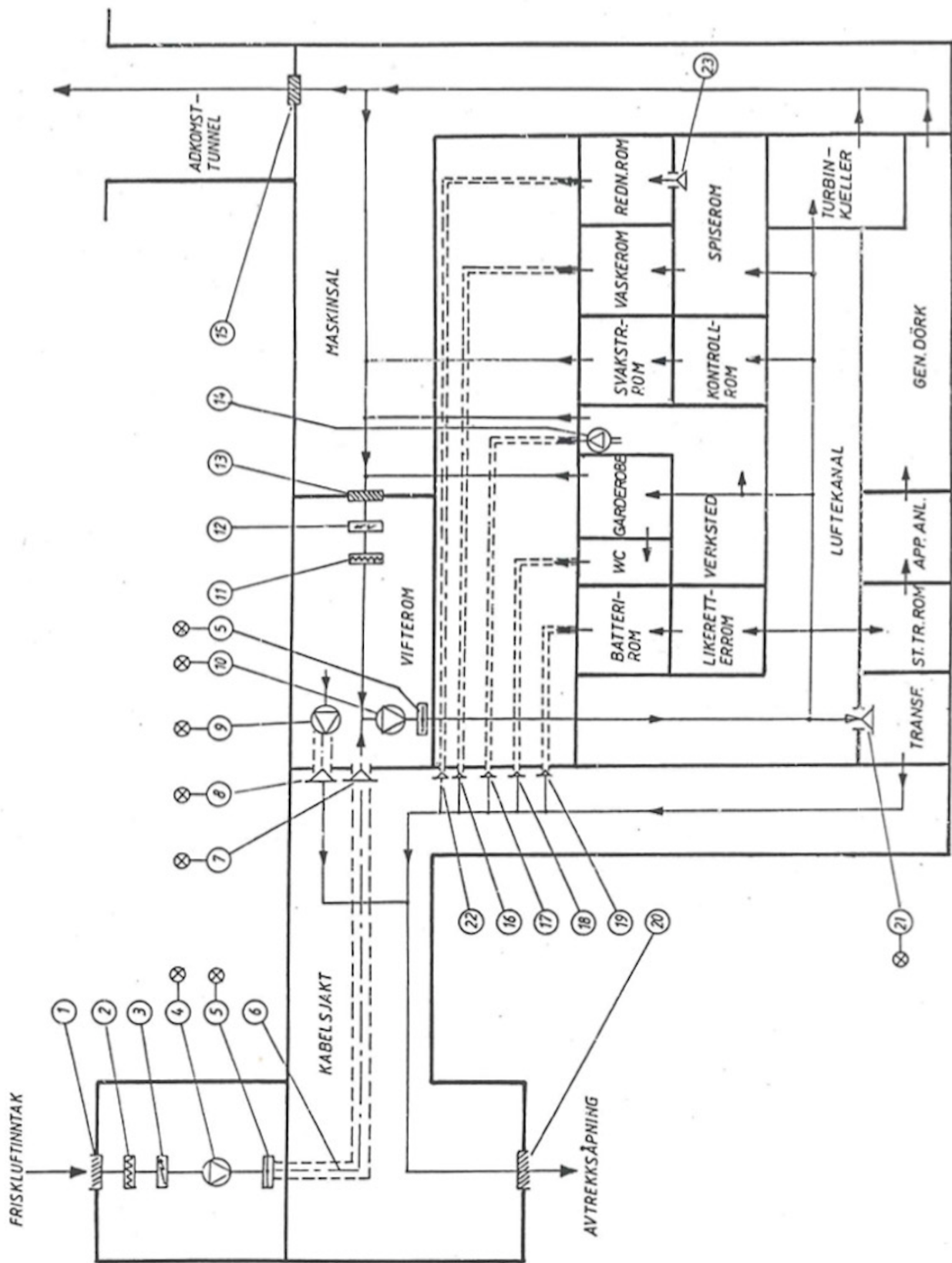


Figur 6.6 – Skjemaet viser en stor stasjon med tilgjengelig adkomsttunnel, kabelsjakt og utgangstunnel.

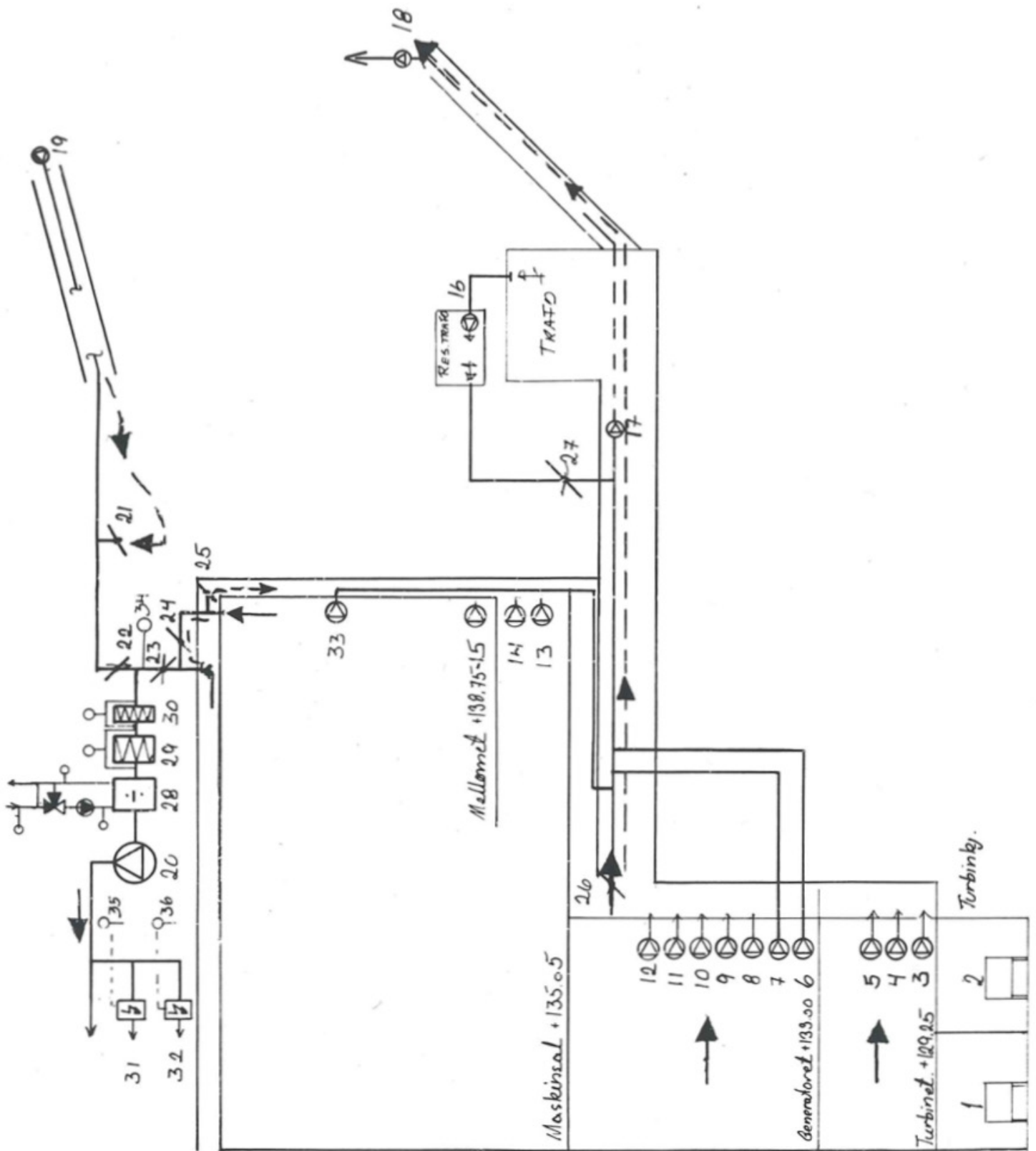


Figur 6.7 – Middels stor stasjon.

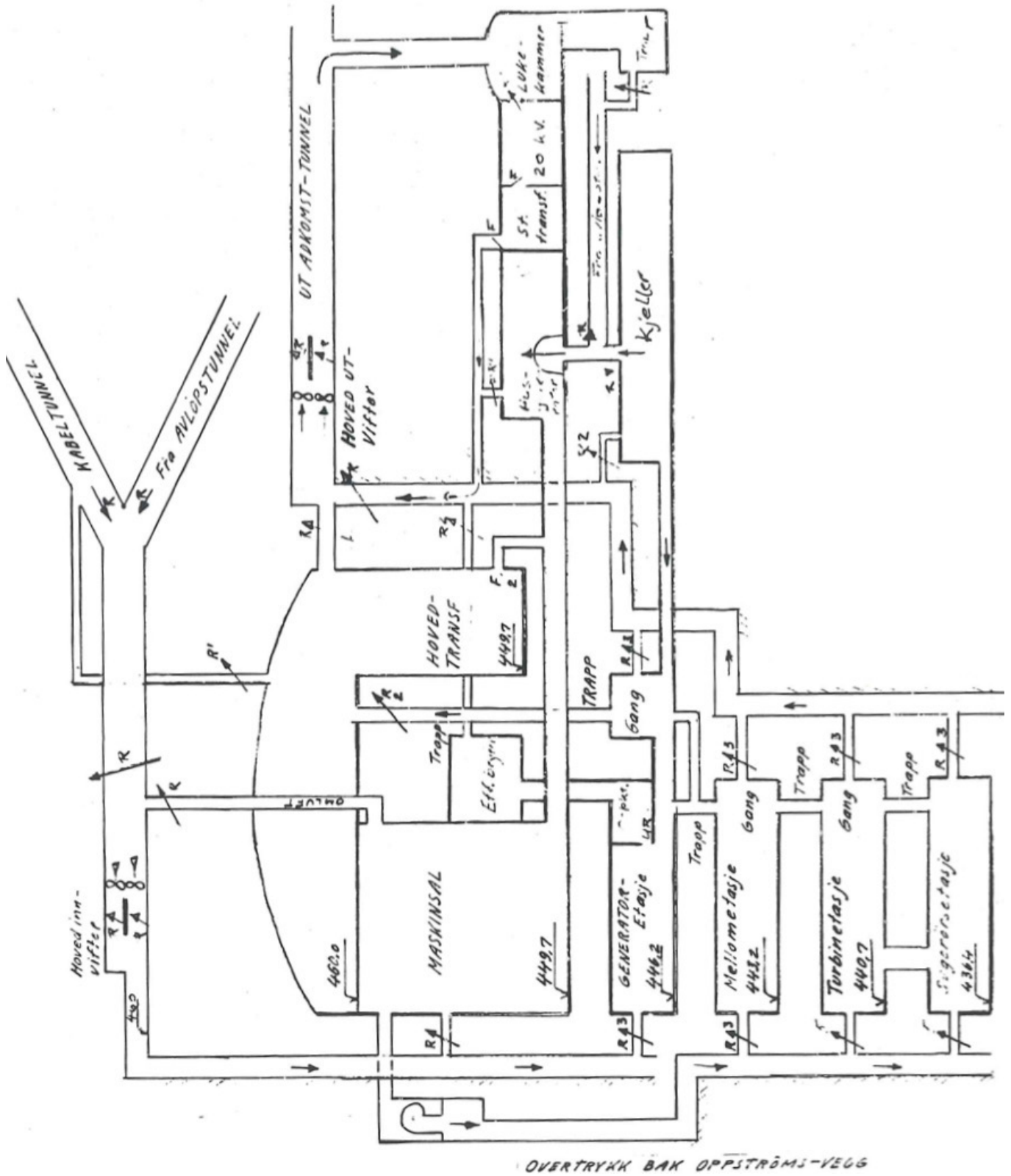




Figur 6.8 – Middels stor stasjon. Her kommer friskluften inn ved kabelsjakt og ut ved både adkomsttunnel og en avtrekksåpning.



Figur 6.9 – Skjemaet viser en middels stor stasjon med et relativt påkostet ventilasjonsanlegg.



Figur 6.10 – Eksempelet viser en mer fysisk representasjon av luftfordelingen i stasjonen.

## 6.3 Turbinetasje

Nederst i stasjonen ligger turbinkjelleren. Her krysser tilløpsrøret over rommet. Turbinventilen har bevegelige deler på utsiden av vannrøret og er av den grunn ikke støpt inn i konstruksjonen. Den kalde overflaten, legger til rette for kondens dersom overflatetemperaturen på tilløpsrørene synker ned til duggpunkttemperaturen.

Temperaturen på vannet ligger med få unntak under  $10^{\circ}\text{C}$ . Dette resulterer i at romtemperaturen sjeldent når høye temperaturer, og kan ofte ligge i området rundt  $12^{\circ}\text{C}$  [54].

Luftflyten i dette området bør ikke overstige to luftskift per time [55]. Hurtige luftskift vil bidra med økt inntak av fuktig luft. Den relative luftfuktigheten vil øke, og det vil oppstå kondens på rørene. Behovet for ventilasjon er derfor mindre i turbinetasje enn i andre områder i stasjonen.

Oppvarmet luft inneholder mye vanndamp som vil kondensere på overflatene, og hele området vil føles fuktig. I normal drift er det ikke behov for mange luftskift her da temperaturen er naturlig lav. Det er heller ingen komponenter som trenger kjøling.

Det er ikke til å komme utenom at det vil være fuktig i dette området, og det vil være ekstremt vanskelig å få fullstendig bukt med problemet. Likevel vil det være hensiktsmessig å begrense fuktigheten så mye som mulig for å hindre rust på bevegelige deler slik som turbinventil.

Dersom tilført luft er relativt tørr kombinert få luftskift er det ikke nødvendigvis behov for avfuktere. I de fleste tilfeller vil det likevel være en fordel å installere avfuktere. Ved lave avfuktingsbehov kan kondensavfuktere være tilstrekkelig. Det beste alternativet vil likevel være punktavfukting med sorpsjonsavfukter. På den måten kan noe av fuktigheten adsorberes og føres i sluk til avvann eller liknende. Det bør likevel være mulighet for tilstrekkelig ventilasjon dersom det utføres arbeid av personer i området. Da må ventilasjonen legges til rette for gode arbeidsforhold.

### Tiltak mot radon

Radon er den tyngste edelgassen og dermed tyngre enn luft. Ettersom turbinkjeller ligger nederst i kraftverket kan radon hope seg opp her. For å kvitte seg med radon kan en bruke radonmembran på veggene og gulvet for å blokkere tilsiget. Denne

løsningen krever mye arbeid med tanke på de store arealene som må dekkes i slike anlegg, og vil trolig medføre høye kostander.

Ved å dimensjonere ventilasjonsanlegget med radon i betraktningene, vil man kunne kvitte seg med gassen på en enkel, og kostnadseffektiv måte. Prinsippet går ikke ut på å fjerne kilden, men heller tynne ut gassen slik at det ikke blir et problem. Det er samtidig viktig at systemet ikke skaper for stort undertrykk.

## 6.4 Generator

Tilstrekkelig kjøling av generatoren er viktig for at den skal oppnå prosjektert levetid. Ved bruk av enkel likning for konveksjon kan det vises at tilstrekkelig kjøleluft har mye å si for temperaturstigningen.

$$P = 1280V_a(t_2 - t_1) \quad (6.1)$$

Gitt et tap til omgivelsene på 100 kW viser ligningen differansen i nødvendig kjøleluft ved kjøleluft på 20°C og temperaturstigning på luft på henholdsvis 20°C og 30°C.

Omskrevet til å gi nødvendig kjøleluft sier likningen:

$$V_a = \frac{P}{1280(t_2 - t_1)} \quad (6.2)$$

Setter inn for henholdsvis 30°C og 20°C temperaturstigning på kjøleluften:

$$V_a = \frac{100000}{1280(50 - 20)} = 2,6 \text{ m/s}$$

$$V_a = \frac{100000}{1280(40 - 20)} = 3,9 \text{ m/s}$$

Ovenfor vises det at for å senke temperaturen på 10°C trengs det en økning i kjøleluft fra 2,6 til 3,9 [m/s]. Slike endringer kan ha stor innvirkning på levetiden til isolasjonsmateriale som omtalt i avsnitt 4.2.5

Fukt er sjeldent et problem i forbindelse med generator. Generatoren genererer tapsvarme som vil ha en tørkende effekt på luften i området. Ved stans av generator er det ønskelig å holde temperaturen på generatorens komponenter så stabil som mulig. Derfor er det vanlig å tilføre varme i dette området dersom generatoren ikke er i drift. På grunnlag av dette vil det vanligvis ikke være fare for kondens på overflater her.

## **6.5 Styring og overvåking**

Et ventilasjonsanlegg som styres autonomt, har gode muligheter for innhenting og overvåking av data. Dette legger til rette for effektiv drift. Behovstyrt ventilasjon vil være et naturlig steg videre for mange kraftverk. Et behovsstyrt ventilasjonsanlegg bør inneholde følgende dokumentasjon [5]:

- Funksjonsbeskrivelse
- Romskjema/TAG-liste (teknisk hierarki) med minimum og maksimum luftmengde og kommentarer
- Topologiskjema
- Utfylt kontrollskjema
- SFP-målinger ved maksimum luftmengde og definert samtidighet
- Protokoll for samordnet funksjonskontroll (fullskalatest)
- FDV-datablader for komponenter

### **Funksjonsbeskrivelse**

En funksjonsbeskrivelse gjør rede for hvilke funksjoner som skal være implementert i anlegget, og hvordan det skal respondere på forskjellige signal. Anleggsdelenes funksjon i eventuelt forskjellige settinger skal være beskrevet her.

## **Romskjema/TAG-liste**

Et skjema med oversikt over alle rom eller områder der behov er listet opp. For et ventilasjonsanlegg innebærer dette å spesifisere krav til temperatur, luftmengde og luftkvalitet.

## **Topologiskjema**

Kommunikasjonsnivået i anlegget må komme tydelig frem. Beskrivelse av hvordan systemet henger sammen fra komponentnivå til automatisering via PLS opp til administrasjonsnivået.

## **Kontrollskjema**

Oversiktlig skjema som kan brukes som sjekklister ved kontroll av anlegget. Dette er viktig dokumentasjon ved fremtidige inspeksjoner.

## **SFP-målinger**

Specific Fan Power skal gi et bilde av hvor effektive viftene i anlegget er.

## **Fullskalatest**

Når anlegget er ferdigstilt og klart til å driftsettes må det gjennomføres en funksjonskontroll. Det bør ligge til grunn en protokoll som standardiserer prosedyrene for funksjonskontroll. Anlegget bør også testes under alle driftsforhold, for eksempel årstider. Funksjonskontrollen bør derfor gjentas.

## **FDV-datablader**

Datablader som beskriver Funksjon, Drift og Vedlikehold. All relevant informasjon som trengs for å drifte anlegget i form av gode beskrivelser og illustrasjoner. Kan sees på som anleggets “bruksanvisning”.

### **6.5.1 Sentral driftsovervåkning**

Et viktig aspekt som har kommet frem gjennom prosjektet er viktigheten av et SD-anlegg som er enkelt å navigere seg gjennom. Sentral Driftsovervåkning skal gjøre det mulig å overvåke og styre anlegget. Det bør være en lettfattelig fremstilling som gjør opplevelsen av brukergrensesnittet både god og informativ.

#### **Brukergrensesnitt**

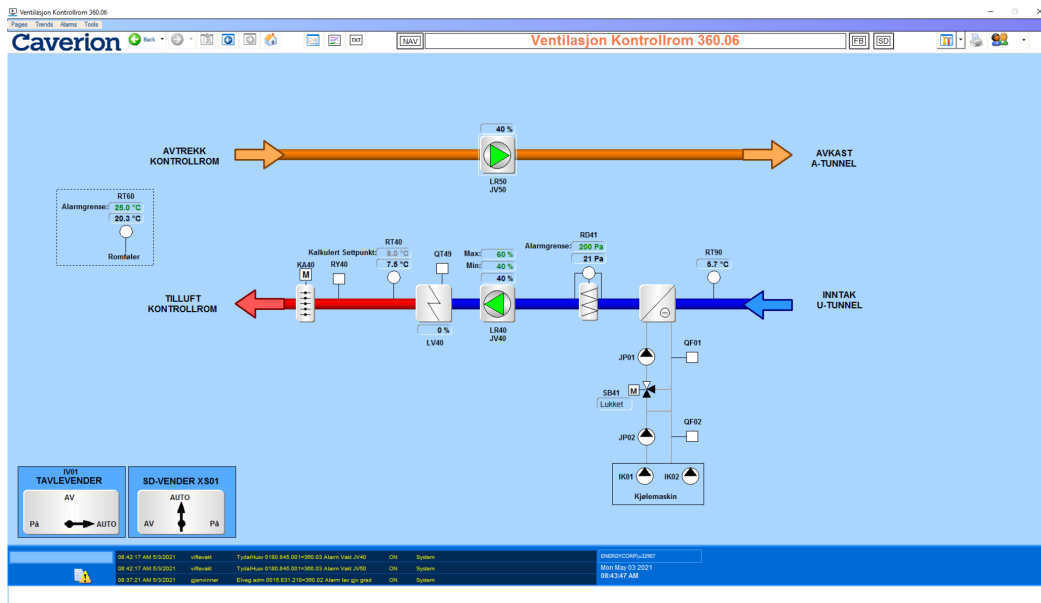
At det finnes en visuell fremstilling av hele ventilasjonsanlegget med kanaler og komponenter i et kontrollrom er en stor fordel. En presentasjon av måleverdier fra relevante områder og komponenter i anlegget vil bidra til å gi en enda bedre visuell oversikt.

I en slik prinsippsskisse bør det være målinger av parametere som temperatur, trykk, luftfuktighet og luftforurensning. I tillegg bør det fremkomme hvilken hastighet viftene kjører på og hvilken posisjon spjeld er i. Dette finnes allerede i en del kraftverk, men hos mange er det kun sanntidsdata som presenteres. En ønsket funksjon er at styringsenheten lagrer data i en viss periode slik at det kan hentes ut og analyseres. Historiske data kan hjelpe til med å optimalisere styringen av anlegget. Det vil være med på gi et godt bilde av hvilken påvirkning styringen har på de faktiske forholdene[11].

Behandling av feilmeldinger kan også være et viktig bidrag for å gjøre grensesnittet smidigere. Tilbakemeldinger fra Statkraft tyder på at signalfeil fra sensorer er et problem. Feil på sensorer kan oppstå som følge av at forholdene er for krevende, eller at de er for følsomme. Som følge av slike feil kan noen ventilasjonsanlegg stanse. Om en sensor får feilmelding eller alarm bør det ikke stanse anlegget automatisk. Dersom kraftverket er i drift uten ventilasjon vil det føre til mye større belastning på komponenter enn nødvendig. Det vil være mer hensiktsmessig om feilen blir sendt til driftssentral og analysert av personell før tiltak blir iverksatt.

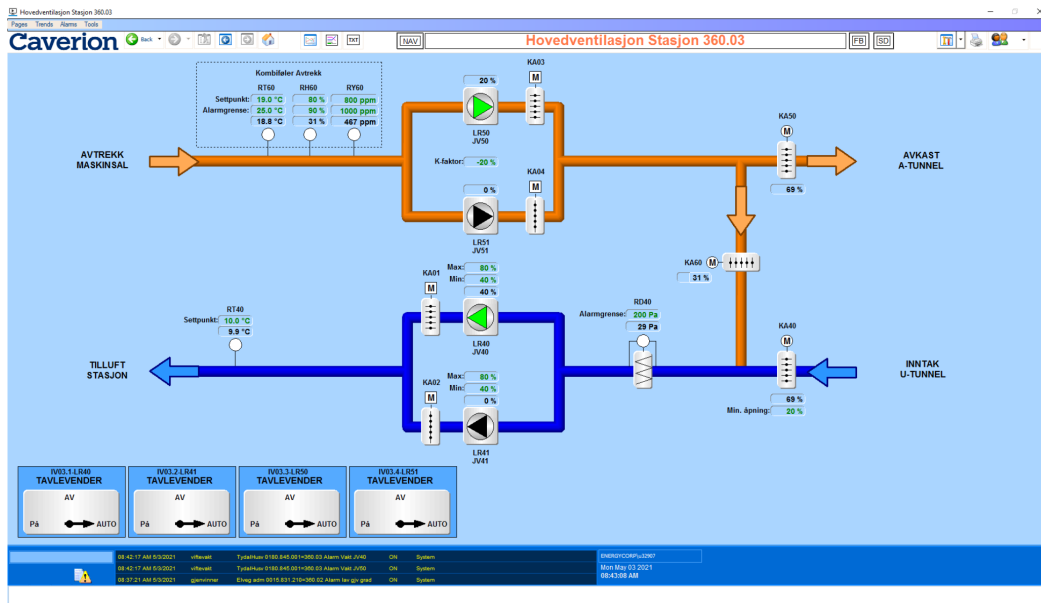
Dersom det av ulike årsaker ikke skulle være mulig å styre eller endre ventilasjonsanleggets karakteristikk fra kontrollrom bør det være alternativer. Desentralisert driftssentral kan med fordel ha de samme overvåkning- og kontrollmulighetene som lokalt i kontrollrommet til kraftstasjonen. Dette innebærer for eksempel alarmgrenser og settpunkt. Manuell styring av for eksempel vifter bør også være en mulighet. Da gjøres dette direkte på viftens frekvensomformer.





Figur 6.11 – Brukergrensesnittet til et av Statkraft sine eksisterende SD-anlegg for ventilasjon [54].

Figur 6.11 viser brukergrensesnittet til et SD-anlegg. I dette tilfellet vises ventilasjonsanlegget til kontrollrommet i et av Statkraft sine kraftverk. Her kommer det tydelig frem hvordan det er satt alarmgrenser, og øvre og nedre grenser på de forskjellige komponentene. Som et eksempel kan en se på filter *RD41*. Her måles trykkdifferanse over filter for å se om det er tett eller bør skiftes ut. Det vil gå en alarm dersom denne verdien overgår  $200 \text{ Pa}$ . Det samme gjelder alarmgrense for temperatur i rommet (*RT60*), der det vil gå en alarm ved temperaturer over  $25,0 \text{ °C}$ .



Figur 6.12 – Brukergrensesnittet til et av Statkraft sine eksisterende SD-anlegg for ventilasjon [54].

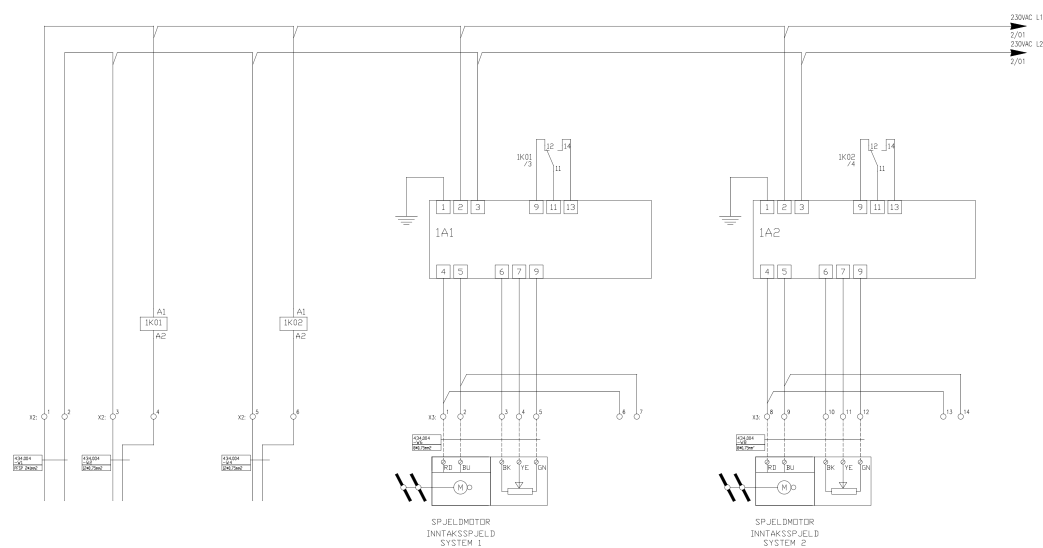
Her vises hovedventilasjonen til samme stasjon som i Figur 6.11. Her vises også alarmgrenser og settpunkt for de forskjellige komponentene samt hvordan forskjellige faktorer kan endres gjennom brukergrensesnittet. Spjeld kan for eksempel åpnes prosentvis, og også vifter har mulighet for styring etter prosent. Her vises det praksis som nevnt tidligere at hovedvifter står i parallell ved eventuelt stopp i drift. Backupviften skal derfor være prosjektert til å kunne driftes på 100 % slik som hovedviften.

### 6.5.2 Spjeldstyring

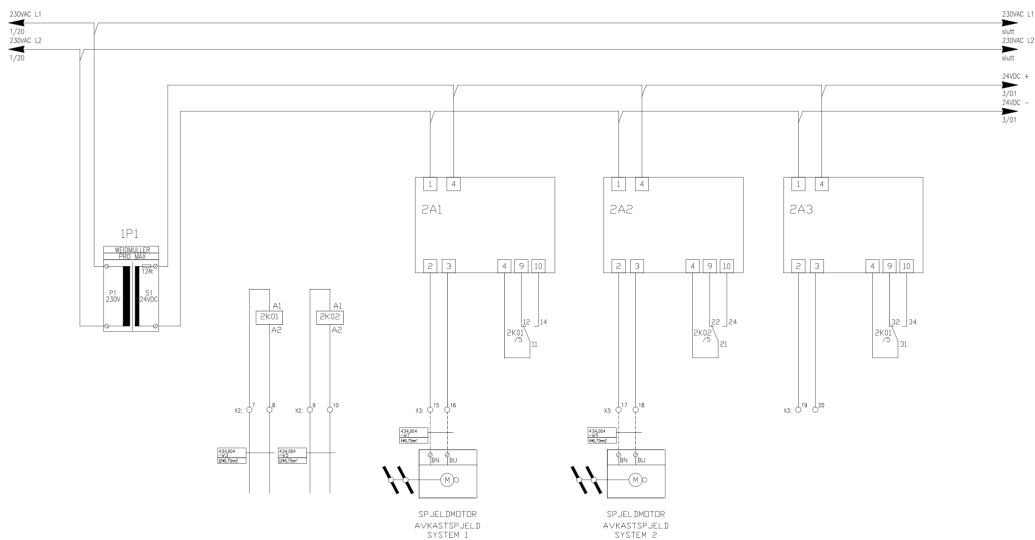
I ventilasjonsanlegget bør det være muligheter for spjeldstyring. Dette er for å gjøre det mulig å styre både luftmengde og vinkel på luftstrømmen. I tillegg sørger det for mulighet til å styre luften inn i forskjellige soner i stasjonen. Som nevnt tidligere brukes det to typer spjeld; dynamisk og statisk. I dette underkapittelet vises et eksempel på styrestrømsskjemaet til de dynamiske spjeldene i et av Statkraft sine eldre kraftverk, og hvordan disse styres ved hjelp av motorer.

## Trigging

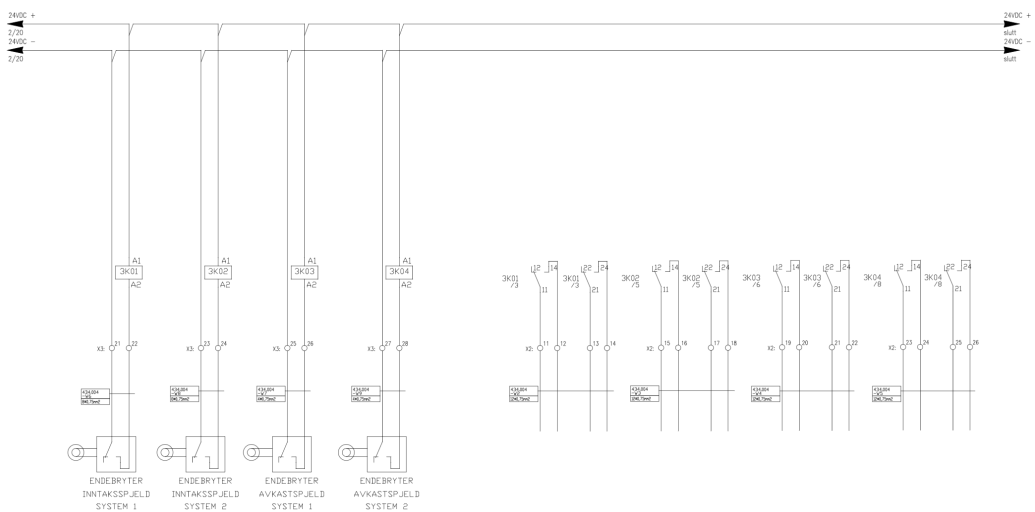
Relé for åpning av spjeld (1K01, 1K02, 2K01 og 2K02) vil trigge moduler for oppstart av motor. Da må det sendes startsignal fra vifter. Dette vil trigge moduler til oppstart av motorer. Ved full åpning av spjeld, vil endebrytere starte vifter. Startlampe for vifte vil lyse samtidig som stopplampen helt til spjeld er åpne (maks 30 sekunder), og vifter har startet ved start fra kontrollrom. Slukker ikke stopplampen har ikke kontaktor for vifte lagt inn enda. Det må da sjekkes om spjeld har åpnet og om endebryter er aktivert.



Figur 6.13 – Inntak og avkast spjeld [56].



Figur 6.14 – Ekstra spjeld for omluft [56].



Figur 6.15 – Sikkerhetsfunksjon for startvifte [56].

## 6.6 Geografi og årstider

Geografisk plassering og årstid er to vesentlige utfordringer knyttet til ventilasjon. En kraftstasjon plassert på Vestlandet hvor luften er fuktigere vil ha behov for andre ventilasjonsløsninger sammenlignet med en kraftstasjon i innlandet. I vinterhalvåret hvor luften er tørr og kald krever kraftstasjonen lite eller ingen avfukking før den

sendes inn i stasjonen. Sommerhalvåret kjennetegnes av varm og fuktig luft, da er det et større behov for avfukting. Disse faktorene gjør det utfordrende å lage en generell kravspesifikasjon for ventilasjon som passer alle.

## **Vinter**

Om vinteren kan temperaturen gjerne variere fra  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  opp til noen få varmegrader. Det åpenbare problemet med svært kald luft vil være ising i portalbygg og tunnel. Dette effektivt løses med varmebatterier. Ved de kaldeste temperaturene i området ned mot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bør luften varmes opp til minimum  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Å heve temperaturen på luften så mye krever store mengder energi. I tillegg vil det kreve et stort og kostbart varmebatteri. Statkraft løser derfor denne problematikken ved å reduserer tilført luftmengde. Viftehastigheten kjøres gjerne ned til  $< 50\%$  og i noen tilfeller helt ned til  $25\%$  [11].

Luften om vinteren er i stabile perioder både kald og tørr, og trekken føles frisk selv når kapasiteten kjøres ned en god del. Selv om tørr og kald luft i perioder tvinger kraftverket til å redusere luftmengde må det tas hensyn til lasten i nettet. Det er høyere energiforbruk på vinteren, og derfor kjøres kraftverket i gjennomsnitt med høyere last enn i sommerhalvåret. Generator og transformator blir derfor nødt til å kjøre på  $100\%$  av nominell belastning i perioder. Maskinenene opererer derfor med mindre marginer med tanke på overoppheting, som igjen stiller krav til ventilasjonsanlegget. Luftmengdene som skal inn i anlegget vil trolig måtte holdes relativt høye for å takle de høye tapene. Da vil det trolig bli nødvendig å installere store varmebatterier til tross for at det er en stor investering.

## **Sommer**

Om sommeren kan temperaturen variere fra noen få varmegrader helt opp til rundt  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Denne luften er gjerne mye fuktigere enn vinterluft. Kombinert med høyere temperatur, løses dette gjerne ved å kjøre ventilasjonen for fullt, gjerne  $100\%$ , noe som normalt også bedrer fuktighetsproblemet.

Det er en større utfordring å kjøle ned kraftstasjonen om sommeren. Spesielt i varme perioder med temperaturer over  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperaturen bør holdes så stabil som mulig. Derfor kan det være en mulighetene å installere et kjølebatteri ved

inntak/portalbygg. Dette er ikke en vanlig løsning per nå, men om det kan gjøre temperaturen på tilført luft mer stabil året rundt vil det være positivt. 15 °C er nevnt som et godt settpunkt på ønsket temperatur. Det vil legge til rette for stabile driftsforhold for maskiner. En annen fordel med stabil temperatur på rundt 15 °C er at temperaturdifferansen til råsprengt fjell i tunneler og sjakter ikke vil være så stor. Som følge av det vil kondens og fuktproblemer reduseres. [11].

## 6.7 Brannventilasjon

Ved brann og evakuering er det ønskelig at ventilasjonsanlegget kan bidra til å begrense skader eller gjøre evakuering enklere og tryggere. Et overordnet mål med brannventilasjon er å holde rømningsveier røykfrie. Det benyttes forskjellige prinsipper i brannsituasjon. Ole-Kristian Grøtnes i Trønderenergi har beskrevet at det vanligste i deres kraftverk er å enten benytte seg av *skorsteinseffekten* eller *dedikerte brannvifter*.

Flere kraftverk benytter seg i dag av et passivt prinsipp ved brann [55]. Det vil si at mekanisk ventilasjon ikke benyttes aktivt, men at den naturlige trekken i fjellanlegget brukes til å utnytte skorsteinseffekten. Ventilasjonsvifter vil da stoppes fullstendig. Ved brann vil skorsteinseffekten skape et undertrykk i anlegget fordi varm luft er lettere enn kald luft og stiger. Frisk luft vil derfor suges inn gjennom for eksempel adkomsttunnel, og varm røyk vil stige opp. Hvor sterk oppdriften blir, avhenger av høyden på den vertikale kanalen og temperaturdifferanse mellom inne- og utetemperatur. Ved høy vertikal kanal vil større termisk oppdrift oppnås på grunn av den store trykkdifferansen som oppstår. For at skorsteinseffekten kan utnyttes er det også en forutsetning at luften i stasjonen har høyere temperatur enn uteluften. Dersom uteluft har høyere temperatur enn inneluft vil skorsteinseffekten reverseres.

### Brannvifter

Formålet ved å bruke brannvifter er å manipulere luftstrømmen i kraftverket for å gjøre rømningsveier fri for røyk. For en rømningsvei er det ønskelig med trekk i motsatt retning av rømningsvei [55], for å sikre friskluft til personer på vei ut av stasjonen. En annen fordel er at redningsmannskap skal kunne komme seg enklere inn i stasjonen. I visse tilfeller kreves det derfor at luftstrømmen kan snus ved brann.

## **Brannspjeld**

Brannspjeld blir i liten grad benyttet. Erfaring tilsier at bruken av brannventilasjon med "Steng-ut prinsippet" ikke blir brukt på grunn av brannvarslingsanlegg og tilhørende sensorer som ikke er til å stole på. Det skyldes på feil med fin sensorteknikk som ikke takler forholdene inne i kraftstasjonen, slik som høy fuktighet. Dersom prinsippet skal benyttes må det kunne garanteres for at brannspjeld lukkes slik at ventilasjonen kan kjøres videre. Om ikke brannspjeld lukkes og ventilasjon går som vanlig, vil det kunne føre til raskere spredning av røyk og varme.

## **Erfaring og utførelse**

I "*Veiledning i brannvern i kraftforsyningen, NVE og DSB*", er det nevnt at uønskede utløsninger av brannalarm kan stanse ventilasjon av kraftverket. Etter samtaler med fagpersoner tilsier erfaringen at dette er en svært uønsket situasjon. Det bør derfor utredes muligheter for hvordan dette kan unngås. En mulighet er at alarmen må verifiseres av driftspersonell eller at flere relevante sensorer må utløse alarmsignal.

## **Tilgangen til brannventilasjon**

I fjellanlegg der luftstrømmen blir reversert ved hjelp av brannventilasjonsanlegg bør styretavler og flytskjema for dette anlegget være plassert slik at det er enkelt å få tilgang. Reversert luftstrøm blir gjerne tatt inn gjennom adkomsttunnel, og styretavle og skjema bør derfor være plassert her og i kontrollrommet.

## Beredskapsrom

Kraftstasjoner der det ikke finnes to uavhengige rømningsveier skal ha et beredskapsrom som kan benyttes ved nødsituasjon. Dette rommet skal utformes og ventileres på følgende måte:

Plassbehov	Gassluse	Ventilasjon
Min. 2 m <sup>2</sup> / per person.	I alle beredskapsrom.  Innvendige mål minimum: L x B = 2,5 x 1,5 m	Normalventilasjon: Min. 20 m <sup>3</sup> /time & person  Filterventilasjon: Min. 10 m <sup>3</sup> /time & person.

Figur 6.16 – Mål og luftmengde for beredskapsrom [57].

Om det ligger til rette for dette bør store kraftverk vurdere å anlegge to eller flere beredskapsrom. Plassering av rommet i kraftstasjonen bør bestemmes med tanke på plassering av transformatorer og koblingsanlegg, samt at det bør være enkelt å transportere skadede på bære inn til rommet.

Rommet skal være utformet som en egen branncelle og derfor også ha minst fire timers luftbeholdning per person rommet er dimensjonert for å romme. I tillegg bør det tas hensyn til lengde på adkomsttunnel, plassering i stasjonen og anslått tid før hjelpemannskap kan være til stede [39].



## 7 Beregningseksempel

Viser til eksempler med bakgrunn begrunnet i teori fra oppgaven.

### 7.1 Stasjonstransformator

Det finnes gjerne flere stasjonstransformatorer i tillegg til hovedtransformatoren i vannkraftverket. Stasjonstransformatoren skal forsyne stasjonen med energi til normalt forbruk, og skal transformere spenningen ned til 400 V. I dette eksempelet velges en transformator fra Legrand sin manual [41]. Transformator FH2A3ACBA er en tørrisolert 10/0.4 kV transformator med isolasjonsklasse 12 kV, og ytelse på 500 kVA. Tapene er oppgitt til:

- Tomgangstap  $P_0$ : 810 W
- Tap ved fullast  $P_k$  og referansetemperatur 120 °C : 5630 W

Bruker deretter ligningene forklart i kapittel 4.3.2. Tar utgangspunkt i 20 °C gjennomsnittlig omgivelsestemperatur og referansetemperatur 120 °C i transformatoren. Tar utgangspunkt i at denne står i et eget avlukke på 48 m<sup>3</sup> med dimensjoner 4x4x3 m.

Ser på kjøleluftbehovet ved hjelp av Legrand sin formel:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{TL}{1,15 \cdot dT} \\ &= \frac{5,63}{1,15 \cdot 15} \\ &= 0,326 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Gjør et overslag ved å se på varme fra konveksjon og stråling fra transformatoren [27]. Regner ut varme fra konveksjon med Formel 5.4, og strålevarme gitt ved:

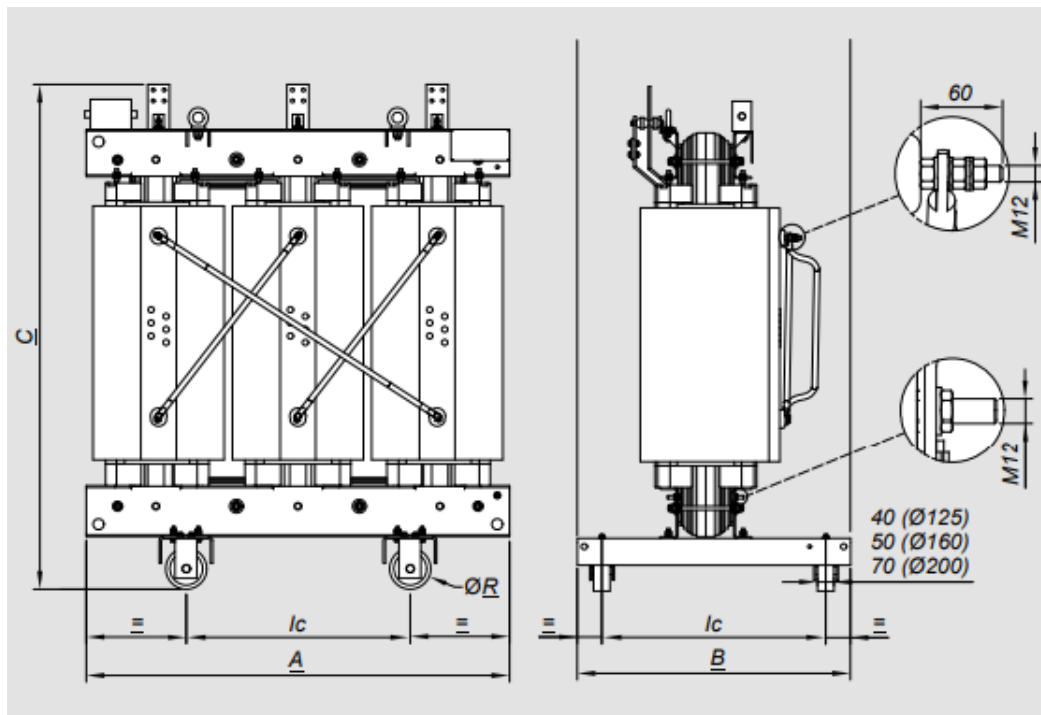
$$P = k \cdot A \cdot (T_1^4 - T_1^4) \quad (7.1)$$

- $P$  = Effekt avgitt i varmestråling [W]  
 $k$  = Varmestrålingskonstant [ $W/m^2 \cdot K^4$ ]  
 $A$  = Transformatorens overflateareal [ $m^2$ ]  
 $T_1$  = Overflatens absolutte temperatur [K]  
 $T_2$  = Absolutt temperatur på andre objekter [K]

Gjør et overslag på overflatetemperaturen til transformatoren basert på Legrand sin skisse og oppgitte mål. Følgende mål er oppgitt på transformatoren:

- Lengde: 1,45 m
- Bredde: 0,85 m, estimerer effektiv bredde på kroppen til 0,5 m
- Høyde: 1,70 m, estimerer effektiv høyde til 1,1 m

Estimerte mål er basert på Legrand sin skisse av transformatoren nedenfor.



Figur 7.1 – Skisse av Legrand tørrisolert transformator (Cast Resin Transformer) [41].

Estimert overflateareal blir:

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot (1,45 \cdot 1,10) + 2 \cdot (0,50 \cdot 1,10) + 2 \cdot (1,45 \cdot 0,50) \\ &= 5,64 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Varmestrålingskonstant hentes fra Electrical Machines Drives and Power Systems side 65 [27]. "Insulating materials" gir  $k = 5 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Omgivelsestemperatur settes til  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  som gir  $293,15 \text{ K}$ . Overflatetemperatur settes til overtemperatur på  $60 \text{ K}$  som gir  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $353,15 \text{ K}$ .

Regner ut varmen avgitt ved naturlig konveksjon:

$$\begin{aligned} P_{konv} &= 3 \cdot A \cdot (t_1 - t_2)^{1,25} \\ &= 3 \cdot 5,64 \cdot (353,15 - 293,15)^{1,25} \\ &= 2825,46 \text{ W} \end{aligned}$$

Ser deretter på strålevarmen:

$$\begin{aligned} P_{stråle} &= k \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 5 \cdot 10^{-8} \cdot 5,64 \cdot (353,15^4 - 293,15^4) \\ &= 2303,56 \text{ W} \end{aligned}$$

Totalt gir konveksjon og strålevarme et tap på:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= P_{konv} + P_{stråle} \\ &= 2825,46 + 2303,56 \\ &= 5129,02 \text{ W} \end{aligned}$$

Beregnet varmetap på 5129,02 W er ikke så langt unna Legrand sin oppgitte verdi på 5630 W. Antar derfor at oppgitte tap stemmer ganske bra.

Ved å bruke Formel 6.1 kan det gjøres et nytt estimat på behov for kjøleluftmengde. Deretter kan resultatet sammenlignes med Legrand sin anbefaling. Setter lufttemperaturen til 20 °C og avgitt temperatur til 35 °C for å oppnå en temperaturstigning på 15 °C.

$$\begin{aligned}V_a &= \frac{P}{1280(t_2 - t_1)} \\ &= \frac{5630}{1280(35 - 20)} \\ &= 0,293 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Det gir et litt lavere luftvolum enn Legrand sin formel gjør, men er ikke innenfor Legrand sin anbefaling på 3,5-4 m<sup>3</sup>/min. Med Legrand sin formel ble kjøleluftvolumet beregnet til 0,326 m<sup>3</sup>/s, som gir 19,56 m<sup>3</sup>/min, og 3,47 m<sup>3</sup>/min per kW tap. Kjøleluftmengden bør derfor justeres opp slik at den minst gir 3,5 m<sup>3</sup>/min

Dette gir 1173,6 m<sup>3</sup>/time og 24,45 luftskift per time i rommet. Ser så på nødvendig størrelse på friskluftventilen ved hjelp av Formel 4.2:

$$\begin{aligned}S &= \frac{10,752 \cdot TL}{\sqrt{H \cdot dT^3}} \\ &= \frac{10,725 \cdot 5,63}{\sqrt{2 \cdot 15^3}} \\ &= 0,737 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Arealet på avtrekket bør være 15 % større og blir derfor:

$$S' = 0,737 \cdot 1,15 = 0,848 \text{ m}^2$$

## 7.2 Avfukter

Viser til dimensjonering, og valg av avfukter med bakgrunn i teori fra oppgaven. Mange av metodene brukt på beregningene i eksempelet er hentet fra *Ventilasjon i kraftstasjoner* [4].

Utregningene baserer seg på en turbinkjeller med et volum på  $1600 \text{ m}^3$ , og en lufttemperatur på  $15^\circ\text{C}$ . I tillegg har den tilført luften et vanninnhold på  $9 \text{ g vann/kg luft}$ . En dimensjonering med den lufttemperaturen vil være et godt eksempel på avfuktingskapasiteten som trengs i en turbinkjeller under sommerhalvåret.

For å dimensjonere en avfukter må den nødvendige avfuktingskapasiteten til rommet regnes ut ved bruk av Formel 5.10:

Noen av funksjonens parametere som er kjente ved gitt temperatur:

- Luftens spesifikke varmekapasitet ( $c_p$ ) er  $1000 \text{ J/kg pr. } ^\circ\text{C}$
- Varmeovergangskoeffisienten ( $\alpha$ ) er ca.  $1,5 \text{ W/m}^2 \text{ pr. } ^\circ\text{C}$

Formelen kan omformes slik:

$$N_a = 5,4 \cdot A \cdot (x_1 - x_2) + \cdot Q_v \cdot \rho \cdot (x_3 - x_2)$$

### Fuktede flater

Ser bort fra overflatearealet på sugerørskonusen fordi den befinner seg i et separat rom, og påvirker ikke turbinetasjen noe særlig. Det er kun interessant å se på deler av tilløpsrør der overflaten har direkte kontakt med luften i rommet. I dette eksempelet har røret en lengde på  $5 \text{ m}$  og en radius på  $1 \text{ m}$ . Kraftstasjonen har to turbiner, og har derav to tilløpsrør. Størrelsen på hvert av rørene kan differere hvis det er forskjellige dimensjoner på turbinene. Går ut fra at de har lik størrelse i dette eksempelet. Radiusen til rør og kammer anslås som tilnærmet lik, og kan derfor ses på som én enhet. Regner så overflatearealet på enheten ved bruk av formel for arealet av den buede sideflaten i en sylinder:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 5 = 31,4 \text{ m}^2$$

## Luftmengde og relativ luftfuktighet

En turbinetasje og deler av et vannverk har mye til felles. Kalde rør, og at bygningen normalt ligger under bakken gjør fuktproblemet til en fellesfaktor. Vanntemperaturen er vanligvis 6-9 °C i et vannverk [58]. Antar at det samme gjelder for et kraftverk, og at overflatetemperaturen til tilløpsrørene er omtrent det samme. Duggpunktstemperaturen skal være lavere enn rørenes overflatetemperatur for å unngå kondens. Tabell 7.1 viser den største RH-verdien som er nødvendig for å hindre kondensdannelse ved forskjellige romtemperaturer. Den gjelder ved en vanntemperatur på 7°C.

Romtemperatur	°C	10	12	14	16	18	20
Max. RH-verdi, vann = 7°C	%RH	80	70	61	54	48	42

Tabell 7.1 – Max. RH-verdi for å unngå kondens [58].

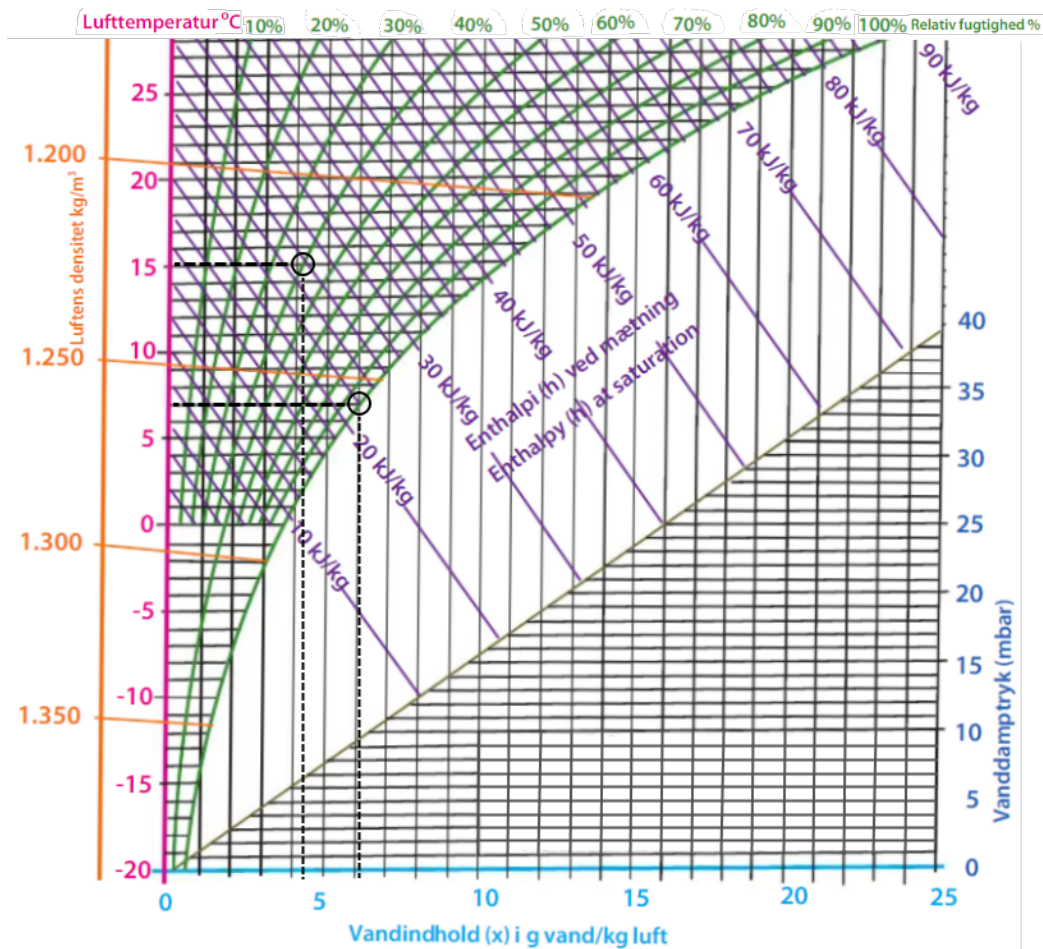
På grunn av beliggenheten og de kalde forholdene vil lufttemperaturen i en turbinkjeller sjeldent overgå 16-20°C. Ut ifra Tabell 7.1 kan det påstås at en relativ luftfuktighet under 40 % vil sørge for tørre forhold uten kondensdannelse.

Turbinetasjen er ofte ikke bemannet, som fører til minsket behov for luftskifte. Luftskifte kan være behovstyrt, manuelt, eller tidsbasert. Tar utgangspunkt i tidsbasert system med et luftskifte på  $n = 1,5$  pr. time. Utregningen for luftmengde blir som følger:

$$Q_v = V \cdot n = 1600 \cdot 1,5 = 2400m^3/t$$

## Luftens vanninnhold

I en turbinetasje er det tilløpsrøret og ventilkammeret som har fuktige flater. I eksempelet er det ønskelige å kondisjonere en lufttemperatur på 15°C og en relativ fuktighet på 40 % RH. Mollierdiagrammet benyttes i Figur 7.2 for å finne vanninnholdet i romluft og mett luft ved en vanntemperatur på 7°C. Figuren viser i tillegg luftens densitet som ligger på 1,2 kg/m<sup>3</sup> ved 15°C.



Figur 7.2 – Vanninnhold i romluft, og mettet luft ved en vanntemperatur på 7°C [15].

## Utregning

All data som trengs for å fullføre utregningen er:

$$A = 31,4 \text{ m}^2$$

$$Q_v = 2400 \text{ m}^3/\text{time}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$x_1 = 6,1 \text{ g vann/kg luft}$$

$$x_2 = 4,3 \text{ g vann/kg luft}$$

$$x_3 = 9 \text{ g vann/kg luft}$$

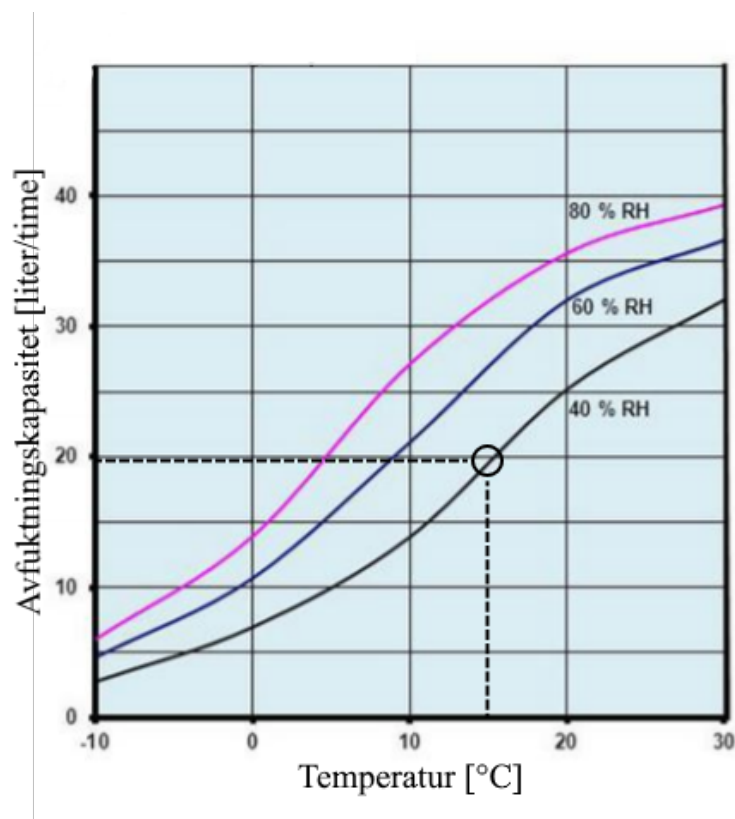
Plotter verdiene inn i formelen for nødvendig avfukningskapasitet:

$$\begin{aligned}
 N_a &= 5,4 \cdot 31,4 \cdot (6,1 - 4,3) + 2400 \cdot 1,2 \cdot (9 - 4,3) \\
 &= 13841 \text{ g vann/time} \\
 &= 13,84 \text{ liter/time}
 \end{aligned}$$

Figur 7.2 viser at duggpunkttemperaturen ved 15°C og 40 % RH er mellom 2-3°C. Overflatetemperaturen på tilløpsrørene må synke ned til duggpunkttemperaturen for at kondens skal danne seg på rørene.

### Anbefaling

En *Munters MX<sup>2</sup> 40* stasjonær avfukter ville vært anbefalt i dette eksempelet. Det er en stasjonær sorpsjonsavfukter med avfukningskapasitet på omtrent 20 liter/time ved 15°C/40 % RH, som vist i Figur 7.3. Det anbefales at hver avfukter utstyres med et hygroskop som instilles på ønsket verdi for relativ luftfuktighet. Det vil forsikre at avfukteren automatisk holder seg på riktig nivå.



Figur 7.3 – MX<sup>2</sup> 40 avfukningskapasitet [59].



## Forbehold

Det bemerkes at flere forkortelser er utført i dette eksempelet. For eksempel er ikke fuktangivelse fra mennesker eller andre prosesser tatt med i beregningene. I tillegg har noen kraftstasjoner en åpning over ventilkammeret som vist i Figur 7.4, der luftmengdene i turbinetasjen og etasjen over kobles sammen. I slike tilfeller vil volumet øke, som har en direkte påvirkning på nødvendig avfuktingskapasiteten.



Figur 7.4 – Ventilgrop Sima vannkraftverk [54].

Det kan argumenteres for at avfukteren er overdimensjonert. For det første er avfukterens avfuktingskapasitet ca.  $7 \text{ liter/time}$  mer enn den nødvendige. For det andre er oppgaven dimensjonert ut ifra en ønsket relativ luftfuktighet på 40 % RH. I praksis vil en ønsket relativ luftfuktighet på 50 % RH være mer realistisk, grunnet de lave temperaturene i turbinetasjen.

## 8 Referansebetegnelser og symbolikk

Standarder, referansebetegnelser og symbolikk er viktige i dokumentasjon av ventilasjonsanlegg. De neste underkapitlene tar for seg dette.

### 8.1 System for referansebetegnelser

Et praktisk og effektivt system for referansebetegnelser er viktig for å kunne organisere data i de forskjellige systemene og komponentene i et kraftverk. Ved å strukturere informasjon etter definerte regler blir det enklere å få oversikt. Posisjon, antall, størrelse, funksjon og eventuelle avvik kommer tydelig frem som et resultat av dette. Målet er å ha en felles informasjonsmodell som gjør det mulig å kommunisere mellom ulike sektorer og miljøer. For å oppnå dette må informasjonsmodellen være standardisert. Den må være internasjonal, og dekke ulike teknologisektorer for kraftproduksjon og forsyning. Sist men ikke minst er det viktig at den blir vedlikeholdt, oppdatert og brukt regelmessig. En standard som dekker alle overnevnte kravene er *IEC/ISO 81346*.

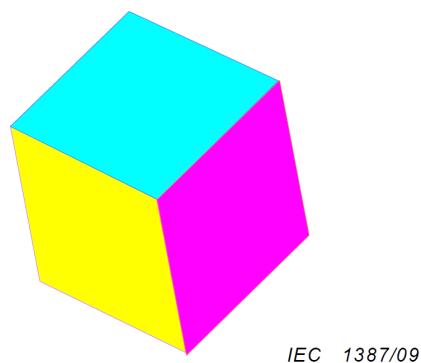
*IEC/ISO 81346* har følgende beskrivelse; *Industrielle systemer, installasjoner og utstyr/produkter – Struktureringsprinsipper og referansebetingelser – Del 1: Generelle krav*. Dette er en internasjonal standard som erstatter den gamle *NEK 321 Del 1: Generelle regler*.

#### **IEC/ISO 81346**

*IEC/ISO 81346* er standarden Statkraft mener bør være gjeldende for strukturingsprinsipper og referansebetegnelser. Det er både en ISO og IEC standard, som gjør den pålitelig. Standarden stammer fra *IEC 750* og følger BIM konseptet som handler om håndtering av store mengder informasjon i modelleringsprosesser. Hovedessensen er at systemene innad i prosessen skal ha en stabil struktur gjennom prosessyklusen. Standarden må i tillegg være fleksibel slik at den kan benyttes i alle kraftverk.

## Objekt og aspekter

Hvert eneste element som inngår i livssyklusen til et system er et objekt. Hvert objekt kan anses som en kube hvor overflaten på hver side representerer et aspekt. Figur 8.1 illustrerer dette.

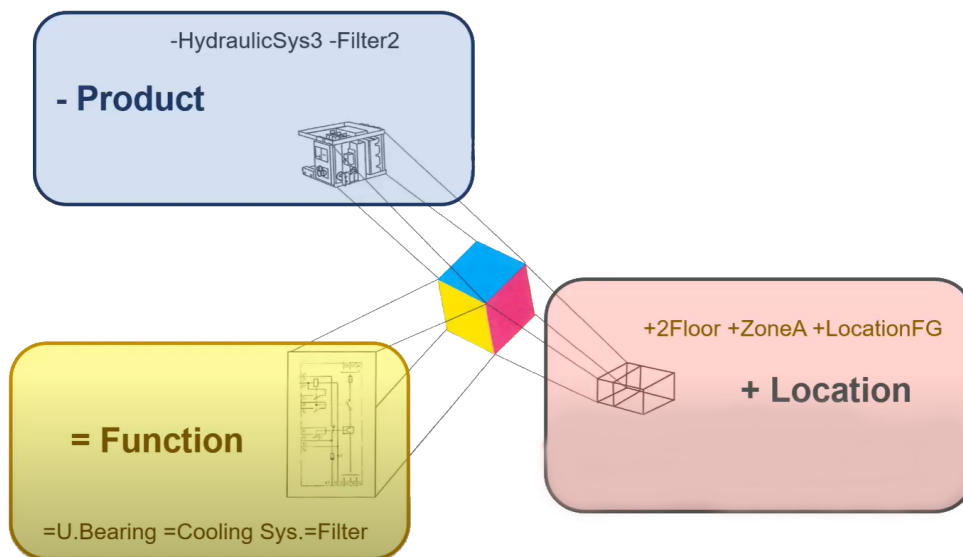


Figur 8.1 – Illustrasjon av et objekt [60].

Kjerneelementet til standarden er aspektene til et objekt. Aspektene forsøker å filtrere bort informasjon som ikke er relevant. *IEC/ISO 81346* tar for seg tre aspekter. De er som følger:

- Funksjon - Hva objektet skal gjøre
- Produkt - Hvordan objektet gjør det den er ment til
- Lokasjon - Tenkt eller faktisk plassering til objektet

Figur 8.2 viser aspektene av et objekt. Et system kan så struktureres innenfor et valgt aspekt. Standarden sier at ytterligere aspekter kan anvendes hvis de ovennevnte ikke er tilstrekkelige.



Figur 8.2 – Aspekter av et objekt [61].

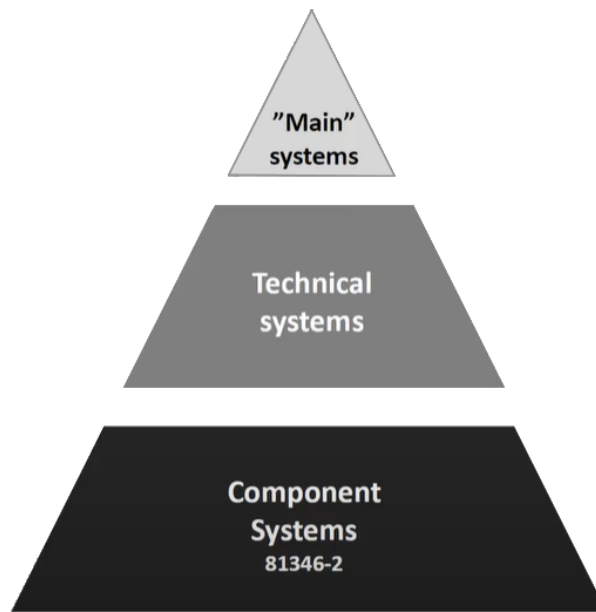
## Klasser

Det finnes tre kategorier som benyttes for å strukturere systemer, se Figur 8.3. “*Main*” systems omhandler de største enhetene i et anlegg. Eksempler på dette i et vannkraftverk er vannmagasinet, tilløpstunnelen, og hele det transformerende systemet.

*Technical systems* er det mellomstore nivået. Typiske systemer som plasseres i denne kategorien er turbiner, transformatorer og ventilasjonsanlegg. Det nederste nivået, *Component systems*, benyttes for alle resterende systemer eller komponenter, som for eksempel en ventil, pumpe eller et motorbelte.

*IEC/ISO 81346-2* brukes for komponentene innenfor denne kategoriene. Den er generisk, og har ikke tilhørighet til en industri eller område. Det betyr at standarden kan benyttes uavhengig av bransje, eller fagfelt.

”*Main*” systems og *Technical systems* er derimot avhengig av bransjen. *IEC/ISO 81346-10* handler om kraftforsyning. *IEC/ISO 81346-12* handler om byggverk. Et vannkraftverk må benytte seg av begge to for å gi korrekte betegnelser til alle systemene. Ventilasjonsanlegget forholder seg til *IEC/ISO 81346-12*.



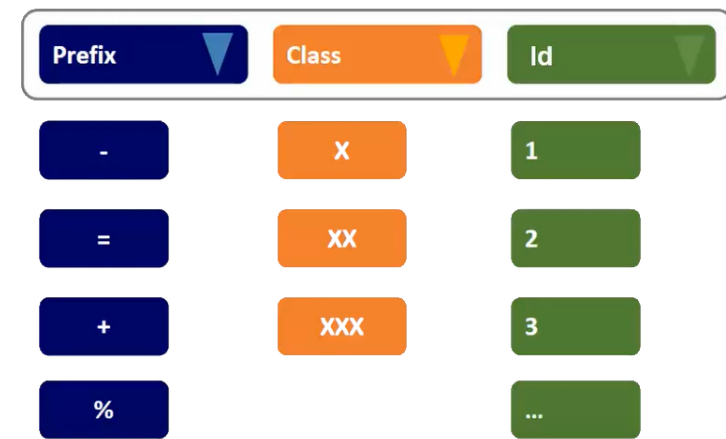
Figur 8.3 – Hierarkisk modell som viser hvordan kategorisere systemer [61].

## Oppsett

En referansebetegnelse bygges opp ved hjelp av en prefiks, en klasse, og en id. Figur 8.4 viser byggeklossene til en referansebetegnelse og hvordan de skal kobles sammen.

Prefiksen velges ut fra hvilket aspekt systemet skal struktureres innenfor. Se Figur 8.2 for hvilket symbol som passer til hvilket aspekt. Andre kolonne på Figur 8.4 viser klasser. I klassen bestemmes antall bokstaver referansebetegnelsen skal bestå av. Er den en del av *“Main” systems* skal den ha en bokstav. *Technical systems* skal ha to bokstaver, og *Component systems* skal ha tre. Deretter velges en id. Id'en skal ikke tillegges annen betydning enn at den skiller komponentene fra hverandre. En pumpe med id “4”, bør eksempelvis ikke være den fjerde pumpe i et system. Dette hindrer at pumpe får et særpreg som ikke er standardisert, og vil forenkle senere bruk.

Det finnes et fjerde aspekt kalt “type” aspektet. Ved bruk av dette aspektet konstrueres referansebetegnelsen likt som de andre. Eneste forskjellen er at numrene har mer informasjon knyttet til seg og har derfor betydning for referansebemerkningen. Aspektet beskriver hvilken type system det er snakk om. Hvilke bokstaver som skal brukes til hvilken klasse er ikke fastslått i standarden. Det er opp til hver bransje, land eller industri å informere om valg bokstaver.



Figur 8.4 – Modell som illustrerer hvordan oppsett på referansebetegnelser [61].

Når referansebetegnelser og systemer produseres, skal de kun forholde seg til et aspekt om gangen. Hvis funksjonsaspektet er utgangspunktet skal også systemet ende i samme aspekt. Det betyr ikke at et objekt ikke kan ha flere referansebetegnelssystemer. Den kan ha flere aspekter så lenge de holdes separat. Figur 8.5 viser én korrekt og én feil måte å strukturere referansebetegnelser. *A* viser korrekt struktur der aspektene holdes separat. I *B* blandes to aspekter sammen, og strukturen blir ikke entydig.

A.

+B1.AD4  
=K1.JK10.XDD2

B.

=K1 +B1=JK10+AD4=XDD2

Figur 8.5 – Eksempel på korrekt og ukorrekt referansebetegnelse

## Top Node

Referansebetegnelse opprettet hittil sier ingenting om hvor i verden systemet befinner seg. Har et kraftselskap en betydelig mengde med kragstasjoner vil det vært interessant å kunne differensiere mellom dem. Derfor benyttes “Top Node”.

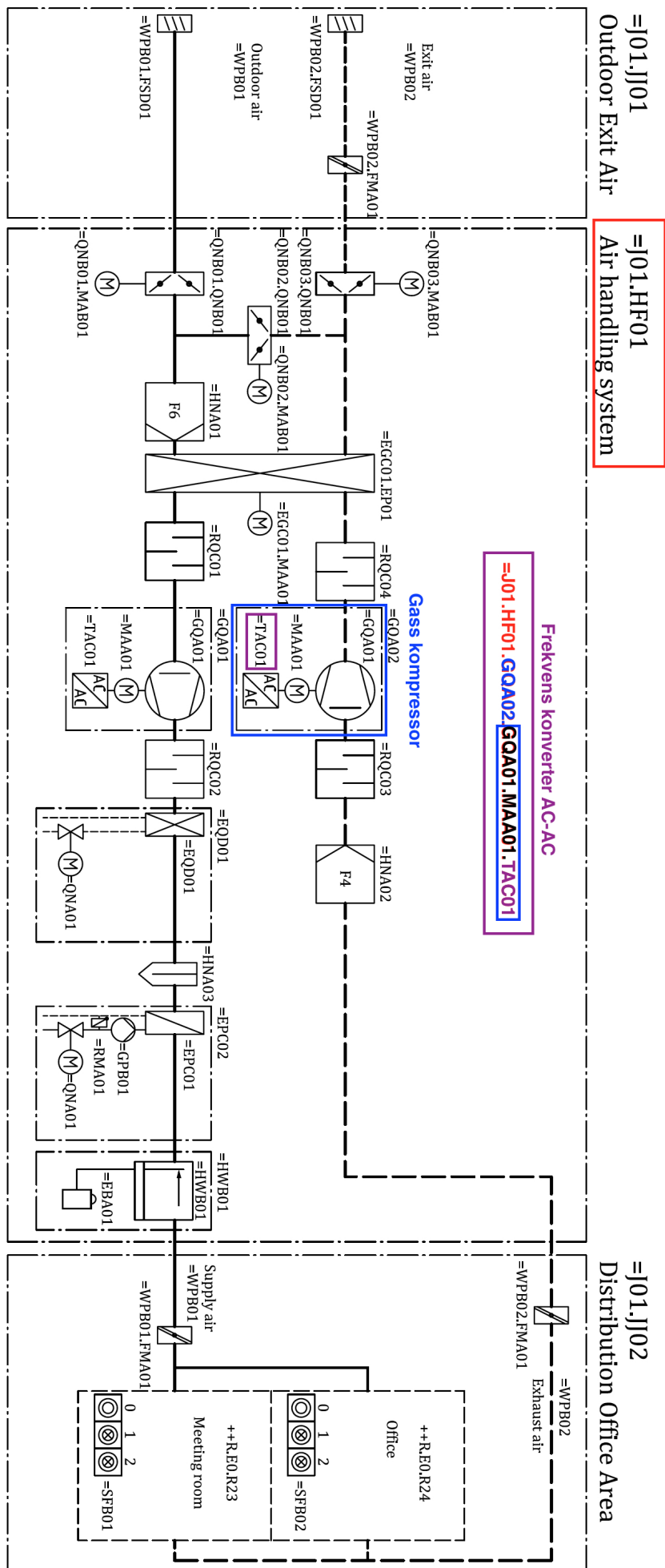
Top Node er en kode som skrives foran referansebetegnelser for å identifisere og differensiere mellom forskjellige systemer, og gi dem sin egenart. Det finnes ingen regler for innholdet i en Top Node. Den kan bestå av tall, bokstaver eller informasjon om stasjonen. Den eneste regelen er at den må skrives med ulikhetstegn på hver side. For eksempel:

< *Leirfossene.Kraftverk* >

## Eksempel

All informasjonen i dette eksemplet er hentet fra *IEC 81346-2* og *IEC 81346-12*. I eksemplet på Figur 8.6 demonstreres det hvordan komponentene i et ventilasjon merkes ved hjelp av *IEC 81346*;

- [=J01.HF01.GQA02.GQA01.MAA01.TAC01] Denne id-merkingen kan også oppgis fysisk på komponenten [TAC01]
- [=J01.HF01] - [HF01] Står for “*supply system for ventilation*” og tilhører [J01] som står for “*technical system which brings something from one place to another*”
- [GQA02] Referer til enheten, altså hele kompressoren med nummer “02”. Dermed er alt som kommer etterpå en del av kompressorsystemet [GQA02], som inneholder flere komponenter
- [GQA01.MAA01] Er oppgitt foran [TAC01] og forteller at frekvensomformeren hører til “*electric motor*” [MAA01] som igjen hører til “*gas compressor*”
- TAC01 Dette er en AC-AC frekvensomformer der “TAC” står for “*electric energy transforming object from AC to AC while changing frequency*”, med id “01”



Figur 8.6 – Grafisk prentasjon av klimaanlegg ved bruk av IEC 81346 [60].


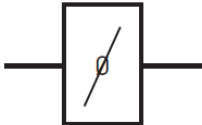

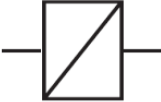



## Symbolikk

Grafiske fremstillinger i form av prinsippkisser er et godt hjelpemiddel for å få oversikt over systemet. På prinsippkisser brukes symboler som representerer forskjellige komponenter.

Symbolikk i el-dokumentasjon er standardisert gjennom standard, dette gjelder til dels også for ventilasjonstekniske komponenter. Det eksisterer en norsk standard, men ikke alle leverandører seg av denne. Optimalt burde dette også vært standardisert slik at misforståelser eller feilaktig dokumentasjon unngås. I tillegg vil en standardisering gjøre at kunnskap om symbolikk ikke forsvinner ut av bransjen når ressurspersoner forsvinner eller pensjonerer seg. Et universelt sett med symboler kjent for hele bransjen sikrer kvalitet og kontinuitet i dokumentasjon av ventilasjonsanlegg.

*NS-EN 12792* er en norsk standard som omfatter grafiske symboler for ventilasjon i bygninger. Nedenfor illustreres noen eksempler på hyppig brukte komponenter.

	Vifte
	Spjeld
	Filter
	Varmebatteri
	Kjølebatteri

Figur 8.7 – Hyppig brukte symboler [62].

## 9 Kostnader

I 2016 utga NVE en rapport om *Kostnadsgrunnlag for vannkraft* [38]. Denne rapporten tar utgangspunkt i det gjennomsnittlige kostnadsnivået i januar 2015, rapporten blir oppdatert i perioder på fem år og det kan ventes en nyere utgave i løpet av 2021. Denne rapporten er brukt som inspirasjon for dette kapittelet.

### 9.1 Kostnadsgrunnlaget av ventilasjonsanlegg

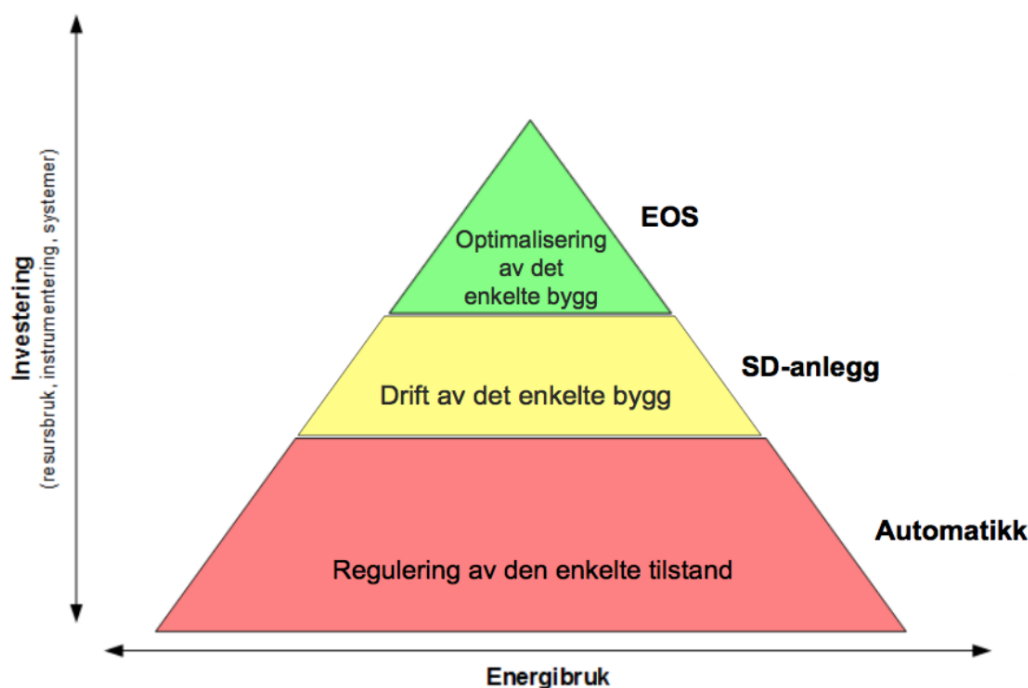
Kostnaden på ventilasjonsanlegget blir hovedsakelig påvirket av kategoriene gitt under:

- *Størrelse* - Luftmengde som trengs er avhenging av kraftstasjonens volum [ $m^3$ ] og areal [ $m^2$ ].
- *Lengde på adkomsttunnel* - Valg av lufttilførsel inn til stasjonen kan påvirke kostnadene, spesielt ved valg av ventilasjonskanal. Fordelene ved et slikt valg er beskrevet i underkapittel 6.1.
- *Beredskapsklasse* - På en stasjon tilhørende klasse 3, vil ventilasjonsanlegget være betegnet som en kritisk komponent i driften av kraftverket, dette bærer preg av kostnadene, som nevnt i kapittel 4.5.
- *Brannsikring* - Brannsikring av kraftverk kan variere fra stasjon til stasjon og kraftverkseieres behov. Sjokkspjeld, røykspjeld og isolasjon av ventilasjonskanalene står for bidrag til kostnadene.
- *Utstyr* - Varmeoverskudd fra utstyr som krever luftkjøling.
- *Kontrollanlegg* - Automatisering av ventilasjonsanlegget har i de seneste årene blitt veldig aktuelt for kraftverkseiere. Ønske om å kunne ha kontroll på ventilasjonen gir også avanserte styrings- og kommunikasjonssystemer mellom kontrollanlegget og målere for temperatur, fuktighet, trykk, avgasser m.m.

### 9.2 Energioppfølgingssystem

Energioppfølgingssystem - EOS, er et system for innsamling, rapportering, analyse og lagring av data av både inne- og utetemperatur. På denne måten kan kraftverksei-

ere samle data og se sammenheng mellom utetemperatur og forbrukernes mønster. Kraftverkseiere kan ha store fordeler av å optimalisere driften og analysere forbruket over tid. Å sjekke hvilke tiltak som er mest effektive for å sikre lavest energibruk er interessant.



Figur 9.1 – Optimalisering av SD-anlegg ved hjelp av EOS [5, s73].

Noen av fordelene med EOS [63]:

- *Redusere kostnader* - EOS kan brukes som et hjelpemiddel for å dokumentere gode og dårlige løsninger, og finne de mest optimale løsningene til hvert anlegg.
- *Oppdage feil* - Feil og driftsavvik oppdages raskere og ved et tidligere stadium. Små dagsavvik kan registreres og lokaliseres.
- *Datasamling* - Informasjonen fra lokale kraftverk kan samles, lagres og sammenlignes opp mot historiske data. Denne informasjonen kan også brukes til å visualisere og presentere data.
- *ENØK* - Muliggjør å kartlegge ENØK-tiltak uten store investering.
- *Øke kompetanse* - Driftspersonell kan få bedre innsyn i anleggets funksjoner og derfor bedre forståelse for selve driften.

- *Riktig dimensjonering* - Ved å sammenligne data fra forskjellige anlegg, rom og områder, vil det gi et bedre grunnlag for fremtidig investering og oppgradering av anlegg.

Implementering av EOS kan ha positiv innvirkning i fremtidige investeringer. Komponenter trenger for eksempel ikke overdimensjoneres dersom den optimale operasjonstemperaturen kartlegges og kan bli vedlikeholdt gjennom hele året.

### 9.3 Kraftverksbransjens investering

Et velfungerende ventilasjonsanlegg som tilfredsstillende de faktiske krav kan være en stor investering. Et ventilasjons/kjøleanlegg for kraftverk i fjell anslås av NVE å være på 3-8 millioner kroner. Mer spesifikt vil kostnaden være på mellom 200-275  $kr/m^3$  luft fra ventilasjonsanlegget [38]. Dette viser seg å være et område der mange forsøker å spare i stedet for å tenke fremover og se på det som en forbedring av arbeidsforholdene til maskinene inne i fjellet. Erfaring tilsier at det ofte er større og bedre ventilasjonsanlegg i utlandet, mens norske anlegg preges av innsparinger.

Om bransjen tør å investere mer i et anlegg som følger opp de krav som stilles vil det kunne gi avkastning på sikt. En komponent som lever lenge vil gi større avkastning enn en som må byttes ut etter “kort tid”. Utfordringen her kan være at det er flere forhold som påvirker levetiden. Å identifisere hva som gjør at en komponent lever i lang eller kort tid kan være vanskelig å analysere. Det er derfor ikke lett å si om grunnen til at en transformator holdt i 35 år er på grunn av eller på tross av kvaliteten på ventilasjonsanlegget.

Likevel råder det liten tvil om at tilstrekkelig kjøling og av utstyr med store tap har direkte sammenheng med levetid.

Et annet aspekt som berører behovet for tilstrekkelig ventilasjon er måten vannkraftverk blir dimensjonert i dag sammenlignet med før digitaliseringen. Komponenter som generator og transformator blir dimensjonert for de faktiske forhold i vannkraftverket. Det er ikke ønskelig at de skal være større og dyrere enn nødvendig, og derfor kan det også være mer følsomt for ujevn belastning og overlast. Tidligere ble slike dimensjoneringer gjort med mer manuelle metoder, der det var vanskeligere å gjøre like nøyaktige beregninger. Derfor var det vanligere å legge inn en liten margin for å forhindre underdimensjonering. Flere eldre maskiner er derfor litt overdimensjonert som gjør de mer robuste med tanke på overlast. Av den grunn kan det

antas at nyere anlegg er desto mer avhengig av et velfungerende ventilasjonsanlegg. Eldre maskiner med en grad av overdimensjonering vil kunne oppleves mer robuste og ikke ta like mye skade av overlast en periode. Tilstrekkelig ventilasjon bør derfor bli et enda viktigere fokusområde å investere i.

## 10 Refleksjonsnotat

Gjennomføringen av dette prosjektet har vært en utfordrende og nyttig erfaring for alle involverte. Ingen av studentene hadde gjennomført et prosjekt i denne størrelsesordenen tidligere.

I oppstartsfasen var det utfordrende å definere hva prosjektet skulle omfatte, og spesielt problemstillingen var vanskelig å definere. Ettersom gruppa heller ikke hadde kompetanse på ventilasjon ble det desto mer utfordrende. Alle gruppe medlemmene kjente ikke hverandre da prosjektet startet, og det fører til at flyten ikke var helt til stede til å begynne med.

Til tross for at alle var nødt til å jobbe hver for seg de første to månedene ble det etablert en god struktur på arbeidsmetodene. Møter ble avholdt morgen og ettermiddag for å avklare hva som skulle gjøres. I begynnelsen av mars ble det mulig å jobbe sammen på grupperom. Det gjorde det enklere å diskutere problemer og å hjelpe hverandre med generell forståelse. Etter påske ble det nok en gang umulig å jobbe på grupperom på grunn av Covid-19. Dessverre førte dette til redusert fremdrift i perioden. Den siste måneden av prosjektgjennomføringen var det vært veldig god kontinuitet på arbeidsmengdene, og prosjektet skøt fart.

Hver andre til tredje uke har møter med både intern og eksterne veiledere vært avholdt. Møter med eksterne personer er også avholdt, men det har vært utfordrende å oppnå kontakt med personer i andre bransjer. Dette kunne vært et viktig bidrag til mer relevant informasjon.

Totalt sett har det vært en lærerik periode, med mange nye tanker rundt både gruppedynamikk og prosjektarbeid. Sannsynligvis vil dette bli nyttig ved senere anledninger.

## 11 Diskusjon

Fokuset gjennom prosjektarbeidet har vært å samle inn erfaringer og forslag fortrinnsvis fra personer i Statkraft, men også andre bransjer. Kombinert med studier av fagstoff og litteratur har dette lagt grunnlaget for hva som er lagt frem i Del 2 av rapporten. Personene som har bidratt med sine tilbakemeldinger og meninger har lang fartstid i bransjen. Av den grunn anses de som troverdige kilder. Likevel bygger deler av denne rapporten på informasjon fra et relativt lite antall mennesker. Hvis denne rapporten brukes i videre arbeid bør det gjøres en vurdering med tanke på kvalitetssikring av informasjonen. Selv om prosjektgruppa har erfart at informantene fra Statkraft har vært samstemte i uttalelsene, er det ikke sikkert at det er unison enighet om dette i Statkraft eller bransjen generelt.

Likevel henger mange av disse erfaringene godt i hop med relevant teori på området. Om det er en tydelig link her, bør det ikke være forbundet med risiko å bruke informasjonen i rapporten eller spesifikasjonen.

Spesifikasjonen som er produsert er et direkte resultat av tilbakemeldinger fra fagpersoner. Det er ikke en fullstendig spesifikasjon som tar for seg alle aspekter for bygging eller oppgradering av ventilasjonsanlegg. Den beskriver ikke metoder for å dimensjonere anlegget, og er heller ikke fullstendig med tanke på beskrivelse av funksjonalitet. Det den derimot gjør er å strukturere den innhentede informasjonen i et kort og konkret dokument. Om en fullstendig spesifikasjon skulle vært produsert hadde dette blitt et veldig stort dokument med store mengder info. Målet var å lage en kort og konkret spesifikasjon der den innsamlede informasjonen ikke skulle drukne i andre

Det eksisterer allerede mye kunnskap om ventilasjonsanlegg i Statkraft. Problemet er at kunnskapen er spredt rundt hos forskjellige personer og miljøer. Selv om denne rapporten med tilhørende spesifikasjon ikke tar for seg alle aspekter ved prosjektering kan den fortsatt sees på som en nyttig samling av erfaringer. Kanskje er det også dette Statkraft trenger.

Noen få håndberegninger er lagt til i rapporten. Dette er enkle eksempler brukt for å demonstrere hvordan luftmengde og avfukting påvirker forholdene. Forenklingene som er gjort fører til at eksemplene ikke nødvendigvis er helt realistiske. Likevel viser det en praktisk anvendelse av teorien som er lagt frem. Det beviser også hvor stor forskjell både avfuktning og tilstrekkelig kjøling kan gjøre.

## 12 Konklusjon

Et kraftverk i fjellanlegg har stor utstrekning både areal- og romvolummessig. For at ventilasjonsanlegget skal tilfredsstille kravene som stilles, er det nødvendig å se på komponenter, eller områder isolert for å identifisere tiltak. Spesifikke deler av vannkraftverket stiller spesielle og særskilte krav til ventilasjonen, og det er disse som må være utgangspunktet for prosjekteringen.

Å definere eksakt hva som må spesifiseres for å bygge et godt ventilasjonsanlegg i vannkraftverk er vanskelig. Det er derimot helt sikkert at en god behovsanalyse må ligge til grunn for å svare på spørsmålet. Alle muligheter skal vurderes og løsningene som må til for å dekke behovene må klekkes ut.

For at luften inne i kraftverket skal være av god kvalitet er halve jobben å transportere luften inn i stasjonen. Å legge til rette for gode løsninger ved inntak i hovedport og videre inn i tunnel legger grunnlaget for luftkvaliteten i stasjonen. Avhengig av kraftverkets utforming bør spesialtilpassede løsninger implementeres for å hindre transport av fukt inn i stasjonen. En god løsning vil også hindre ising og kondens i kanaler, tunneller og sjakter.

Det er også prekärt at ventilasjonsanlegget er robust. Driftssikkerhet oppnås ved hjelp av solide komponenter og redundans der det trengs, og spesielt for kritiske komponenter som selve aggregatene. Kontrollanlegget/SD-anlegget spiller også en viktig rolle ved at systemet må takle og filtrere ut feilmeldinger som ikke er vesentlige for driften.

Behovsstyrte ventilasjonsanlegg er fortsatt ikke vanlig, selv i nyere kraftverk. Tas det i bruk, kan det hjelpe til med å gi vannkraftverket nødvendig kjøling og avfuktning i alle driftssituasjoner. Nødvendige justeringer i driftsmodus gir kraftverket gode forutsetninger for å slite minst mulig på viktige komponenter. I fremtiden vil sannsynligvis autonome ventilasjonsanlegg bli et krav for å drifte kraftverk mer bærekraftig og økonomisk. Derfor burde kraftverkseiere allerede nå vurdere mulighetene for dette, selv om investeringen kan virke stor.

Kompetanse eller grunnleggende forståelse av fuktproblemer og forståelsen av hva fuktkontroll har å si for gode installasjoner er manglende. Ofte blir det beskrevet for smått eller feil utstyr, og det fører bare til at byggherrer kan miste tillit til



bransjen. Det hjelper lite å bruke billig/feil utstyr når man ikke løser oppgaven, og derfor er det så viktig å se på forutsetninger og gjennomføre en analyse.

For at komponentene i Statkraft sine vannkraftverk skal oppnå prosjektert levetid eller mer, må ventilasjonen tilpasses særpregene i hvert enkelt kraftverk. Det må kartlegges hva slags muligheter som er tilgjengelig, og hva som krever ekstra hensyn. Dette er avgjørende for størrelse og utforming av ventilasjonsanleggene. Å kun se på areal og romvolum inne i stasjonen sier lite om kravene som faktisk stilles. En litt større investering vil føre til større avkastning i framtiden dersom prosjekteringen tar slike hensyn.

## Referanser

- [1] *Vannkraft*. u.å. URL: <https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vannkraft/> (sjekket 23.04.2021).
- [2] Arbeidstilsynet. *Krav til ventilasjon*. Dokumentasjon. 2021. URL: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/byggesak/veiledning-til-dokumentasjonskrav-ved-soknad-om-arbeidstilsynets-samtykke/krav-til-ventilasjon/>.
- [3] Direktoratet for byggkvalitet. *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Tekniske krav. 2017. URL: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [4] *Ventilasjon i kraftstasjoner*. Energiforsyningens fellesorganisasjon, 1994.
- [5] C. Nystad. *Kompendium i Ventilasjonsteknikk*. Mastergradsoppgave. 2017. URL: <https://munin.uit.no/handle/10037/12979>.
- [6] Bedre-inneklima. *Hvordan velge riktig avfukter*. URL: <https://bedre-inneklima.no/butikk/blogg/hvordan-velge-riktig-velge-avfukter-garasje>. (sjekket 14.05.2021).
- [7] *What is a Condensation Dehumidifier?* URL: <https://www.condair.rs/know-how/condensation-dehumidifier> (sjekket 28.04.2021).
- [8] *CDT 90*. URL: <https://www.danthermgroup.com/en-gb/products/dantherm-cdt-90> (sjekket 29.04.2021).
- [9] *ML420*. URL: <https://www.munters.com/en/munters/products/dehumidifiers/ml420/> (sjekket 29.04.2021).
- [10] Micro Matic. *Brannsikkerhet i ventilasjonsanlegg*. URL: <https://www.micromatic.no/smarte-losninger/yrkesbygg/brannsikkerhet/2021-04-12>.
- [11] Vidar Lenningsvik. Personlig kommunikasjon og møter. 2021.
- [12] Norsk forening for fjellsprenningsteknikk. *Arbeidsmiljø under jord*. Håndbok. 2015. URL: <https://nff.no/publikasjoner/handboker/>.
- [13] Statens Strålevern. *Måling av radon i inneluft og undersøkelser av byggegrunn*. Rapport. 1996. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/016/30016045.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/016/30016045.pdf).
- [14] *ventilasjon*. 2018. URL: <https://snl.no/ventilasjon>.

- [15] *Mollierdiagram (HX)*. 2018. URL: [https://www.dantherm.com/media/2352548/hx-diagram\\_web\\_2018.pdf](https://www.dantherm.com/media/2352548/hx-diagram_web_2018.pdf).
- [16] Linda Haugvaldstad. *Lysebotn II kraftverk*. URL: <https://www.sintef.no/contentassets/3b7ed7e2088a4cfc841b9392fcbab051/lysebotn-ii.pdf>. (sjekket 14.05.2021).
- [17] Casper Vogt-Svendsen. *Turbiner*. Elforlaget, Norges Entreprenørforbund, 2000.
- [18] Voith Siemens Hydro Power Generation. *S vs pelton schnitt 1 zoom*. 2005. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/S\\_vs\\_pelton\\_schnitt\\_1\\_zoom.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/S_vs_pelton_schnitt_1_zoom.png) (sjekket 09.05.2021).
- [19] Siegele Roland. *Kartell Kraftwerk, Pelton Turbine*. 2005. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Kartell\\_Kraftwerk%2C\\_Pelton\\_Turbine.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Kartell_Kraftwerk%2C_Pelton_Turbine.jpg) (sjekket 09.03.2021).
- [20] *Francisturbin*. 2015. URL: <https://geminino.no/2015/04/hvorfor-sprekker-vannturbinene/> (sjekket 14.05.2021).
- [21] Friedrich Böhringer. *Vannturbin*. 2007. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/VKW\\_Andelsbuch3.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/VKW_Andelsbuch3.JPG) (sjekket 09.03.2021).
- [22] RenewablesFirst. *Kaplan Turbines*. u.å. URL: <https://www.renewablesfirst.co.uk/wp-content/uploads/Kaplan-turbine-blade-position-diagram-e1359120254295.gif> (sjekket 09.03.2021).
- [23] U.S. Army Corps of Engineers. *Water turbine (en 2).svg*. 2012. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Water\\_turbine\\_%28en\\_2%29.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Water_turbine_%28en_2%29.svg) (sjekket 14.05.2021).
- [24] NVE. “Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk”. I: (2003). URL: [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2003/veileder2003\\_02.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2003/veileder2003_02.pdf) (sjekket 19.04.2021).
- [25] Nidec. *Rotation Principle of Induction Motor*. 2021. URL: <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00026/>.
- [26] emadrlc.blogspot. “ACgenerators”. I: (2013). URL: <http://emadrlc.blogspot.com/2013/01/chapter-2-ac-generators.html> (sjekket 22.04.2021).

- [27] Théodore Wildi. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. Pearson, 2006.
- [28] Statnett. *Fosweb: Data for produksjonsanlegg –vann-og varmekraftaggregater –parameterveileder*. World Bank Policy Research Working Paper. Statnett, 2017-09. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/systemansvaret/fosweb/fosweb---data-for-produksjonsanlegg---vann--og-varmekraftaggregater---parameterveileder.pdf>.
- [29] usna.edu. “AC SYNCHRONOUS GENERATORS”. I: (). URL: <https://www.usna.edu/EE/ee301/supplements/AC%20Generators%20Supplement%20I.pdf> (sjekket 26.04.2021).
- [30] Ronny Steine. *Vurdering av potensialet for tilstandsovervåking ved Jøssang Kraftverk*. 2016. URL: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2412471> (sjekket 26.04.2021).
- [31] NEK. *Roterende elektriske maskiner Del 18-31: Vurdering av isolasjonssystemers virkemåte Prøveprosedyrer for formspunnede viklinger Termisk vurdering og klassifisering av isolasjonssystemer benyttet i roterende maskiner*. World Bank Policy Research Working Paper. NORSK ELEKTROTEKNISK KOMITE, 2012-08. URL: <https://www.standard.no/>.
- [32] NEK. *Roterende elektriske maskiner Del 18-31: Vurdering av isolasjonssystemers virkemåte Prøveprosedyrer for formspunnede viklinger Termisk vurdering og klassifisering av isolasjonssystemer benyttet i roterende maskiner*. World Bank Policy Research Working Paper. NORSK ELEKTROTEKNISK KOMITE, 2012-08. URL: <https://www.standard.no/>.
- [33] S. P. Carfagn R. J. Gibson. *A Review of Equipment Aging Theory and Technology*. Tekn. rapp. Franklin Research Center, 1980. URL: <https://www.osti.gov/biblio/5032834> (sjekket 12.05.2021).
- [34] *Cooling of a Synchronous Generator*. u.å. URL: <https://circuitglobe.com/cooling-of-synchronous-generator.html> (sjekket 02.05.2021).
- [35] *Water-cooled Generators*. u.å. URL: [https://www.mitsubishielectric.com/eig/energysystems/products/pg/generator/index\\_03.html](https://www.mitsubishielectric.com/eig/energysystems/products/pg/generator/index_03.html) (sjekket 16.05.2021).
- [36] *Ventilation system of turbine generator*. 2009. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-the-world's-largest-hydrogen->

- cooled-Nagakura-Otaka/e0b3b018c1bd0821b4f0277ea51dedb42f43f191/figure/0 (sjekket 16.05.2021).
- [37] Constant314. *Ideal Transformar*. 2014. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bd/Ideal\\_Transformar.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bd/Ideal_Transformar.png) (sjekket 29.03.2021).
- [38] Norconsult. *Kostnadsgrunnlag for Vannkraft*. 2015. URL: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_46.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_46.pdf) (sjekket 29.04.2021).
- [39] DSB. *Temaveiledning brannvern i kraftforsyningen*. 2003. URL: <https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/elsikkerhet-els/temaveiledning-om-brannvern-i-kraftforsyningen.pdf> (sjekket 27.04.2021).
- [40] *DMM 86-531 Gießharz-Trockentransformator*. 2011. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/DMM\\_86-531\\_Gie%C3%9Fharz-Trockentransformator.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/DMM_86-531_Gie%C3%9Fharz-Trockentransformator.jpg) (sjekket 16.05.2021).
- [41] Legrand. *Cast Resin Transformers*. 2016, s. 21–23.
- [42] Safet Trto. Personlig kommunikasjon og møter. 2021.
- [43] NVE. *VEILEDNING KRAFTBEREDSKAPSFORSKRIFTEN*. 2013. URL: <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/beb22d52-a557-414a-a676-5867f55de775/202017038/3390050>.
- [44] K. Hofstad. *Elektrisk effekt*. URL: [https://snl.no/elektrisk\\_effekt](https://snl.no/elektrisk_effekt) (sjekket 01.03.2021).
- [45] H. J. Mellbye TE. Westgaard A. K. Enger. *Electrical Equipment : Hydro-power Development vol. 13*. 1994.
- [46] *College Physics, uiowa.edu*. 2021. URL: <https://pressbooks.uiowa.edu/clonedbook/chapter/resistance-and-resistivity/> (sjekket 08.03.2021).
- [47] Robert L. Boylestad. *Introductory Curcuit Analysis*. Pearson Education Limited, 2016.
- [48] IEC. *Electrical insulating materials –Thermal endurance properties –Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*. IEC 60216-1. IEC, 2013-03. URL: <https://www.standard.no/>.
- [49] *Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review*. 2014. URL: <https://res.mdpi.com/sensors/>

- sensors-14-07881/article\_deploy/sensors-14-07881.pdf (sjekket 17.03.2021).
- [50] Reza Soltani, Eric David, Laurent Lamarre og Luc Lafortune. *Effect of Humidity on Charge and Discharge Current of Large Rotating Machines Bar Insulation*. 2008. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4570361> (sjekket 29.04.2021).
- [51] *Ventilasjon i kraftverk*. Notat mottatt gjennom Statkraft. 2000.
- [52] Lawrence Berkeley National Laboratory Resource Dynamics Corporation. *Improving Fan System Performance - A Sourcebook for Industry*. Tekn. rapp. U.S. Department of Energy Energy Efficiency, Renewable Energy Air Movement og Control Association International, Inc., 2003. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/29166.pdf> (sjekket 15.05.2021).
- [53] J. Schonek. *Energy efficiency: benefits of variable speed control in pumps, fans and compressors*. Tekn. rapp. Cahiers Techniques, 2008.
- [54] Edvin Johannessen. Personlig kommunikasjon og møter. 2021.
- [55] Ole-Kristian Grøtnes. Personlig kommunikasjon og møter. 2021.
- [56] Teleklima. 2018.
- [57] NVE. *Veiledning til forskrift om forebyggende sikkerhet og beredskap i energiforsyningen*. 2013. URL: [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2013/veileder2013\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2013/veileder2013_01.pdf) (sjekket 27.04.2021).
- [58] Dantherm Group. *SELECTION GUIDE FOR MOBILE AFFUGTERE*. URL: [https://www.dantherm.com/media/1825848/mobil-affugter-cdt-selection-guide.pdf?fbclid=IwAR1L1\\_scyuhrLS4oyDK0k04QQ6nfMmLZylvkDotKojoupcjXBWkYa2ncoM](https://www.dantherm.com/media/1825848/mobil-affugter-cdt-selection-guide.pdf?fbclid=IwAR1L1_scyuhrLS4oyDK0k04QQ6nfMmLZylvkDotKojoupcjXBWkYa2ncoM) (sjekket 14.05.2021).
- [59] Munters. *MX<sup>2</sup> 40 Avfuktare*. URL: <https://therisingsea.org/notes/FoundationsForCategoryTheory.pdf> (sjekket 10.05.2021).
- [60] NS-ISO. *Industrielle systemer, installasjoner og utstyr/produkter - Struktureringsprinsipper og referansebetingelser*. Elektroteknisk norm. 2018. URL: <https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=81346>.
- [61] Erik Wiborg. *Part 2 Basics - ISO/IEC 81346 RDS for Hydro Power*. Youtube. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9eCpjBqS1pc> (sjekket 05.05.2021).

- [62] Norsk Standard. *ns-en 12792*. Standard. 2003. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=137329>.
- [63] Ronny Steine. *Energioppfølging i næringsbygg*. Tekniske krav. 2004. URL: <https://www.enova.no/kunnskap/eos/> (sjekket 26.04.2021).

## **13 Vedlegg**

### **13.1 Vedlegg 1 – Artikkel**

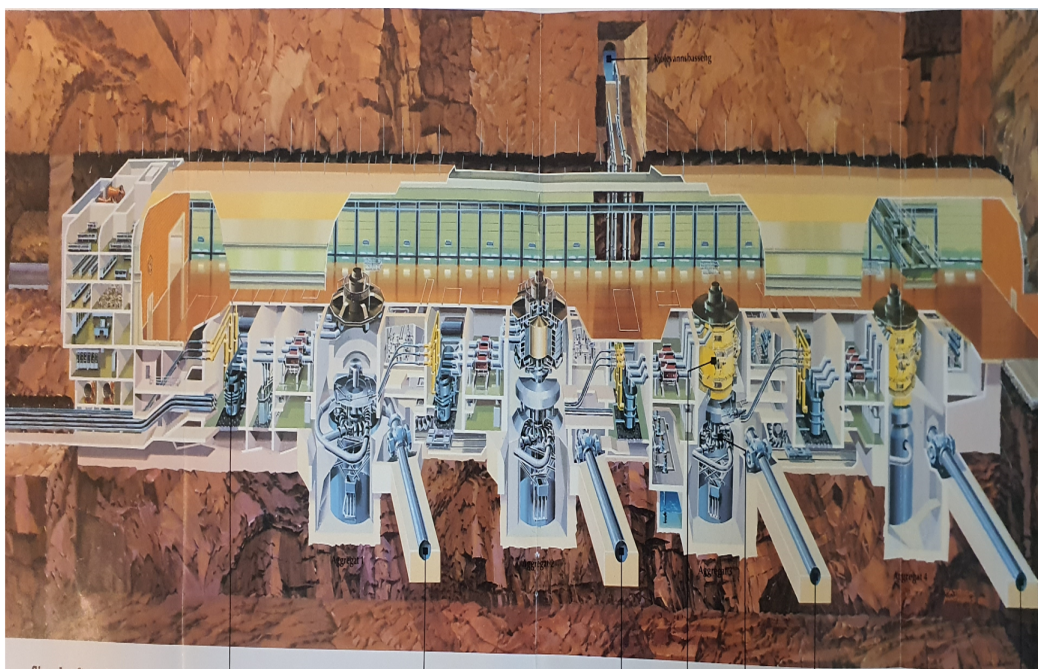
### **13.2 Vedlegg 2 – Kravspesifikasjon**



# Ventilasjonsanlegg i vannkraftverk

I Norge sitter vi på en utømmelig kilde til kraft i form av store fjellområder med vannressurser. Det er vannkraftverkene som gjør jobben med å omforme ressursene til elektrisk energi. Noen kraftverk ligger åpenlyst ute i dagen, men mange av dem har nok ikke folk flest enst engang. Disse kraftverkene ligger gjemt langt inne i fjellet og produserer strøm slik at vi kan leve uten å tenke på hvor energien kommer fra. Men hvordan opprettholdes driftsforholdene til de elektriske maskinene så langt inne i fjellet?

En gruppe studenter har på oppdrag fra Statkraft fått i oppgave å se nærmere på temaet. Hvordan kan et ventilasjonsanlegg hjelpe til med å lage gode forutsetninger for kraftproduksjon inne i fjellet.



**Bilde 1:** Prinsippskisse av et vannkraftverk

Rapporten har tatt for seg vannkraftverk i fjellanlegg og sett på hvordan ventilasjonsanlegget kan bidra til gode driftsforhold. Det viser seg at alle vannkraftverk har sine egne særpreg og at det derfor ikke finnes noen standard metode for bygge slike anlegg. Rapporten viser til at dersom ventilasjonsanlegget skal legge til rette for gode driftsforhold må forskjellige løsninger vurderes. Noen kraftverk er to kilometer inne i fjellet, andre bare et par hundre meter. Er det kun én tunnel inn, eller er det flere? Slike variasjoner avgjør hvordan luften skal hentes inn i anlegget.

Deretter må særskilte krav til kjøling, varme og avfukting kartlegges og planlegges. Samlet sett utgjør alle disse behovene det totale luft-, kjøle- og varmebehovet til kraftverket.

Kraftverket sin oppgave er å gjøre om vannets potensielle energi til elektrisk energi som kan benyttes av oss forbrukere. Vannet setter fart på turbinen som driver generatoren rundt. Generatoren er maskinen som omgjør mekanisk energi til elektrisk energi. Den elektriske energien føres så i kabler over til en transformator som er koblet til høyspentnettet ute.

Uavhengig av om vannkraftverket er bygget inn i fjellet eller ikke, vil det i tillegg til å produsere elektrisk energi generere mye varme. Ingen av komponentene er helt perfekte, de taper hele tiden litt av energien. Alt energitapet frigis i form av varme inne i kraftstasjonen. Problemet med varme er at aldringen til elektriske maskiner skyter fart når de er plassert i omgivelser med høy temperatur. Kombinert med mer eller mindre fuktig luft og kondens kan dette føre til at elektriske komponenter får kortere levetid enn planlagt.



**Bilde 2:** Maskinsal i vannkraftverk

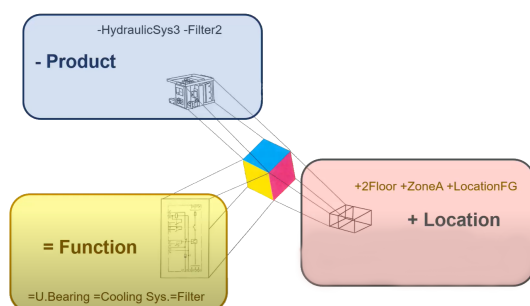
Rapporten legger frem kjente problemer fra bransjen og forklarer hvorfor det skjer. Den tar også for seg og beskriver gode løsninger som allerede blir benyttet og som man ønsker å fortsette med. I tillegg kommer det eksempler på løsninger som bransjen etterlyser. Opplysningene er forklart og lagt frem i et forsøk på å standardisere måten ventilasjonsanlegg skal bygges på. For å strukturere informasjonen og legge den frem så konkret som mulig er det også produsert en spesifisering. Denne tar for seg all informasjonen og gjengir den i et kompakt dokument. Spesifiseringen kan ikke behandles som en fullverdig kravspesifisering, men kanskje kan den brukes som en inngang til videre arbeid med temaet internt i Statkraft.

Prosjektet løfter frem viktigheten av at ventilasjonsanlegget kan driftes døgnet rundt hele året. Nedetid og bruk av naturlig ventilasjon, kjent som skorsteinseffekt, vil man helst unngå. Da er det viktig at ventilasjonsanlegget har nødløsninger som

for eksempel flere vifter i reserve. I tillegg må sensorsystemet som skal behandle informasjonen fra anlegget takle påkjenninger som temperaturendringer og fukt.

Det er også redegjort for hvordan et ventilasjonsanlegg skal og bør oppføre seg i en brannsituasjon. Ventilasjonsanlegget kan bidra til å holde rømningsveier fri for røyk, slik at evakuering blir trygt og effektivt. På den måten kan et velfungerende ventilasjonsanlegg bidra til et tryggere kraftverk. Slike funksjoner er gjerne realisert i form av eget brannventilasjonsanlegg som er koblet opp mot brannvarslingsanlegget i stasjonen. Dette er altså et separat system. Ellers ser rapporten på hva som krever særskilte løsninger når det kommer til sikring mot både brann og eksplosjon. Dette er viktig om det er benyttet transformatorer med oljekjøling, disse må stå i eget avlukke, såkalte brannceller. Dette hindrer spredning til andre deler av stasjonen om noe skulle skje.

Når man skal bygge, drifte og vedlikeholde ventilasjonsanlegget, krever det også at alt er dokumentert og bygger på normer og standarder. I rapporten er det en gjennomgang av hvilke referansesystemer dokumentasjonen skal benytte, og hva slags symboler som er hensiktsmessig å bruke i skisser.



**Bilde 3:** Aspekter av et objekt og viktigheten av dokumentføring

Grunnen til denne gjennomgangen er at Statkraft har lyst til at alle leverandører skal dokumentere anleggene sine på samme måte. Håpet er at dette vil gjøre det enklere å få god oversikt og bedre struktur, spesielt dersom man får feilmeldinger rundt omkring i ventilasjonsanlegget.

Grunnen til at prosjektet ble gjennomført var at Statkraft i utgangspunktet ikke var helt fornøyd med ventilasjonsanleggene sine, og ønsket å gjennomføre et prosjekt i forsøk på å standardisere måten å bygge på. Dette kan også være nyttig i et samfunnsperspektiv. Vannkraftverkene er samfunnskritiske institusjoner vi ikke hadde klart oss uten. Hele samfunnet har i den sammenheng interesse av at vannkraftverkene er robuste og varer i mange år fremover. Ventilasjonsanlegget kan være et lite, men viktig bidrag til dette.

# **Kravspesifikasjon for ventilasjonsanlegg i vannkraftverk i fjell**

Utarbeidet for Statkraft som  
et utgangspunkt for videre arbeid

Ola Einbu Baugerød  
Lauritz Berg  
Brendon Gocaj  
Georg Horntvedt

# Innholdsfortegnelse

<b>1 Innledning og bakgrunn</b>	<b>1</b>
<b>2 Struktur og dokumentasjon</b>	<b>1</b>
<b>3 Kontrollrom og oppholdsrom</b>	<b>1</b>
<b>4 Luftinntak, forgreninger og kanaler</b>	<b>1</b>
<b>5 Maskinsal</b>	<b>3</b>
<b>6 Generator</b>	<b>3</b>
<b>7 Turbinetasje</b>	<b>3</b>
<b>8 Transformator</b>	<b>4</b>
<b>9 Batterirom</b>	<b>5</b>
<b>10 Styring og overvåkning</b>	<b>5</b>
10.1 Funksjoner . . . . .	5
10.1.1 Brukergrensesnitt . . . . .	5
10.1.2 Signalbehandling . . . . .	6
<b>11 Brannventilasjon</b>	<b>7</b>
<b>12 Tillegg - forslag integrering</b>	<b>7</b>

# Definisjoner

## **A-tunnel**

Adkomst og/eller transporttunnel som fører inn til kraftstasjonen.

## **K-tunnel**

Kabelsjakt eller tunnell som kan benyttes som transportvei eller nødutgang.

## **U-tunell**

Kraftstasjonens vannutløp. Kan i noen tilfeller brukes som lufttilførsel.

**RH** - Relativ fuktighet

# 1 Innledning og bakgrunn

Denne spesifikasjonen er et resultat av kommunikasjon med fagpersoner på vannkraftverk, ventilasjon/avfukting og litteraturstudier. Her kommer konkrete anbefalinger som er begrunnet i prosjektrapporten. Dette er ikke en fullstendig spesifikasjon, men kan brukes som et utgangspunkt for videre arbeid.

## 2 Struktur og dokumentasjon

Referansebetegnelsessystem skal være i overensstemmelse med *IEC/ISO 81346*. Det finnes tre kategorier som benyttes for å strukturere systemer;

- “*Main systems*” omhandler de største enhetene i et anlegg.
- “*Technical systems*” er det mellomstore nivået.
- “*Component systems*” er det nederste nivået, og benyttes for alle resterende systemer eller komponenter.

Tabeller for å lage referansebetegnelsessystemet for “*Component systems*” finnes i *IEC/ISO 81346-2*. “*Main systems*” og “*Technical systems*” er avhengig av bransje. Tabeller for ventilasjonsanlegg innenfor disse systemene finnes i *IEC/ISO 81346-12* (Construction Works). Tabeller for vannkraftverk innenfor disse systemene finnes i *IEC/ISO 81346-10* (Power Supply Systems).

## 3 Kontrollrom og oppholdsrom

Alle rom i kraftstasjonen der personer vil oppholde seg i lengre perioder skal oppfylle kravene til ventilasjon i *TEK17*. Luften skal være filtrert, varmet opp og fuktet tilstrekkelig. Sanitæranlegg skal ha eget avtrekk.

## 4 Luftinntak, forgreninger og kanaler

Friskluft må blåses inn i anlegget. De vanligste metodene er:

- Friskluft inn i K-tunnel/kabelsjakt og avtrekksluft gjennom A-tunnel.
- Friskluft inn i U-tunnel med avtrekk i A-tunnel.
- Dersom det er én tunnel til rådighet kjøres friskluft og avtrekk parallelt i samme tunnel.

Ved luftinntak i K- eller A-tunnel er det optimalt med en isolert ventilasjonskanal helt inn til ventilasjonsrom i stasjonen. Dersom stasjonen er langt inne i fjellet kan ventilasjonskanal benyttes et stykke før tunnel eller sjakt brukes resten av veien. Dersom kanalen er lang, vil det kunne bli behov for trykkavlastingskammer. Lange ventilasjonskanaler vil også gjøre kostnadene større.

Ved luftinntak/avkast bør det installeres vifter med varme slik at ising ved port eller portalbygg unngås.

## **Kanal**

For å holde temperatur og fuktighet så stabil som mulig gjennom hele året, bør tilført friskluft behandles til enhver tid. Nedre grense for friskluft settes til 5°C. Ved utetemperaturer lavere enn dette skal varmebatteri ved luftinntak kobles inn for å unngå ising på overflater.

Øvre grense for utetemperatur bør settes til 25°C. Ved varmere utetemperaturer enn dette kan kjølebatteri vurderes for å sikre at temperatur ikke overstiger dette. Det bør tilstrebes å legge til rette for mest mulig stabil temperatur på luften som kommer inn i anlegget. 15°C kan være et utgangspunkt.

Ventilasjonsanlegget skal ha redundans av aktive komponenter. Det vil si to uavhengige sett av aktuell anleggsdel. Dette gjelder spesielt viftene i anlegget. Om lufttilførselen svikter vil det føre til betydelig større belastning på komponentene å kun benytte seg av skorsteinseffekten. Varmebatteri kan også med fordel ha redundans, men disse har ofte kort leveringstid og kan derfor vurderes individuelt.

## **Vifter**

Det skal være installert viftekapasitet som tilsvarer 200 % av behovet for å sikre redundans i systemet.

I kanaler med lav motstand, for eksempel der kanalen er kort og har få bender kan parallellkoblede vifter benyttes som alternativ til kun én. To parallelle vifter på redusert hastighet forbruker mindre effekt enn én på full last.

Er det høy motstand i systemet, for eksempel dersom ventilasjonskanalen er lang, har mange avgreininger, bender, filter eller spjeld, kan vifter i serie vurderes for å redusere gjennomsnittlig trykkfall i kanalen.



## 5 Maskinsal

Det viktigste i maskinsalen er å bli kvitt overskuddsvarme og forurensning i lufta. Varmer fra generator og annet utstyr med mye tap kan stige opp fra etasjene under. Forekomster av børste- og oljestøv kan forekomme.

Friskluft bør kjøres lavt inn i hallen med avtrekk høyere opp. Diffusorer plasseres på gulvnivå. Børsteavsug ved sleperinger må installeres. Egen støvsuger for dette formålet. Eventuelt oljestøv fra lager bør også ha eget avsug.

## 6 Generator

Generatoren er plassert i eget rom da den er sensitiv for støv. Utforming av generator og avlukke avgjør hvilket kjøleluftprinsipp som bør benyttes. Den mest effektive kjølemetoden er kretser med kjølevann som sirkulerer i stator og rotorviklinger samt stator-kjerne. Dette er en lukket krets for luft-vannkjøling. Kjøleluft kan sirkuleres gjennom både radielle og aksielle kanaler i stator og rotor. Den varme luften må kjøles av en egen kjølevannskrets. Dersom forsert ventilasjon skal benyttes stilles det særlig krav til luftkvaliteten.

For å hindre tilsmussing av støv må avsug for oljestøv installeres ved akslingens lager.

## 7 Turbinetasje

Turbinetasjen er plassert nederst i kraftverket. Det er ofte utformet slik at tilløpsrør ligger åpent i rommet utført med turbinventil. Turbinventilen har bevegelige deler som vil påvirkes av rust ved fuktige forhold. Vannrøret føres deretter inn i rom med selve turbinen. Avhengig av geografisk plassering av kraftstasjonen kan vanntemperatur variere fra  $-1^{\circ}\text{C}$  om vinteren til  $16-18^{\circ}\text{C}$  om sommeren. Temperaturen i turbinetasjen vil derfor ofte ligge på  $10-12^{\circ}\text{C}$  som følge av vanntemperaturen og plassering langt nede i stasjonen.

Dette er laveste punktet i stasjonen og har derfor potensial for opphopning av radongass.

I turbinetasjen er det ønskelig å holde fuktigheten på et nivå som ikke skader komponentene som befinner seg her.  $RH$  bør holdes på et nivå under 60 %.

Eventuell punktavfukter bør ha avfukningskapasitet som gjør det mulig å holde  $RH$  under dette nivået.

Dersom rommet ikke er mekanisk ventilert er det vanskelig å ha kontroll på luftflyt. Da er det aktuelt å installere punktavfuktning. Enten sorpsjonsavfukter eller kondensavfukter. Kondensavfukter er ikke like effektiv når temperaturen ligger under  $12^{\circ}\text{C}$ . Det bør etterstrebtes å benytte sorpsjonsavfuktere med tørkerotor ved slike temperaturer selv om kostnaden vil være noe høyere.

Om det er installert mekanisk ventilasjon bør denne begrenses til maksimalt to luftskift per time. Spesielt om sommeren når luften gjerne er varmere og fuktigere bør tilluften begrenses så mye som mulig. En løsning er å aktivere mekanisk ventilasjon i området kun når personer oppholder seg der, og ellers kun bruke avfuktning. Turbinetasjens tilluft bør reguleres til  $10\text{-}12^{\circ}\text{C}$  da temperaturen gjerne ligger i dette området.

Ved opphopning av radon kan punktavsug vurderes. Det bør gjøres tiltak dersom målt verdi ligger over  $100\text{ Bq}$ . Her kan det gjøres vurderinger ut fra hvor ofte og lenge området skal være bemannet. Det er altså radonkonsentrasjonen som bør bestemme hvor få luftskift det er mulig å ha.

## 8 Transformator

Formålet med å ventilere transformatoren er å holde temperaturen på et nivå som gjør at levetiden blir som prosjektert eller lenger.

Transformatoren kan være installert inne i kraftverket eller utenfor. Transformator installert utenfor fjellanlegget er enklere å kjøle da tilgang på friskluft er bedre. I tillegg utgjør ikke oljefylte transformatorer like stor fare ute i dagen sammenliknet med inne i et fjellanlegg. Er de installert inne i fjellet stilles det ekstra krav og tilrettelegging for brann/eksplosjonssikring.

For transformator installert innendørs er det viktig med tilstrekkelig ventilasjon, spesielt dersom transformatoren har gjennomsnittlig omgivelsestemperatur over  $20^{\circ}\text{C}$ , står i et trangt rom med dårlig naturlig ventilasjon, eller er utsatt for regelmessig overlast. Dette gjelder tørrisolerte “dry type” transformatorer.

Ved mekanisk fortrenningsventilasjon skal luft føres inn så lavt i rommet som mulig, og avtrekk skal være høyt på veggen. Plassering av transformator og ventilasjonskanaler må tas hensyn til, for å hindre kortslutning av luftstrømmen. Transformatoren bør være løftet fra gulvet eller være plassert på rist for å oppnå tilstrekkelig lufting fra undersiden. Ventilasjonen skal bidra med tilstrekkelig kjøleluft slik at omgivelsestemperaturen optimalt ikke er høyere enn  $20^{\circ}\text{C}$ .

Kjøleluften bør dimensjoneres slik at luftflyten ligger på  $3,5-4 \text{ m}^3/\text{min}$  per  $kW$  tap transformatoren har.

Det skal være sjokkspjeld installert dersom det er fare for oljestøveksplasjon. Ventilasjonsrist i rommet kan fungere til det formålet dersom dimensjonene er riktige. Areal på spjeld skal være  $0,03 \text{ m}^2$  per  $\text{m}^3$  romvolum.

## 9 Batterirom

Batterirom og eventuelt andre rom som kan ha forekomster av giftige gasser skal dimensjoneres med undertrykk slik at gasser ikke kan sive ut. Spesielt viktig at dette ikke havner inn i stasjonen som omluft.

## 10 Styring og overvåkning

De generelle forslagene som er avdekket gjennom perioden med innhenting av data er overordnede funksjoner som er ønsket i styringen av ventilasjonsanlegget.

Mange ventilasjonsanlegg har enda ikke automatisk regulering av luftmengde eller temperatur. Dette er enten manuelt styrt eller uten mulighet for regulering i det hele tatt. For å kunne regulere luftmengde, temperatur, trykk og fuktighet må det benyttes en styringsenhet.

Løsningene som leveres i form av logikk og skjemaer bør kunne driftes uavhengig av programvare og leverandør for å sikre tilgang på kompetanse i all fremtid.

For følgende punkter legges det til grunn at ventilasjonssystemet skal ha kontinuerlig regulering for å oppnå de beste driftsforholdene til en hver tid. Altså et behovsstyrt ventilasjonsanlegg. Kontrollanlegget bør forsynes av to separate batterianlegg dersom stasjonens hovedkontrollanlegg har dette. Dette forbedrer driftssikkerheten.

### 10.1 Funksjoner

Følgende er hovedfunksjoner som bør inngå i styring, overvåking og regulering av ventilasjonsanlegget.

#### 10.1.1 Brukergrensesnitt

I kraftverkets kontrollrom bør det være tilgang til et enkelt grensesnitt for ventilasjonsanlegget. Det bør være en prinsippskisse som viser anleggsdeler og områder

som ventilasjonsanlegget omfatter. Dette bør helst presenteres med sanntidsdata fra sensorer i aktuelle områder. Viftepådrag [%], temperatur [°C], relativ fuktighet [%], luftkvalitet [ppm] og trykk [Pa] er interessant å presentere her.

Driftsmodus bør også presenteres i form av automatisk eller manuell styring. Dersom verdier avviker i forhold til settpunkt skal det tydelig fremvises på monitor med oversiktsbilde og eventuelt utløse alarm ved en gitt verdi.

Om det skulle oppstå feil på anlegget skal disse enkelt kunne kvitteres ut. Dette gjelder spesielt ved feil på sensorsystem. Det er ikke ønskelig at ventilasjonsanlegget skal stanse automatisk ved feil på sensor. Det bør utløse alarm som analyseres av driftspersonell. Feil bør fremvises kronologisk i en oversikt der det enkelt kan leses av hvilke alarmer som er kvittert for og ikke.

Feil på enten sensorsystem eller komponenter i ventilasjonsanlegget skal referere til gjeldende anleggsdel gjennom korrekt referanse slik at det enkelt skal kunne lokaliseres. Anleggsdel bør også fremstilles visuelt på prinsippskisse av anlegget.

Grensesnittet skal være slik at parametere for settpunkt og alarmgrense enkelt kan endres. Det bør likevel være passordbeskyttet. Mulighet for å kontrollere anlegget på flere nivå eller grensesnitt bør være mulig. Anlegget bør være tilkoblet desentralisert driftscentral med mulighet for overvåking og styring. Det skal også være mulig å styre eller endre innstillinger direkte på frekvensomformere til vifter. Denne funksjonen er nyttig dersom det ikke lar seg gjøre fra kontrollrom.

### **10.1.2 Signalbehandling**

Måleverdier som returneres fra sensorsystemet skal være tilgjengelig i kontrollrom. Data skal lagres i et gitt tidsrom slik at trender enten kan presenteres på monitor i kontrollanlegget eller hentes ut som fil. Sensorer bør gå direkte til den autonome enheten for ventilasjonssystemet, og ikke via andre enheter som kan komplisere systemet unødig eller øke sannsynligheten for feil.

Valg av sensorer må være tilpasset omgivelsene de skal operere i for å kunne returnere nyttig data som ikke er degradert som følge av forholdene. Disse må spesielt være i stand til å tåle fuktpåkjenninger.

Trykkmålere bør plasseres både før og etter filter for mulighet til å overvåke tilstanden til disse. Gjennom disse målerne kan også luftflyten i anlegget overvåkes. Det bør være overvåking av tilstanden på tilført luft. Temperatur bør måles ved portalbygg/port og inntak til stasjon for å se på tilstandsending gjennom kanal

og/eller tunnelsystem. Det er nyttig å vite hva slags påvirkning styringen har på de faktiske forhold.

## **11 Brannventilasjon**

Vannkraftverket har et eget brannvarslingsanlegg. Dette bør være implementert som en egen autonom enhet med egen forsyning. Det skal kunne forsynes fra nødstrømsanlegg slik at funksjonene opprettholdes ved faktisk nødsituasjon. Dersom det oppstår branntekniske feil på anlegget bør dette utløse en alarm, men ikke stoppe eller endre ventilasjonsanleggets funksjoner uten videre. Feilene bør verifiseres av driftspersonell og kunne kvitteres ut uten at anlegget stopper.

Der dedikert brannventilasjonsanlegg med egne vifter og kanaler foreligger, skal brannvarslingsanlegg være tilkoblet direkte mot dette. Rømningsveien skal ha trekk av friskluft på 1 m/s i motsatt retning av rømningsvei. Altså trekk innover i tunnelen. Nøddrom/beredskapsrom skal forsynes med friskluft via separat kanalsystem tilknyttet egen brannventilasjon ved brannsituasjon. Slike rom skal være tilgjengelig i kraftstasjoner der det ikke finnes to uavhengige rømningsveier.

## **12 Tillegg - forslag integrering**

Alle vannkraftverk har et eksisterende kontrollanlegg med styringsenheter for vannkraftverkets komponenter. Dette systemet tar imot og behandler signaler fra vannkraftverket for å regulere dette. Når et vannkraftverk allerede har et kontrollanlegg i drift er det naturlig at det finnes kompetanse på bruk av dette systemet hos ansatte. Det antas også at det er tilgang på service og vedlikehold fra leverandør.

Dersom et nytt kontroll/styresystem for ventilasjonsanlegget skal implementeres eller utbedres kan det vær naturlig at dette integreres i allerede eksisterende kontrollanlegg. Lar dette seg gjøre uten for store komplikasjoner kan det spare kostnader både på bygging/installasjon og drift/vedlikehold.

Det antas at å bygge et helt frittstående kontrollanlegg for styring av ventilasjonsanlegget vil kreve ny kompetanse. Å bruke eksisterende fagpersoner og leverandører vil være en fordel. I tillegg vil dette forbedre kompatibiliteten mellom systemene slik at de snakker bedre med hverandre. Dette bør være aktuelt dersom det er ønskelig å oppgradere til behovsstyrt/autonomt ventilasjonssystem. Om det skal være aktuelt bør ventilasjonsdelen av anlegget likevel styres av en egen autonom enhet. Dette er for å ivareta driftssikkerheten til systemet. Dersom andre deler av

kontrollanlegget faller ut på grunn av feil skal andre autonome enheter kunne driftes videre. Dette forutsetter at de autonome enhetene har separate forsyninger. Den interne kommunikasjonen må også være uavhengig av de andre enhetene i systemet.