

"Inneklima i tårnkabin ved flyplass.
Systemer og regulering for oppvarming,
luftbehandling og kjøling."

Kristian Heier

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2010
Hovedveileder: Sten Olaf Hanssen, EPT

Oppgavetekst

Bakgrunn

Multiconsult er engasjert av Avinor til å utføre rådgivende ingeniørtjenester innen VVS ved bygging av nytt tårn og driftsbygg ved Honningsvåg lufthavn. For dette bygget stilles det strenge krav til arbeidsmiljø i tårnkabinen og det er derfor ønskelig å se nærmere på blant annet termisk, atmosfærisk og akustiske inneklime (eksempelvis operativ temperatur, temperatur asymmetri, støy, trekk etc.).

Multiconsult har så langt sett for seg følgende løsninger:

Varme: All varme for erstatning av transmisjons og infiltrasjonstap tilføres via radiatoranlegg.

Kjøling: Grunnkjøling legges på ventilasjonsluften og suppleres med stille kjøling i form av kjøletak eller kjølebafler.

Ventilasjon: Omrøringsventilasjon hvor mengden er konstant og innblåsing ved golv.

Mål

Det er ønskelig å se nærmere på effektbehov for varme og kjøling ved bruk av beregningsprogrammet Simien for de per i dag foreslåtte løsningene siden det til nå kun er utført foreløpige beregninger. I tillegg skal det vurderes ulike alternative løsninger for varme, kjøling og ventilasjon i forhold til de løsningene Multiconsult så langt har sett for seg. Dette gjelder vurdering av systemløsninger, styring og regulering, behovsstyring etc. både i forhold til inneklime og energiforbruk. Det er spesielt interessant å kunne se på hvordan løsningene påvirker inneklime og personers helse og arbeidseffektivitet.

Oppgaven gitt: 12. februar 2010

Hovedveileder: Sten Olaf Hanssen, EPT

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Kristian Heier

Våren 2010

Inneklima i kontrolltårn på flyplass. Valg av systemer for styring, regulering, oppvarming, luftbehandling og kjøling.

Indoor climate in the control tower at an airport – Appropriate systems for operation and control of heating, air handling and refrigeration installations.

Bakgrunn

Multiconsult er engasjert av Avinor til å utføre rådgivende ingeniørtjenester innen VVS ved bygging av nytt tårn og driftsbygg ved Honningsvåg lufthavn. For dette bygget stilles det strenge krav til arbeidsmiljø i tårnkabinen og det er derfor ønskelig å se nærmere på blant annet termisk, atmosfærisk og akustiske inneklima (eksempelvis operativ temperatur, temperatur asymmetri, støy, trekk etc.).

Multiconsult har så langt sett for seg følgende løsninger:

Varme: All varme for erstatning av transmisjons og infiltrasjonstap tilføres via radiatoranlegg.

Kjøling: Grunnkjøling legges på ventilasjonsluften og suppleres med "stille kjøling" i form av kjøletak eller kjølebafler.

Ventilasjon: Omrøringsventilasjon hvor mengden er konstant og innblåsing ved golv.

Mål

Det er ønskelig å se nærmere på effektbehov for varme og kjøling ved bruk av beregningsprogrammet Simien for de per i dag foreslåtte løsningene siden det til nå kun er utført foreløpige beregninger. I tillegg skal det vurderes ulike alternative løsninger for varme, kjøling og ventilasjon i forhold til de løsningene Multiconsult så langt har sett for seg. Dette gjelder vurdering av systemløsninger, styring og regulering, behovsstyring etc. både i forhold til inneklima og energiforbruk. Det er spesielt interessant å kunne se på hvordan løsningene påvirker inneklima og personers helse og arbeidseffektivitet.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

Oppgaven skal i utgangspunktet bearbeides ut fra de forhold som er omtalt i bakgrunn og mål for oppgaven. Kandidaten skal derfor i samråd med faglærer og veiledere selv lage en arbeidsplan som punktvis viser hvordan oppgaven er forstått og hvordan den planlegges besvart. Dette innledende arbeidet forutsettes gjennomført i løpet av de første del av prosjektperioden. Hvis det skulle bli aktuelt med endret fokus eller andre justeringer skal dette avtales med den som er faglig ansvarlig for oppgaven.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sendte instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosessteknikk.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maksimalt én maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til eventuelle medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og eventuelt leveres direkte til de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 5. februar 2010



Olav Bolland
Instituttleder



Sten Olaf Hanssen
Faglig ansvarlig/veileder

Medveiledere:

Oppdragsleder Per Arne Severinsen, Multiconsult AS, Trondheim.

Oppdragsmedarbeider Ingrid Presthus, Multiconsult AS, Trondheim.

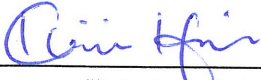
Førsteamanuensis II, PhD Jan Vilhelm Bakke, Institutt for energi- og prosessteknikk, NTNU/Arbeidstilsynet, Gjøvik.

Forord

Denne masteroppgaven er gjennomført ved institutt for Energi- og prosesssteknikk ved NTNU. Oppgaven er gjort i samarbeid med Multiconsult AS. Med dette markerer jeg avslutningen på min utdanning ved NTNU.

Jeg vil gjerne takke Professor Per Olaf Tjelflaat for veiledning og god hjelp. En stor takk rettes også til Per Arne Severinsen og resten av gjengen ved Multiconsult.

Tromsø 25.06.10
Sted og dato


Kristian Heier

Sammendrag

Denne masteroppgaven tar for seg klimatiseringsløsningen i et kontrolltårn ved en flyplass. Kontrolltårnkabinen er studert med mål om å komme frem til en optimal systemløsning med hensyn på energieffektiv drift og godt arbeidsmiljø. Denne delen av kontrolltårnet er av en komplisert form, og består av store glassfasader. Dette gir en utfordring med å forsyne flygelederne med et godt nok inneklima. Det er fokusert på akustisk, atmosfærisk og termisk inneklima i dette arbeidet.

Energiberegninger og simuleringer av inneklimatiske verdier i oppgaven er gjort i beregningsprogrammet SIMIEN 4.034.

Klimatiseringsløsningen som var tiltenkt tårnkabinen består av omrøringsventilasjon, kjølebafler og radiatorer. En vurdering er fremlagt av denne systemløsningen sammen med andre forbedringer for kontrolltårnkabinen. Alternative klimatiseringsløsninger er så presentert, og en ny, forbedret systemløsning foreligger som resultat av inneklimatiske og energimessige vurderinger.

Den nye, foreslåtte klimatiseringsløsningen består av personlig ventilering ved arbeidsbordet til flygelederne, i tillegg til den opprinnelig valgte løsningen. Dette gir flygelederne individuell kontroll over sitt eget lokale klima. Ettersom personer har veldig forskjellige preferanser særlig til termiske forhold, vil individuell kontroll av luftens temperatur og hastighet føre til en større komfortmessig gevinst. Termisk komfort påvirker prestasjon og mental ytelse, og termisk balanse med omgivelsene gir maksimal uttelling for arbeidseffektivitet. Personlig ventilasjon tilfører samtidig friskluft direkte til pustesonen, og sørger dermed for tilnærmet forurensningsfri luft til flygelederne.

Det totale netto energibehovet for denne klimatiseringsløsningen ligger 3,2 % høyere enn for Multiconsults tiltenkte løsning.

For en forbedret energieffektivitet og inneklima i tårnkabinen, ble det i tillegg anbefalt å igangsette andre tiltak:

En installering av radiatorer med lavere konveksjonsgrad vil gi en mer behagelig oppvarming og en reduksjon av kaldras fra vinduene. For å hindre den store solinnstrålingen gjennom sommeren vil en bruk av vinduer med lavere solfaktor føre til et mindre kjølebehov og et bedre termisk inneklima. En reduksjon i solfaktoren på 5 % vil kunne dekke det høyere energibehovet for den nye klimatiseringsløsningen. For å hindre lav relativ luftfuktighet gjennom vinterperioden bør det installeres en befukter i ventilasjonsanlegget. Dermed installeres det også en fuktsensor i tillegg til en sensor for strålingstemperaturen. Disse to parametrene er svært viktige for opplevelsen av et godt inneklima.

Innholdsfortegnelse

Innledning.....	5
1. Flytrafikk og arbeidsforhold for flygeledere	6
2. Arbeidsmiljø for flygeledere.....	8
2.1 Akustisk inneklima	8
2.1.1 Støy i flytårnkabinen.....	8
2.1.2 Krav til akustisk inneklima på arbeidsplasser og i tårnkabin.....	10
2.1.3 Lydisolering.....	12
2.2 Atmosfærisk inneklima	14
2.2.1 Svevepartikler.....	14
2.2.2 Gasser	16
2.2.3 Evaluering av luftkvalitet.....	17
2.2.4 Filtrering i ventilasjonsanlegg.....	20
2.3 Termisk inneklima	23
2.3.1 Personparametre	23
2.3.2 Klimaparametre.....	24
2.3.3 Evaluering av termisk komfort	26
2.3.4 Termiske begrep (og krav).....	27
2.3.5 Mental prestasjon.....	33
3. Varmeutveksling	36
4. Ulike alternativer for oppvarming	37
4.1 Ventilasjonsoppvarming.....	37
4.2 Radiatorer.....	37
4.3 Lukkede panelovner.....	37
4.4 Gulvvarme.....	37
4.5 Varmelister.....	38
5. Ulike alternativer for kjøling.....	39
5.1 Ventilasjonskjøling	39
5.2 Kjølebafler	39
5.2.1 Passive kjølebafler	39
5.2.2 Aktive kjølebafler	40
5.3 Kjøletak.....	41
6. Prinsipper for ventilasjon	42
6.1 Omrøringsventilasjon.....	42
6.2 Fortrengningsventilasjon	43
6.3 Personlig ventilasjon	44
6.4 Effektivitet for ventilasjonsprinsipper	45
7. Sammenligning av ventilasjon og enheter for oppvarming og kjøling	47
8. Behovsstyring	49
8.1 Ventilasjon.....	49
8.2 Oppvarming og kjøling	49
8.3 Solavskjerming.....	50
8.4 Sensorplassering i flytårnkabin	50
9. Simuleringsverktøy	52
9.1 SIMIEN	52
9.2 Hvorfor Simien?	53
10. Beskrivelse og utforming av den aktuelle tårnkabinen	54

10.1	Lokalisasjon.....	54
10.2	Bygningskroppen.....	55
10.3	Krav for flytårnkabinen.....	57
10.4	Beskrivelse av Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning.....	58
10.5	Energi- og effektbehov	63
10.5.1	Oppvarming.....	63
10.5.2	Kjøling	63
10.5.3	Solinnstråling.....	63
10.5.4	Internlast	65
10.6	Befaring i flytårnet ved Trondheim lufthavn, Værnes	65
11.	Vurderinger av Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning	67
11.1	Resultater fra SIMIEN	67
11.2	Vurdering av systemløsningen.....	72
11.3	Anbefalte forbedringer ved den foreslåtte løsningen.....	75
12.	Alternative klimatiseringsløsninger	82
13.	Forslag til ny klimatiseringsløsning for tårnkabinen	86
14.	Konklusjon	97
15.	Videre arbeid.....	99
16.	Referanser	100
17.	Vedlegg	103

Innledning

Denne masteroppgaven er utarbeidet våren 2010 ved institutt for energi- og prosesseteknikk ved NTNU. Masteroppgaven er utført i samarbeid med Multiconsult AS.

Bakgrunnen for oppgaven er at Multiconsult er blitt engasjert av Avinor til å utføre rådgivende ingeniørtjenester innen VVS ved byggingen av et nytt kontrolltårn og driftsbygg ved Honningsvåg lufthavn. Det stilles strenge krav til arbeidsmiljøet i tårnkabinen, da flygelederne har arbeidsoppgaver som krever maksimal konsentrasjon til enhver tid. Det har derfor vært ønskelig å se nærmere på blant annet termisk, atmosfærisk og akustisk inneklimate for denne delen av kontrolltårnet.

Målet med oppgaven har vært å finne en systemløsning som skal gi et optimalt arbeidsmiljø for flygelederne. Det er sett nærmere på klimatiseringsløsningen for kontrolltårnkabinen som skal bygges, og det er funnet alternative løsninger og forbedrende tiltak for kontrolltårnkabinen.

Beregningsprogrammet SIMIEN er tatt i bruk for se nærmere på effektbehovet for kjøling og oppvarming.

Den første delen av oppgaven er en introduksjon til flygelederens arbeidsmiljø og det teoretiske bak senere vurderinger av inneklimate. Også forskjellige oppvarmings-, kjøle- og ventilasjonsalternativer er beskrevet her. Det har blitt lagt vekt på å fokusere på teori og alternativer som vil være aktuell for kontrolltårnkabinen.

Midterste del av oppgaven består av en presentasjon og en vurdering av den tiltenkte klimatiseringsløsningen til Multiconsult. Forslag til forbedringer for klimatiseringsløsningen er presentert.

Den siste delen av oppgaven tar for seg alternative klimatiseringsløsninger og en vurdering av disse. En av klimatiseringsløsningene blir valgt som det beste alternativet og blir presentert sammen med andre forbedringer av kontrolltårnkabinen som den optimale systemløsningen.

Beregningsprogrammet som ble valgt til dette arbeidet har flere forenklinger ved seg som gjør at deler av resultatene blir noe unøyaktige. Forenklingene har særlig gått ut over de inneklimateiske simuleringene, og dette har til tider påvirket og vanskeliggjort underbyggingen av vurderinger som er gjort av inneklimate.

1. Flytrafikk og arbeidsforhold for flygeledere

Sikkerheten i flytrafikken er sterkt avhengig av prestasjonen til alle de menneskelige elementene som er involvert. Sikkerhetskontrollen sørger for at gjenstander av uønsket art ikke kan bringes med på flyene, fly skal kontrolleres og klargjøres for flyvninger, og flyene skal manøvreres inn på rullebanen til riktig tidspunkt. Her er det, med mange flere viktige oppgaver, lite rom for feil. Den kanskje viktigste jobben blir gjort fra flytårnet, hvor flygelederne sitter. En flygeleders oppgaver er å hindre kollisjoner mellom fly, både i luften og på bakken. De er ansvarlige for å opprettholde flyt i flytrafikken, og å gi informasjon og nyttige råd til piloter, flyselskap og myndigheter for å sikre trygge flyvninger. Jobben innebærer også å bistå aktuelle organisasjoner dersom et fly skulle trenge nødhjelp[1, 2].

Det har vært en jevnt økende trafikk i det nasjonale som det internasjonale luftrommet[3], og i takt med antallet flyvninger ved flyplassene, øker også arbeidspresset på blant annet flygelederne. Yrket som flygeleder har lenge vært annerkjent som komplekst og krevende. Arbeidet er høyst situasjonsbasert og krever raske reaksjoner på stadig skiftende forhold. Flygelederen må organisere og prosessere flyinformasjon ved forskjellige operasjoner, særlig ved samtaler, koordinering med assistenter, kognitive prosesser og problemløsning, samtidig som de samhandler seg imellom[4]. En flygeleder kan ikke forutse kritiske stressituasjoner, og kan heller ikke fordele arbeidsmengde utover. Jobben som flygeleder er også risikabel; en flygeleder kan styre skjebnene til tusenvis av mennesker på bare én dag. Det er uakseptabelt med feiltrinn eller gale avgjørelser, da konsekvensene kan være fatale. I tillegg ligger det et stort økonomisk ansvar ved å skulle veilede fly sikkert på bakken og i lufta.



Figur 1: Flytårnet ved Trondheim lufthavn, Værnes

Diverse studier er gjort basert på flygeledernes arbeidsmiljø. Det er vist at flygeledere utvikler alvorlige stressproblemer på jobben[1]. Hovedårsakene til stress rapportert av flygeledere er linket sammen med både operative aspekter og organisasjonelle strukturer[5]. Den første delen handler om tett flytrafikk, tidspress, redsel for brudd på reglement, grenser, samt avhengighet og tillitsproblemer til teknisk utstyr. Den andre delen handler om skiftarbeid(særlig nattskift),

rollekonflikter, manglende kontroll over arbeidet og dårlige arbeidsforhold. Stress kan føre til at kroppen er mer mottagelig for sykdommer av alvorlig art[6], og de nevnte årsakene krever at flygelederene får tilrettelagt så gode arbeidsvilkår at det ikke er med på å påvirke i negativ grad.

Det er i forbindelse med flygeledernes utsatte helse lagt frem forslag på forbedring av arbeidsforholdene[7]. En av de viktigste oppdragene er å forbedre arbeidsmiljøet ved å fokusere på innemiljøet, særlig det akustiske, atmosfæriske og det termiske inneklimaet. Et godt inneklima vil sørge for ikke bare et mer komfortabelt arbeidsmiljø, det vil minske sykdom og fravær, samt øke arbeidsprestasjon og effektivitet.

2. Arbeidsmiljø for flygeledere

Som nevnt er et godt inneklima avgjørende for at flygelederne får et godt nok arbeidsmiljø. Fokuset i dette arbeidet ligger på akustisk, termisk og atmosfærisk inneklima og deres påvirkning av arbeidsforholdene i flytårnkabinen.

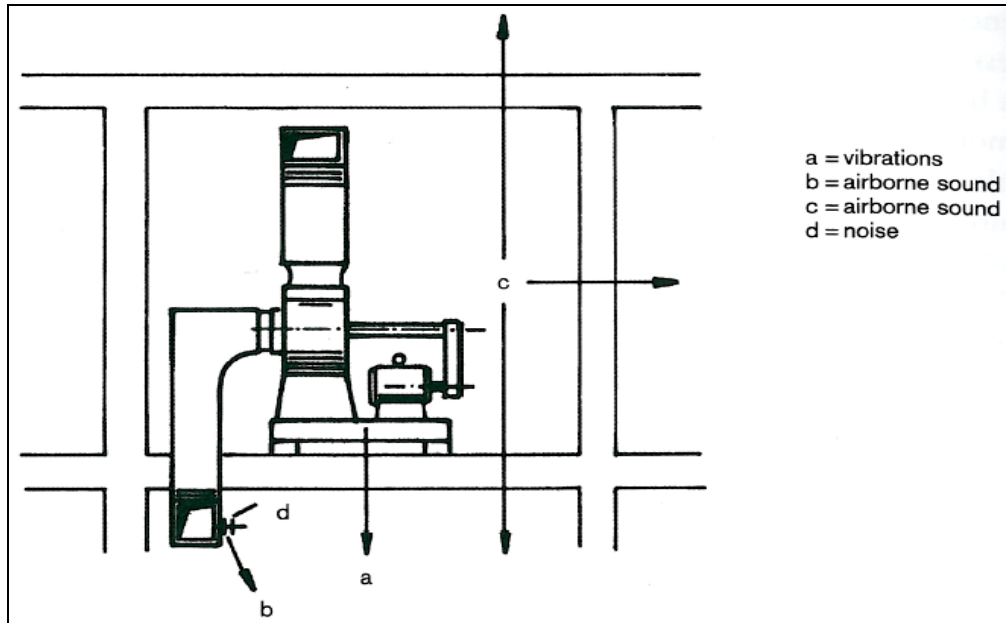
2.1 Akustisk inneklima

2.1.1 Støy i flytårnkabinen

Lyd oppstår når en lydkilde lager variasjoner i lufttrykket, og det oppstår en bølgebevegelse som spres utover med luften. Disse bølgebevegelsene fører til vibrasjoner i trommehinnen, og vi oppfatter det som lyd. Mens lyd er hørselsinntrykk som føles behagelige, er støy definert som uønsket lyd, noe som innebærer all lyd som man finner irriterende, skadende og forstyrrende. Støy kan være forstyrrende for tale og konsentrasjon, kan virke skadende for helsen og kan dermed være med på å vanskeliggjøre arbeidssituasjonen[8].

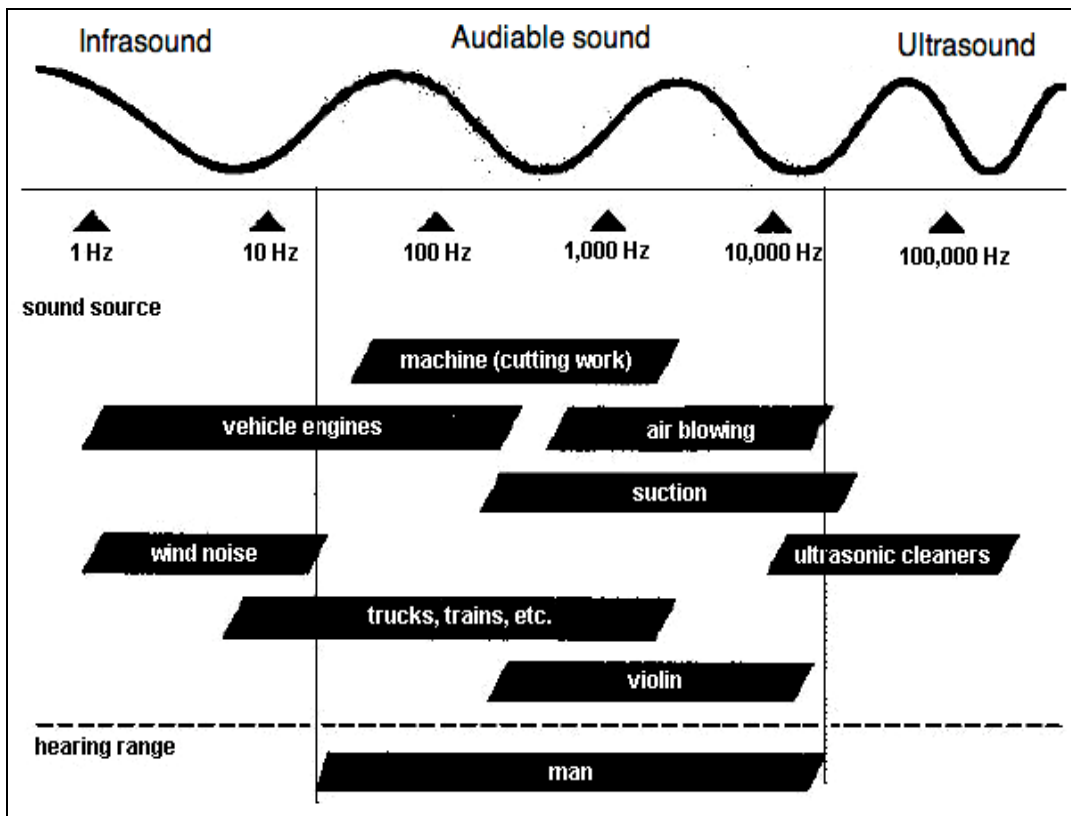
Flytårn må være særdeles godt isolert for å sørge for at støy fra lufttrafikken ikke hindrer kommunikasjon flygelederne seg i mellom, eller med andre over radio, telefon eller høyttalere. Det er viktig at støy ikke forstyrrer balansen av disse muntlige meldingene, da de ofte kan være av en veldig viktig grad, og konsekvensene kan bli store om de ikke blir tolket riktig[2]. Typisk lydtrykk fra et fly som tar av fra flyplassen ligger på omtrent 110-120 dB på en 100 meters avstand[9]. Dette vil føles veldig smertefullt uten sikring, og gjør at bygningskonstruksjonene i flytårnet må oppnå høy lydreduksjon.

Støy fra selve flytrafikken er dog sjelden hovedproblemet, i og med at fasadene er såpass godt lydisolert, og lyden fra flyene bare er forbipasserende. Problemet ligger heller på konstante støykilder inne i flytårnet som vifter eller trykksatte sjakter til ventilasjonsanlegg. En vifte i et ventilasjonsanlegg kan spre støy gjennom luft, omgivende strukturer og ved vibrasjoner. Luftbåren lyd er altså ikke den eneste typen støy som kan komme fra en vifte. Vibrasjon oppstår dersom det ikke oppnås total stabilitet mellom utstyr og strukturen rundt, og fører til at vibrasjoner forflytter seg gjennom strukturene og genererer lavfrekvent støy i nærliggende rom, vist som *a* i figur 2. Støy som distribueres med luften vil føre til problemer for rom nærmest ventilasjonsrommet, vist som *b* i figuren. Harde strukturer med lang gjenklang vil lede støyen fra vifter til omliggende rom ved at vegger, tak og gulv begynner å vibrere, noe som oppretter en ny luftbåren lyd i det respektive rommet, vist som *c*. Til slutt er det lenger fra ventilasjonsrommet spjeld og andre enheter som lager støy på grunn av luftgjennomstrømming eller vibrasjoner, vist som *d*[10].



Figur 2: Støy fra vifte plassert i ventilasjonskanal[10]

Denne type støykilder, som vifter, kan som nevnt ofte lage en lavfrekvent støy som kan føre til problemer selv om dB-nivået ikke er høyt. Grunnen til problemet er usikker, men det mistenkes å skyldes at lyden ligger i grenseland mellom det som er mulig å høre og det som er mulig å føle[11]. Vårt hørbare område ligger omtrent mellom 20 Hz og 20000 Hz, vist i figur 3, lavfrekvent støy ligger lavere enn 250 Hz[10]. Lyder fra ventilasjonsanlegget kan ofte skli over i området med infralyd som ligger under 20 Hz, og som normalt ikke er hørbart, men som kan oppfattes som summende og rumlende. Man er sikre på at lavfrekvent støy og infralyd fra ventilasjonsanlegg gir mange uønskede utfall, som tretthet, hodepine, svimmelhet, og stressrelaterte utfall som anspenhet og i tilfeller angstfølelser[11]. Lavfrekvent støy vil også kunne maskere lyd med en høyere frekvens, og vil da forstyrre blant annet tale, som vil skape problemer for flygelederne[8].



Figur 3: Menneskets hørbare område[12]

Det er også gjort studier som har funnet sammenhengen mellom flygelederens verbale kommunikasjon og tretthet. Dette er i sammenheng med at en flygeleder ofte sitter og hører på en stemme over lengre tid i det ene øret i et headset, samtidig som det er annen støy i tårnkabinen. Tretthet som da oppstår fører til lavere effektivitet og dårligere prestasjon i arbeidstiden[13].

2.1.2 Krav til akustisk inneklima på arbeidsplasser og i tårnkabin

Øret responderer ikke likt til forskjellige lydfrekvenser. Det er mindre effektivt ved lave og høye frekvenser enn ved moderate konversasjonsnivå-frekvenser. For å oppnå en måte å representere ørets følsomhet, oppgir man lydtryknivået som A-veid(dBA). A-veid lydtryknivå legger mindre vekt på bassfrekvenser, og blir oppgitt når det er snakk om målinger på gjennomsnittlig lydnivå over litt lengre tid. C-veid(dBC) lydtryknivå blir brukt til å måle lave toner og høye støynivåer. Enheten blir ofte brukt ved måling av maksimale lydnivåer til kravspesifikasjoner i støyforeskrifter[14].

Støykriterier for innendørs systemer i enkelte rom og bygninger er gitt i NS-EN 15251:2007 for A-veid lydtryknivå, og er vist i tabell 1:

Tabell 1: Anbefalte dimensjonering for A-veid lydtrykknivå[15]

Bygning	Type rom	Lydtrykknivå[dB]	
		Typisk område	Standard dim. verdi
Kontorer	Små kontorer	30 til 40	35
	Konferanserom	30 til 40	35
	Kontorer i landskap	35 til 45	40
	Kontoravlukke	35 til 45	40

Tabellen er basert på støy fra teknisk utstyr innenifra og utenifra, men ikke på annen støy som kommer utenifra. Dersom det er klart hva som er kravet til lydnivå i et rom som skal prosjekteres må en da dimensjonere ventilasjonsanlegget riktig. Strømningsstøy oppstår ofte på grunn av for høye lufthastigheter i kanalsystemet. Byggforskerien[16] gir en anbefaling for lufthastigheter i ventilasjonsanlegg for å unngå støy, vist i tabell 2:

Tabell 2: Tommelfingerregel for lufthastigheter i ventilasjonsanlegg

Krav til lydnivå i rom [dBA]	Hovedkanal uten ventil	Avgreivningskanal med ventil til rom
25 - 35	< 5 m/s	< 2 m/s
35 - 45	< 10 m/s	< 5 m/s

Også forslag og råd til å holde støynivået nede ved ventilasjonsanlegg blir gitt i Byggforskerien, her er noen ettergitt:

- Store kanaler, store vifter, lave turtall og lave lufthastigheter.
- Små trykkfall over komponenter
- Komponenter med høy dempningsverdi
- Lyddempende enheter vanligvis plassert nære støykildene og ved kanalåpninger til rom

For å unngå støy utenifra fra å trenge inn i bygningskroppen er det viktig at bygningsmaterialene gir god nok lydisolasjon. Når man snakker om å stoppe luftbåren støy utenifra, brukes begrepet lydreduksjon(R_w) for de forskjellige bygningskonstruksjonene. Det skal oppnås en lydreduksjon på 55 dB for veggene og 40 dB for vinduene i flytårnkabinen, gitt av Avinors tårnnorm[17].

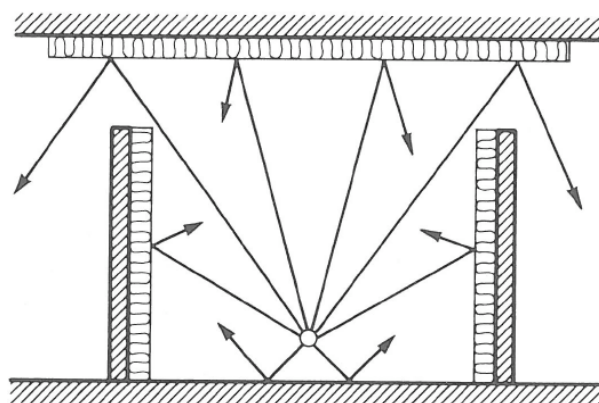
Ofte er annen lyddemping og andre akustiske tiltak, som teppelegging eller tekstiler på vegger, en kilde til et forverret atmosfærisk innneklima. Dette fører til større vanskeligheter for renhold og fjerning av partikler og støv, og mikrobielt liv får bedre levevilkår.

Det finnes ikke nok dokumentasjon om støy til å innføre grenseverdier for innvirkningen på evnen til prestasjon og ytelse[8].

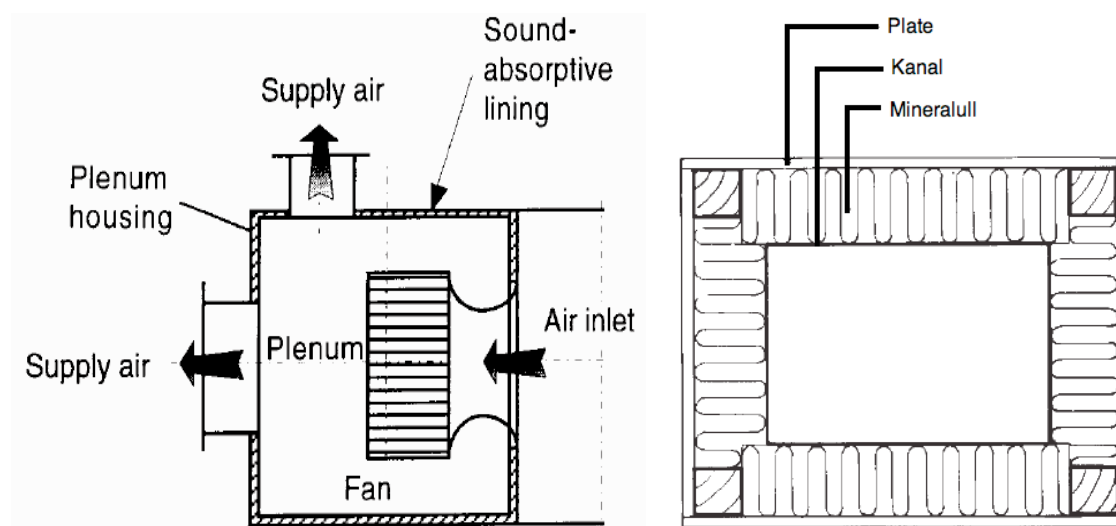
2.1.3 Lydisolering

Dersom det er sjenanse med støy fra vifter og ventilasjonsanlegg vil det kunne hjelpe å installere lydempere. Lydempere bør plasseres så nærme lydkildene som mulig, men i en slik avstand at luftstrømmen har en stabil fart når den når lydempere[10]. Lydfellen vil drepe lyden på veien gjennom ventilasjonssjakten, og sørge for at støy ikke slipper inn i rom hvor det oppholder seg mennesker. Lyddemping skjer enten ved refleksjon, absorpsjon eller transmisjon, og ofte en kombinasjon av disse fenomenene.

Det finnes to forskjellige typer lydfeller; aktive og passive. Passive lydfeller sørger for å dempe lyden ved avskjerming(figur 4), innbygging av lydkilden(figur 5), større kamre og ved hjelp av materialer som absorberer lyden. Lyden blir altså hindret på sin vei, slik at lyden ikke kommer med initiell styrke ut av sjaktene. Isolering på utsiden av ventilasjonssjakten er også en mulighet for å dempe støy til omgivende rom(figur 6)[18].

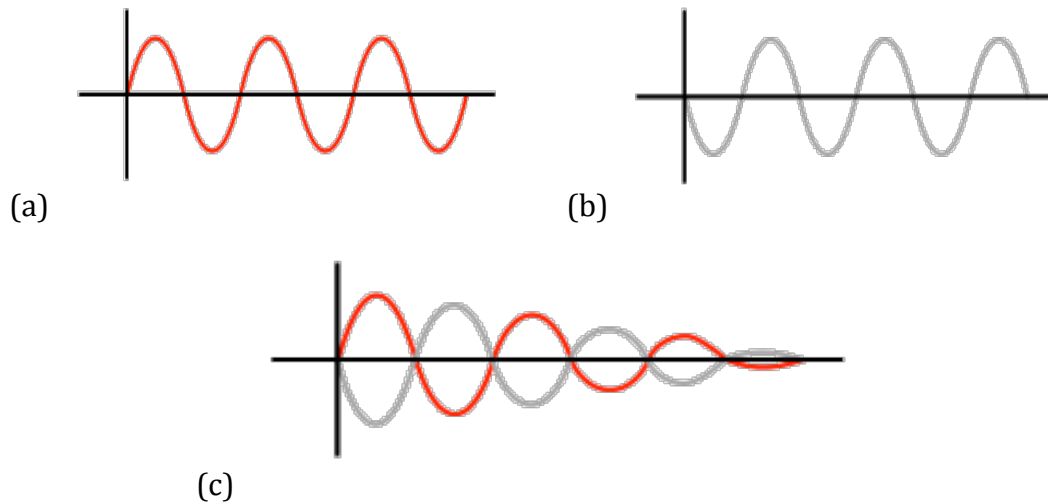


Figur 4: Lydreduksjon av lydkilde ved avskjerming og refleksjon[18]



Figur 5 og 6: Lydreduksjon ved innebygging av lydkilden[19], og isolering av ventilasjonssjakt[16]

Aktive lydfeller er av en mer avansert grad, og er spesielt effektive mot lavfrekvent lyd. En aktiv lydfelle genererer lyd signaler som er ute av fase i forhold til de som er i ventilasjonssjakten, slik at lydbølgene blir jevnet ut[18]. Dette er vist i figur 7. Lydbølgene(a) fra lydkilden blir møtt av motlydbølgene(b) som kommer fra den aktive lydfellen, slik at de kansellerer hverandre(c).



Figur 7: Aktiv lydfelle [20]

For tårnkabinens ventilasjonskanaler er det installert passive lydfeller på både tillufts- og avtrekksside. Dette er vist i figur 13 i avsnitt 2.2.4 om luftfiltre.

2.2 Atmosfærisk inn klima

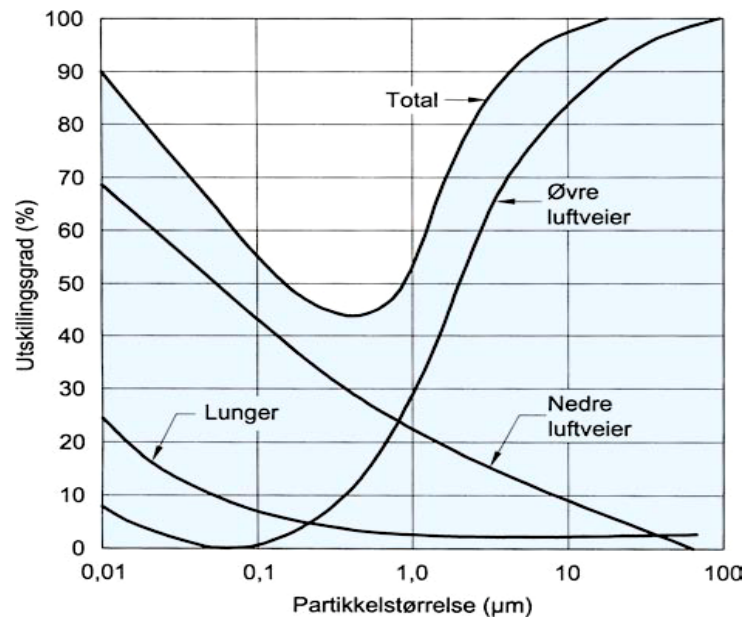
Atmosfærisk inn klima omfatter kvaliteten på luften innendørs, og er av betydning for respirasjon og sykkelighet i luftveiene. Respirasjonens formål er å bringe oksygen rundt i kroppen for å bidra til forbrenning og å fjerne CO₂ som er blitt dannet der. Luften rundt oss består av forskjellige gasser og partikler, samt biologisk og kjemisk luftbåren forurensing som partiklene inneholder[18]. Kvaliteten på inneluften blir påvirket av menneskelig aktivitet, emisjoner fra materialer og inventar i bygningen samt fra HVAC-anlegget[15]. Vi puster inn store mengder luft i løpet av dagen, omtrent 15 kg til sammen på et døgn, noe som tilsvarer ca. 87 % av total biologisk masse som passerer gjennom kroppen. Mennesket befinner seg innendørs 90 % av levetiden, og dermed er det viktig at kvaliteten på luften innendørs er av god kvalitet, og ikke inneholder for store mengder skadelige gasser eller partikler[10].

For flyplasser er det ofte eksterne forurensingskilder som råder. Dette vil si betydelige, lokale emisjoner som oppstår ved take-off og landing, lokal bil/buss/taxi-trafikk, drivstoff-transport og lagring, samt behandling og service på fly.

2.2.1 Svevepartikler

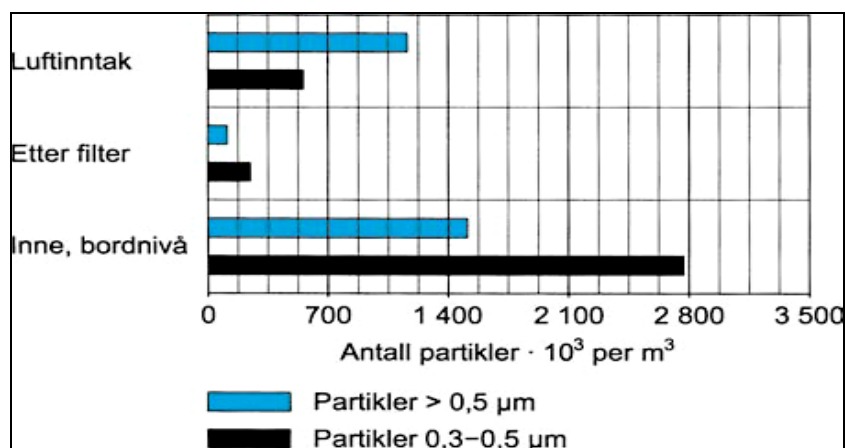
De type partikler som ofte kan finnes i luften er organisk materiale, bakterier, sporer, leire og fragmenter av metaller. Partiklene som er i atmosfæren varierer i størrelsen 100 µm til mindre enn 0,01 µm. Det går et skille mellom fine og grove partikler, og grensen ligger et sted mellom 1 og 3 µm[18]. Denne inndelingen blir ofte brukt i forbindelse med klassifisering av filtre. En annen inndeling som blir hyppig brukt for partikler, er PM_x. Luftbårne partikler mindre enn 10 µm er her gitt som PM₁₀, partikler mindre enn 2,5 µm er gitt som PM_{2,5} og PM₁ gjelder for partikler mindre enn 1,0 µm.

Det helsemessige problemet med svevepartikler ligger i innånding av de partiklene med diameter under 10 µm. Disse ultrafine partiklene kan bære med seg kjemiske stoffer, og kan trenge inn i blodårene via lungevevet og dermed skade andre organer. Prosessen med å fjerne partiklene er langsom, og i verste fall kan det forårsake respiratoriske problemer eller skader på hjertet. De medbrakte kjemiske stoffene kan normalt føre til infeksjoner, hodepine og hjertesykdommer [8, 10]. Forskning har lenge vist en sammenheng mellom eksponering for partikler mindre enn 2,5 µm og utvikling av helseproblemer, som lungekreft og hjerte- og karsykdommer[21]. Figur 8 viser hvordan organene skiller ut partikler av forskjellig størrelse som kommer ned luftveiene. Grafene viser at organene takler utskilling dårligst av partikler i størrelsesorden 0,1-1 µm[22].



Figur 8: Partikkelutskilling i organene[22]

Selv om deler av partikkelinnholdet innendørs stammer ifra utendørs forurensing, er det selv i byer forurensingskildene inne som er dominerende. Dette vises i figur 9, der vi kan se at det er færre partikler ved luftinntaket enn innendørs. Inneluften inneholder også normalt andre partikler enn hva som finnes utendørs. Dette vises blant annet i diagrammet, hvor en ser at forholdet mellom små partikler inne og ute er større enn for de store partiklene.



Figur 9: Eksempel på målte partikelmengder[22]

En studie[23] gjort i flytårnet på hovedflyplassen i Athen, Hellas, viste at konsentrasjonen av partikler (PM_{10} og $\text{PM}_{2,5}$) lå over de anbefalte faglige normene som er gitt, vist senere i avsnitt 2.2.3. Studiet viste også at partiklene oftere enn normalt originerte fra uteluften. Dette viser at konsentrasjonen av partikler er høyere ved flyplasser, og krever derfor god rensing av uteluft som brukes til ventilering i flytårnet.

2.2.2 Gasser

Her er de mest vanlige forurensingsgassene som opptrer i inneluften:

Karbondioksid(CO₂)

Karbondioksid er et produkt av vår egen metabolisme og blir emittert fra kroppen via respirasjon. Et menneske vil på en time produsere 15-20 liter karbondioksid. Ved høye konsentrasjoner i et rom vil okkupanter kunne føle søvnighet, hodepine, sjenerende lukt og oppleve lavere effektivitet i arbeidssituasjoner. CO₂-nivået er en god indikator på nødvendig tilført friskluft fra ventilasjonsanlegget kontra tettheten av okkupanter og metabolsk aktivitet[10].

CO₂-nivået har i tidligere studier[23, 24] vist seg å være høye i tårnkabinen, da antall personer har vært mange i forhold til størrelsen på rommet.

Flyktige organiske forbindelser

Flyktige organiske forbindelser(VOC), eller total VOC(TVOC), slippes ut som gasser fra visse faste stoffer eller væsker. Maling, bygningsmaterialer, kontorutstyr og rengjøringsmidler er eksempler på produkter med potensiell fare for emmitering av VOC. Ofte er dette som et resultat av samspill med fuktighet. VOC omfatter en rekke kjemikalier som kan ha kortsiktige eller langsiktige skadelige helseeffekter. Negative effekter av eksponering er av varierende grad, fra irritasjon i øyne, nese og hals, til skader på lever, nyrer og sentralnervesystemet[8, 10].

Særlig vil VOC oppstå på flyplasser ved flyenes take-off og landing. Ufullstendig forbrenning av kerosene fører til emmitering av store konsentrasjoner av VOC[24].

Formaldehyd

Formaldehyd er en organisk forbindelse, og er å finne i flere produkter, som isoleringsmaterialer, sponplater og tekstiler. Forbindelsen kan gi irritasjon i øyne, nese og hals, svimmelhet og muligheter for utvikling av kreft[25].

Radon

Radon er en gass som avgis fra grunnstoffet radium, og kan ofte komme fra steingrunnen brukt som fundament for bygningen eller enkelte bygningsmaterialer. Radon kan brytes ned til radondøtre, som fester seg til små luftbårne partikler. I motsetning til gass kan som nevnt partikler trenge seg inn i respirasjonssystemet, og radondøtre er derfor sett på som farligere enn selve gassen. Faren for å få kreft øker ved eksponering for strålingen som kommer fra radon og radondøtre[10].

Karbonmonoksid

Karbonmonoksid er resultatet av ufullstendig forbrenning som ved flyavganger og landinger, og er et problem særlig nær svært trafikkerte veier. Karbonmonoksid som finnes innendørs er som oftest et resultat av utvendig forurensing. Gassen kan hemme tilførsel og transport av oksygen i blodet[8, 10].

Nitrogendioksid

Nitrogendioksid er en meget skadelig gass, men det finnes i dag i Norge få kilder som gir betydelig utslipp innendørs. Særlig blir tobakksrøyking sett på som den største årsaken til forurensing innendørs. Astmaanfall, redusert lungekapasitet og bronkitt er noen av helseeffektene ved eksponering for nitrogendioksid[8, 10].

Ozon

Ozon er en gass som blir dannet ved at VOC i avgassene fra kjøretøy blir utsatt for sterkt sollys, samt at enkelte kopimaskiner og printere kan føre til utslipp innendørs. Derfor er det først og fremst utendørs forurensing som påvirker innendørs mengde ozon tilstede. Ved reaksjon kan ozon danne nitrogendioksid[8, 10].

2.2.3 Evaluering av luftkvalitet

Forurensinger i luften blir målt i mengden av gass eller partikler som er til stede. Konsentrasjonen i de forurensende områdene kan begrenses til et akseptabelt nivå ved å enten fjerne eller minimere emisjonene fra forurensingskilden, eller ved å ventilere eller filtrere i enkelte tilfeller.

Komfortkravene er bestemt av kriteriet for lukt, som for eksempel kroppslukt, matlukt, samt av grenseverdier gitt for hvor forurensinger gir irriterte øyne, hud eller andre ubehageligheter. Normalt har nivået av CO₂ vært indikerende parameter for kvaliteten på luften når personer er den dominerende kilden til lukt[11]. Ofte ser man på innelufts- kontra uteluftskonsentrasjonen av forurensing, som her for anbefalte CO₂-konsentrasjoner inne:

Tabell 3: Anbefalte CO₂-konsentrasjoner høyere enn utendørs konsentrasjon[15]

Kategori	Forventet andel misfornøyde i %	CO ₂ -konsentrasjon i PPM
1	15	350
2	20	500
3	30	800
4	> 30	> 800

Den generelle, anbefalte normen til CO₂-konsentrasjonen ligger på 1800 mg/m³, noe som tilsvarer 1000 ppm[26]. CO₂ i seg selv gir ikke negative utslag før en konsentrasjon på 10000 ppm passerer[11], men det er viktig at minimumskravet oppleves som tilfredsstillende. Kravet til CO₂-konsentrasjon i flytårnkabinen er satt til å være maksimum 800 ppm, gitt av Avinors tårnnorm[17].

Flere av de andre gassene som finnes innendørs vil kunne ha mye å si for inneklimaet. Hygieniske grenseverdier blir satt av myndighetene basert på hva som vanligvis er tilgjengelig av tekniske løsninger og ressurser i landet[18].

Selv om det er langt fra enighet på området, vises her en oversikten over grenseverdier som er satt for gasser for forskjellige tidsperioder, vist i tabell 4[8, 10, 27]:

Tabell 4: Anbefalte faglige normer for konsentrasjon av gasser i luften

Forurensing	Symbo l	Anbefalt norm*	Anbefalt norm2**	Anbefalt norm3***
		(2003)	(2006)	(2008)
Radon	<i>Rn</i>	< 200 Bq/m ³	100 Bq/m ³	-
Formaldehyd	<i>HCHO</i>	60 µg/m ³	50 µg/m ³	100 µg/m ³
Nitrogendioksid	<i>NO2</i>	100 µg/m ³	40 µg/m ³	100 µg/m ³
Ozon	<i>O₃</i>	-	50 µg/m ³	-
Karbonmonoksid	<i>CO</i>	10 mg/m ³	2 mg/m ³	25 mg/m ³
Flyktige organiske forbindelser	<i>VOC</i>	Bør ikke forekomme	Bør ikke forekomme	<< 25 mg/m ³

* NAAF[28], **AIR[10], ***FHI[26]

Det er ikke bare innholdet av gasser i luften som påvirker dens kvalitet. Også grenseverdier blir satt for konsentrasjon av partikler i lufta avhengig av størrelsen[10], vist i tabell 5:

Tabell 5: Anbefalte faglige normer for konsentrasjon av partikler i luften

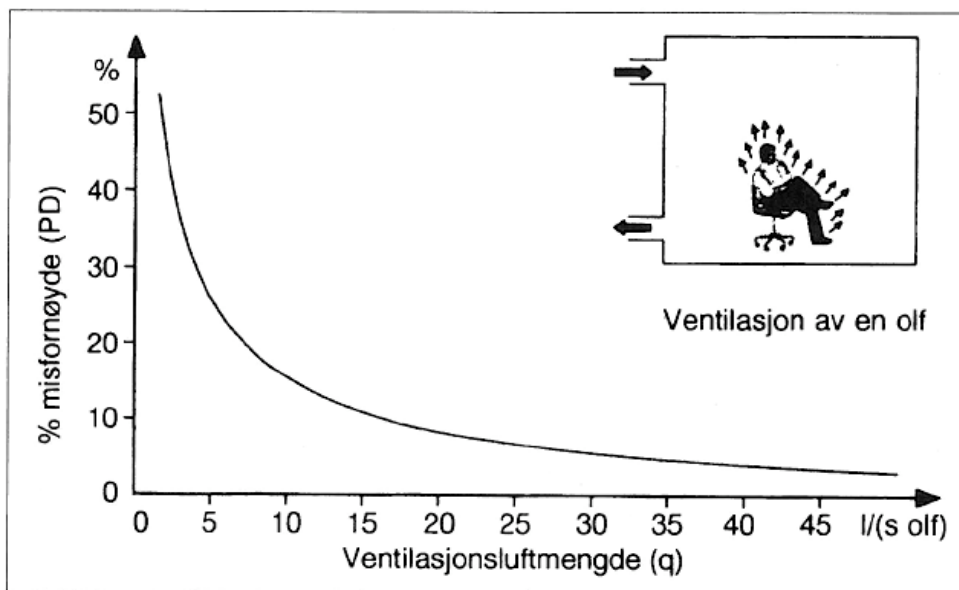
Partikkelstørrelse	Symbol	Anbefalt norm
Luftbårne partikler < 10 µm	PM10	40 µg/ m ³
Luftbårne partikler < 2,5 µm	PM2,5	15 µg/ m ³

For å fjerne forurensende utslipp fra rom hvor det kreves et godt inn klima, kan som sagt løsningen være ventilering av rommet. Tabell 6 inneholder anbefalte luftmengder gitt per person eller gulvareal. Verdiene som er gitt forutsetter at eneste forurensing til stede er fra personer og bygningsmaterial.

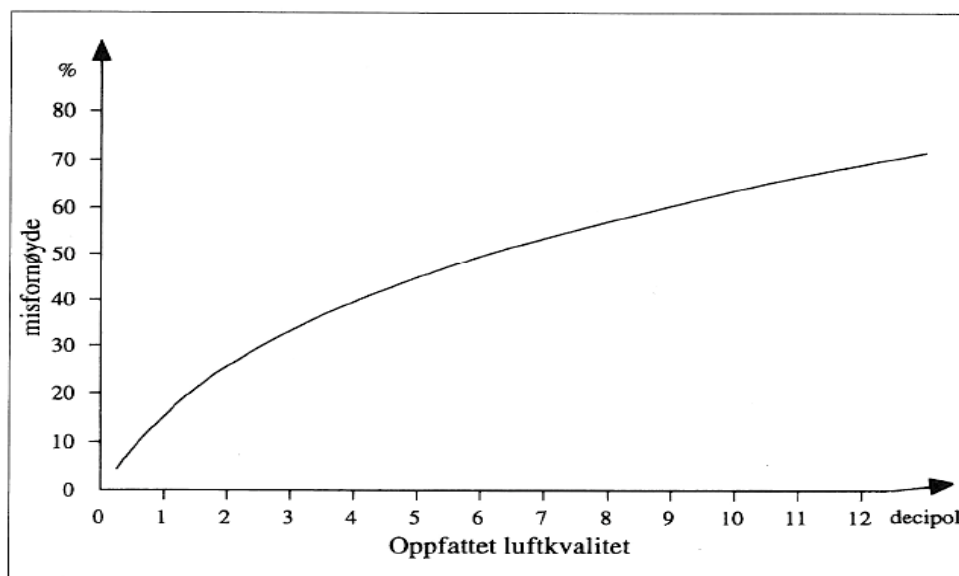
Tabell 6: Anbefalte luftmengder for yrkesbygninger[15]

Kat.	Forventet andel misfornøyde, %	Luftstrøm per person l/(s*person)	Luftmengde for forurensende utslipp fra bygningen l/(s*m ³)		
			Svært lavt forurensende bygning	Lavt forurensende bygning	Ikke lavt forurensende bygning
1	15	10	0,5	1	2
2	20	7	0,35	0,7	1,4
3	30	4	0,2	0,4	0,8

Det har blitt gjort et arbeide med å forsøke å lage en måte å vurdere luftkvalitet på. Metoden gjør det mulig å beregne nødvendig tilførsel av friskluft og opplevd nivå av forurensing ved hjelp av enhetene olf og decipol. Olf er et mål på emisjonen av forurensinger fra en voksen, stillesittende person som føler termisk komfort. Forutsetningene er at personen tar ett bad hver 1.6 dag og skifter undertøy hver dag. En decipol er forurensingen som oppleves fra en forurensingskilde på 1 olf i et ventilert rom med frisk tilluft på 10 l/s. Altså er decipol en enhet på grunnlag av subjektive, individuelle vurderinger[11]. Figurene nedenfor viser resultater gjort på olf og decipol basert på laboratorie- og feltforsøk.



Figur 10: Misfornøydhets forårsaket av en kildestyrke på en olf, som funksjon av lufttilførselen[11].



Figur 11: Sammenhengen mellom forventet antall utilfredse og luftforurensingen i decipol[11].

2.2.4 Filtrering i ventilasjonsanlegg

Filtre i ventilasjonsanlegg er installert for å rense luft som har en konsentrasjon av forurensing på opp til omtrent 2 mg/m³ luft. Denne reduksjonen av konsentrasjonen av støv og partikler er nødvendig på bakgrunn av flere årsaker:

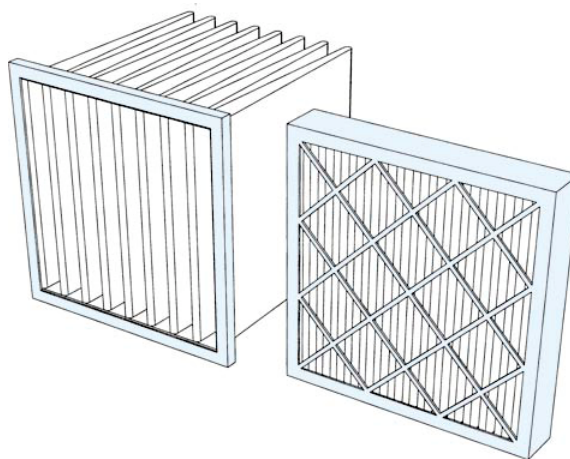
- Høyt støv- og partikkelinnhold i rom kan føre til en reduksjon av komfort og kan føre til helserelevante problemer, samt at renholdskostnader i rommene øker.
- Kvaliteten på ventilasjonsluften blir dårligere på grunn av tilsmussing av sjakter og kanaler.
- Driftsproblemer kan lettere oppstå dersom kanaler og vifter blir tilsmusset. Dette kan også gå utover mengden transportert luft.
- Virkningsgraden av varmeovergangen kan bli redusert dersom varmebatterier og gjenvinningsaggregat blir tilsmusset og det oppstår korrosjon.

På bakgrunn av at det er flere typer forurensinger i luften, finnes det flere måter å fjerne det på. Filtrene er delt inn i grov-, fin- og mikrofiltre på bakgrunn av utskillingsgraden, en oversikt er vist i tabell 7.

Tabell 7: Inndeling av filtertyper

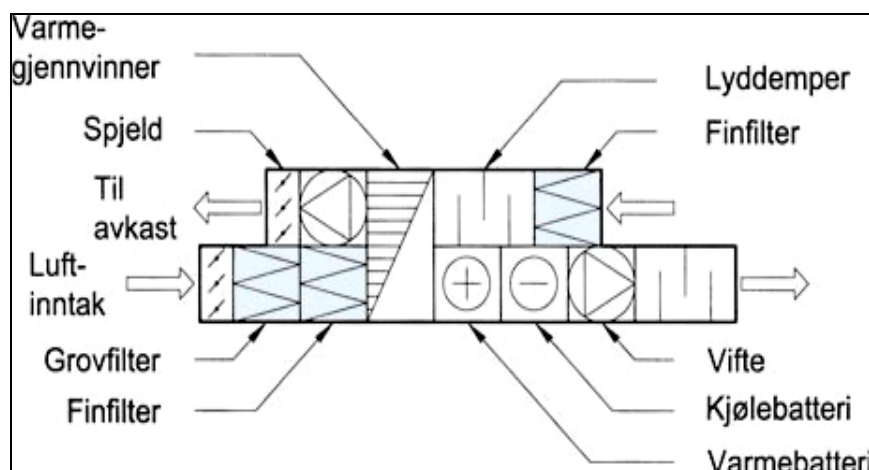
	Grove filtre	Fine filtre	Mikrofiltre
<i>Filtertype</i>	Pose- eller planfiltre	Pose- eller kompaktfiltre	Kompaktfiltre
<i>Bruksområde</i>	Partikler større enn 5 µm. Effektiv mot pollen.	Partikler større enn 0,1 µm. Effektivt mot partikler, røyk, bakterier.	I lokaler med store til ekstreme krav til filtrering.
<i>Materialer</i>	Glassfiber eller syntetisk fiber	Glassfiber eller syntetisk fiber	Glassfiber

Figur 12 viser de to filtertypene, pose- og kompaktfiltre, samt komponentene i et ventilasjonsanlegg. Det bør alltid plasseres et grovfilter i, eller rett etter luftinntaket for å unngå den største forurensingen i å trengte inn i ventilasjonssjaktene. Plasseringen av et finfilter nærme luftinntaket sørger i tillegg for at aggregatet holdes rent. Det bør også plasseres et finfilter i, eller etter avtrekket for å beskytte varmegjenvinneren, og i tillegg hindre forurensing fra avtrekksluften å komme over i tilluften før aggregatet.



Figur 12: Posefilter og kompaktfilter[22]

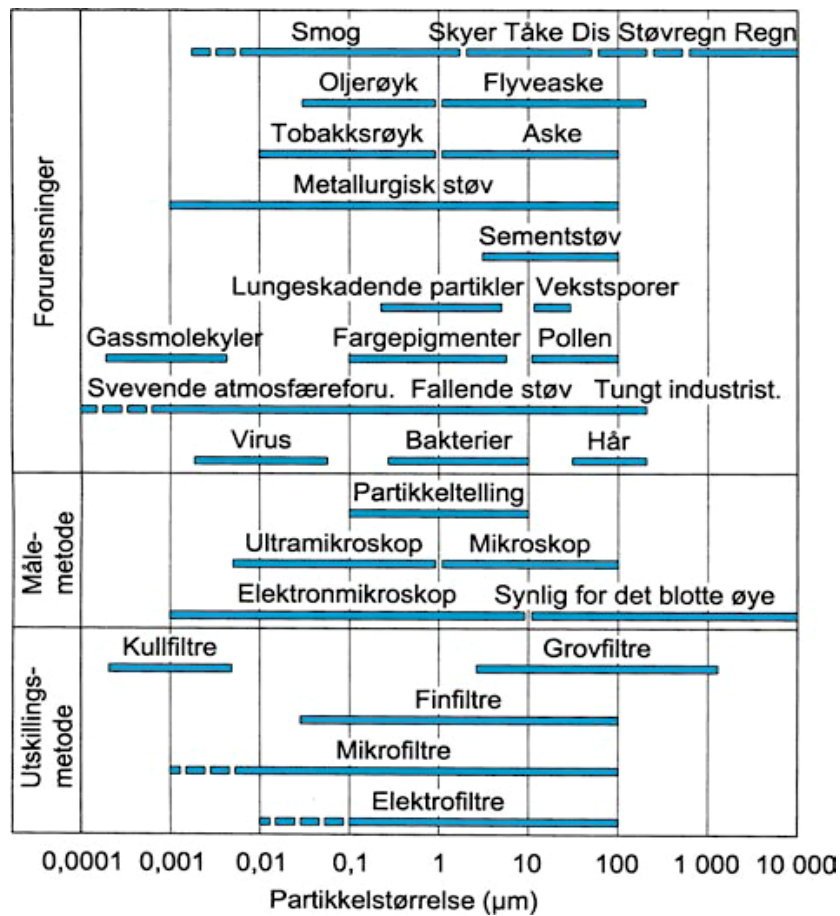
Varmegjennvinnere som installeres i ventilasjonsanlegget er i utgangspunktet der for å redusere energibehovet, men vil også være med å påvirke kvaliteten på innluften. Det finnes to typer varmegjennvinnere, regenerative og rekuperative. Regenerative gjennvinnere fører avkast- og tilluft vekselvis med varmeakkumulerende flater. Denne typen varmegjennvinner har en større varmegjennvinningsgrad, men sender deler av avkastluften inn med den rene tilluften igjen. Dermed anbefales ikke denne typen for lokaler som må oppnå ekstra god luftkvalitet. Den rekuperative varmegjennvinneren anbefales derimot i stedet, fra et inneklimatisk ståsted. Varmeoverføringen skjer gjennom tynne vegger av metall, som vil separere inn- og utluft. Dette fører til en noe lavere varmegjennvinningsgrad, men vil da ikke gi noen form for negativ innvirkning på inneklimaet[11]. Det benyttes en regenerativ, roterende varmegjennvinner i tårnkabinen for høy gjenvinnelsesgrad, og er vist i figur 13, samt i figur 39.



Figur 13: Varmegjennvinner og andre komponenter i ventilasjonsanlegg[22]

Figur 14 viser størrelser på de forskjellige forurensingene som finnes i luften, samt målemetodene og utskillingsmetodene som er vanlige å ta i bruk for de forskjellige forurensingene. For oss mennesker er det bare mulig å se partiklene som er større enn $10 \mu\text{m}$ [22].

For utskillingsmetodene er mikro-, fin- og grovfilter allerede forklart over. Kullfilter tar hånd om forurensning i gassfase, mens elektrofilter kan effektivt filtrere omtrent de samme forurensningene som finfiltrene, men i større volumstrømmer og ved et relativt lavt trykktap[18].



Figur 14: Klassifisering av partikler og filtre[22]

Nevnte studier gjort på atmosfærisk inneklime i tårnkabiner viser at det er stort behov for god filtrering. De forurensningene som var mest fremtredende i tårnkabinen var VOC(TVOC), partikler og CO₂. Dermed vil det være viktig å installere et kullfilter ventilasjonsanlegget for å fjerne VOC, i tillegg til finfilter og grovfilter for partikler.

2.3 Termisk inneklima

Det termiske inneklimaet har stor innflytelse på varmebalansen i menneskekroppen, og er delaktig i menneskers streben etter termisk komfort. Termisk komfort er beskrevet som "en sinnstilstand man er i dersom man uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelsene"[11]. Det finnes faktorer som har påvirkning for om det oppnås termisk komfort. Disse parametrene er basert både på personen og klimaet hvor personen befinner seg.

En flytårnkabin er litt spesiell i sin utforming og krever ekstra oppfølging med å forsyne flygelederne med et termisk inneklima som er godt nok. Studier har vist at forholdene når det kommer til termisk komfort er dårlige for flygelederne i kontrolltårn[9]. Også samtaler med flygeledere i eksisterende flytårnkabin ved Trondheim flyplass, Værnes, har vist de samme indikasjonene på et utfordrende termisk inneklima[29].

2.3.1 Personparametre

Aktivitetsnivå

Aktivitetsnivået til mennesker er med på å bestemme energiomsetningen, eller stoffskiftet i kroppen, og er gitt i enheten W/m^2 . Også den relative enheten *met*, som kommer fra ordet *metabolisme*, eller stoffskifte, blir brukt som enhet. Per definisjon er forholdet $1 \text{ met} = 58,15 \text{ W}$ per m^2 kroppsoverflate. I tabell 8 vises stoffskiftet for forskjellige aktiviteter. For å oppnå termisk komfort må varmeavgivelsen være lik varmeproduksjonen for kroppen. Dersom dette ikke oppnås, vil kroppens kjernetemperatur økes eller senkes. De viktigste organene, som for eksempel hjertet, skal holdes konstant på omtrent 37°C [11, 18]. Dette er et viktig kriterium for termisk komfort.

Tabell 8: Stoffskifte for forskjellige aktiviteter

Aktivitet	Stoffskifte	
	W/m^2	met
Liggende	46	0,8
Stillesittende aktivitet	70	1,2
Stående aktivitet	116	2,0

For flygelederne vil stillesittende aktivitet beskrive arbeidet deres best, som da gir et stoffskifte på rundt 70 W/m^2 , eller 1,2 met, og er satt som 1,0 met i SIMIEN.

Bekledning

Den isolerende effekten av bekledning er viktig for utvekslingen av varme med omgivelsene. Den termiske motstanden mellom overflaten av huden og klærnes utvendige overflate, kalt isolasjonsverdien, blir gitt i m^2K/W . Man kan også bruke den relative enheten *clo*, hvor 1 clo tilsvarer nødvendig isolasjon for å holde en

stillesittende person komfortabel ved en operativ temperatur på 21 °C. 1 clo er gitt som 0,155 m²K/W [11, 18]. I tabell 9 er isolasjonsverdien gitt for forskjellig bekledding.

Tabell 9: Isolasjonsverdier for forskjellig bekledding

Bekledding	Isolans Icl	
	clo	m ² K/W
Shorts, T-skjorte, lette sokker, sandaler	0,3	0,05
Bukser, genser, skjorte, sko	0,9	0,14
Jakke, vest, genser, skjorte, bukser, sko	1,5	0,230

Oppholdstid

Lengden av tidsperioden en person oppholder seg i et rom med et gitt termisk inneklima.

2.3.2 Klimaparametre

Luftens tørrkuletemperatur

Luftens tørrkuletemperatur er et annet navn på lufttemperaturen, og er som oftest det som benyttes for å beskrive de termiske omgivelsene rundt oss. Temperaturen til luft blir målt nøyaktig med et tørt, strålingsbeskyttet termometer[11].

Middelstrålingstemperatur

Omkringliggende flater og objekter med forskjellig overflatetemperatur fører til en strålingsutveksling med kroppen. Middelstrålingstemperaturen kan måles ved å ta gjennomsnittet av temperaturene på alle flater i rommet, sett opp mot deres overflateareal. Middelstrålingstemperaturen kan også beregnes ut ved å måle globetemperaturen[30]. Denne temperaturen vil være veldig aktuell å måle for tårnkabinen, da det er store glassflater som påvirkes stort av uteforholdene.

Luftfuktighet

Luftens vandampinnhold beskrives oftest med relativ luftfuktighet (% RH). Relativ fuktighet er mengden fuktinnhold i luften sammenlignet med hva luften maksimalt kan inneholde ved en gitt temperatur. Fuktigheten er med på å påvirke hva som er det akseptable temperaturområde for okkupasentene. Dette er fordi nivået av fuktigheten påvirker kroppens egen evne til å regulere varmeavgivelse ved fordunsting gjennom huden[31]. For situasjoner med lav temperatur og lav fuktighet vil fordunsting skje raskt, slik at hurtig avkjøling kan føre til kuldefornemmelse. Høy temperatur og høy fuktighet gir motsatt effekt, da hemming av fordunsting oppstår, og kroppen vil ha problemer med å oppnå stor nok varmeavgivelse. Et av kriteriene for termisk komfort er at hudvåthetsgraden ligger under 25 %[11].

Foretrukket mengde luftfuktighet ligger på rundt 40 %. Høyere nivåer av fuktighet

enn 70 % føles varm og klam, samt kan over lang tid føre til økt forekomst av mikrobiell vekst. Når det er lavere fuktighet enn 20 % henviser man ofte til fenomenet "tørr luft". De vanligste symptomene som oppstår ved for lav relativ fuktighet er tørr hud og luftveier, kløe, øyesvie og utslett[2]. Ved relativ fuktighet ned under 10 %, vil slimhinner tørkes inn i luftveiene, og de mister sin opprinnelige funksjon[32]. Det er også sannsynlig at andre faktorer spiller inn på innemiljøet sammen med luftfuktigheten og gir en forsterket, negativ effekt.

Det anbefales å begrense den absolutte fuktigheten til maksimalt 12 g fuktighet per kg luft[15]. Fuktigheten bør særlig i kalde perioder ikke være for høy, da det kan føre til dannelse av kondens og mugg. Den nederste anbefalte grensen ligger på 20 % RH, men ofte blir den liggende godt under i eksempelvis yrkesbygg vinterstid. Utenom personene som oppholder seg i rommet er det sjeldent noen andre kilder som tilfører fuktighet til luften. En person tilfører omtrent 0,03 kg/h fuktighet ved lav aktivitet, altså som en flygeleder på jobb, og denne mengden hjelper lite for å nå et mer akseptabelt nivå[11].

Tabell 10 gir anbefalte kriterier for dimensjonering av befukting og avfukting i oppholdsrom, gitt i NS-EN 15251:2007[15].

Tabell 10: Dimensjonerende kriterier for fuktighet i oppholdsrom[15]

Type bygning/rom	Kategori	Forventet andel misfornøyde, %	Dimensjonerende relativ fuktighet for avfukting, %	Dimensjonerende relativ fuktighet for befukting, %
Rom der fuktighetskriteriene er bestemt av personbelastningen.	1	< 15	50	30
	2	< 20	60	25
	3	< 30	70	20
	4	> 30	> 70	< 20

Dersom det er behov for befukting, som det ofte kan bli for bygninger i kaldt klima, bør en damp-befukter benyttes. Den har en fordel i forhold til andre typer befuktere ved at den ikke trenger like mye renhold, og luften frakter ikke like mye kjemikalier. Andre befuktere pleier også å gi gode levevilkår til mikrobielt liv. Uansett type befukter er renhold en veldig viktig faktor for godt inneklima ved bruk av befuktere. Sentrale befuktere frarådes, slik at det bør tas i bruk lokale befuktere ved aktuelle rom med behov for høyere luftfuktighet[11, 32].

Dersom innsiden av vinduene i et rom holder en lavere temperatur enn duggpunkttemperaturen, og det i tillegg er høy luftfuktig, vil det kunne oppstå kondens på innsiden av vinduene[11]. Dette vil kunne skape store problemer for sikten for flygeledeerne, og må unngås for enhver pris. Med nyere vinduer er dette sjeldent et problem som oppstår.

Relativ luftbevegelse

Hastigheten til luften kan ha noe å si for følelsen av termisk komfort. Dersom temperatur og fuktighet er tilfredsstillende, vil en lavere lufthastighet være å foretrekke. En høyere hastighet kan virke behagelig dersom luften er varm eller fuktig, men det kan oppfattes som trekkfullt om luften er kald. Krav til lufthastigheten er satt til 0,15 m/s om vinteren og 0,25 m/s om sommeren[33].

2.3.3 Evaluering av termisk komfort

En betingelse for oppnådd termisk komfort er at kroppen er i termisk nøytralitet med omgivelsene. Det vil si at man ikke føler et behov for en høyere eller lavere omgivelsestemperatur. Evaluering av behovet gjøres ved å ta i bruk PMV- og PPD-indeksene, som er mål på kroppens følelse av termisk komfort[18].

Predicted mean vote (PMV)

Denne indeksen sier noe om forventet gjennomsnittlig vurdering på en syvpunktsskala for å angi hvordan mennesker føler det termiske inn klimaet[30]. Skalaen går fra hett til kaldt, som tilsier henholdsvis +3 og -3:

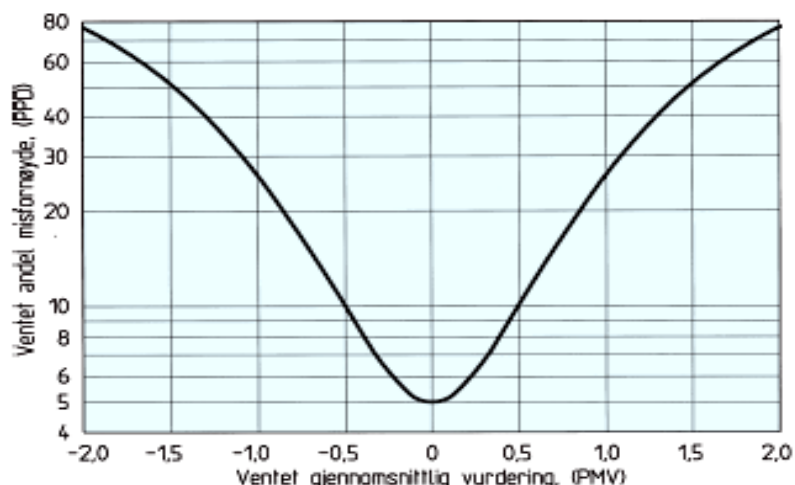
Tabell 11: PMV-indeksen

Indeks	Beskrivelse
+3	Hett
+2	Varmt
+1	Lett varmt
0	Nøytral
-1	Lett kjølig
-2	Kjølig
-3	Kaldt

Nøytral følelse av de termiske omgivelsene er gitt som 0 på skalaen, og er den tilstanden hvor personen verken vil ha varmere eller kaldere omgivelser[18].

Predicted percent dissatisfied (PPD)

PPD gir oss forventet prosentandel utilfredse i en større gruppe på bakgrunn av gitte termiske omgivelser, samt aktivitet og bekledding[30]. Hvis PMV er kjent, vil det være mulig å lese av PPD i figur 15. Det vil i følge figuren ikke være mulig å tilfredsstille mer enn 95 % av en gruppe personer, dette ved PMV=0.



Figur 15: Sammenheng mellom PPD og PMV[30]

Sammenhengen mellom PMV- og PPD-indeksene er vist i tabell 12, hvor de forventede resultatene er kategorisert ut fra forventet andel misfornøyde. NS-EN ISO 7730 anbefaler at PPD holdes under 10 %, altså innenfor kategori 1 eller 2[33].

Tabell 12: Eksempler på anbefalte kategorier for dimensjonering av bygninger med mekanisk oppvarming og kjøling[15]

Kategori	Termisk tilstand for hele bygningen	
	PPD %	Forventet middelvurdering
1	< 6	-0.2 < PMV < + 0.2
2	< 10	-0.5 < PMV < + 0.5
3	< 15	-0.7 < PMV < + 0.7
4	> 15	PMV < -0.7 eller + 0.7 < PMV

2.3.4 Termiske begrep(og krav)

De vanligste klagene på det termiske inn klimaet stammer fra lokal termisk diskomfort hvor en del av kroppen er for kald eller for varm. Dette kan komme som et resultat av trekk, strålingsasymmetri, vertikal temperaturdifferanse og for lav operativ temperatur. Dette er tilfeller som er med på å påvirker kroppens temperaturbalanse, og følelsen av termisk komfort. Et kriterium for termisk komfort er at hudtemperaturen ligger mellom 32 og 34°C[11].

Operativ temperatur

Normalt vil det være nok å måle luftens temperatur, men dersom det er større strålingskilder til stede bør operativ temperatur benyttes. Operativ temperatur regnes ut fra formelen;

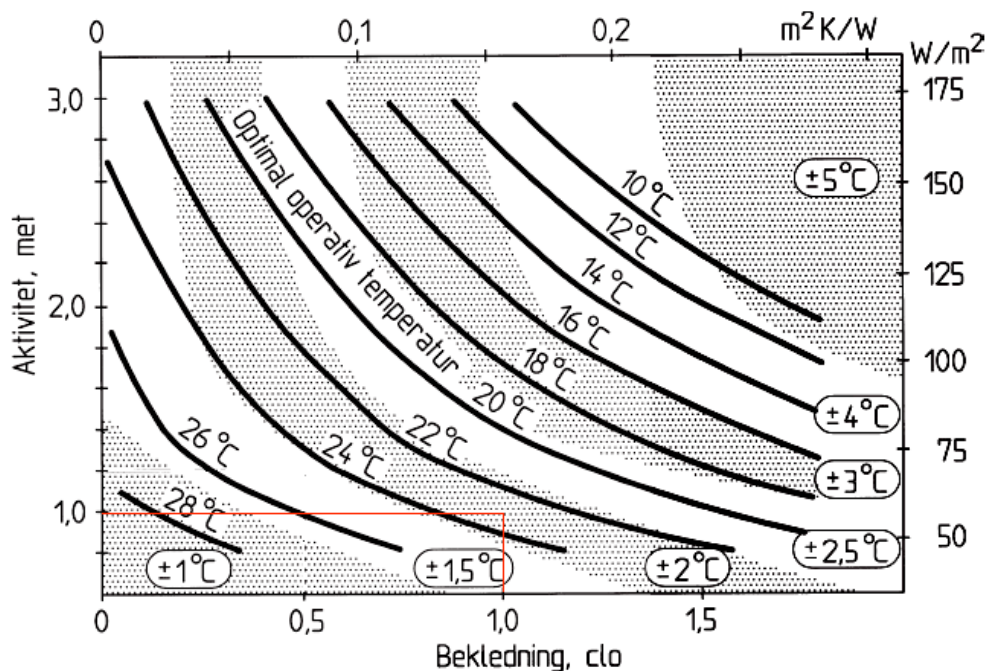
$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r},$$

hvor t_a er lufttemperaturen, t_r er middelstrålingstemperaturen, mens h_c og h_r er varmeovergangstall for konveksjon og stråling. Dersom lufthastigheten er mindre enn 0,4 m/s og middelstrålingstemperaturen er lavere enn 50°C, brukes den forenklete formelen:

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2}$$

Det vil si at den operative temperaturen er lik gjennomsnittet av lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen[11].

Optimal operativ temperatur er den innetemperaturen som flest mulig av okkupantene finner komfortabel. For en bygning med mekanisk kjøling vil den optimale operative temperaturen være satt til PMV = 0[15]. I figur 16 vises optimal operativ temperatur som funksjon av bekledding og aktivitet. For simuleringsberegninger i tårnkabinen er aktivitet og bekledding satt til å være 1 met og 1 clo for både sommer- og vinterforhold. Dette gir en optimal operativ temperatur på 23°C, vist som delingspunktet for de røde strekene i figuren. Diagrammet gir at den operative temperaturen kan variere med $\pm 2^\circ\text{C}$, og fremdeles være innenfor de optimale forholdene. Dette betyr altså i et spenn mellom 21 og 25°C.

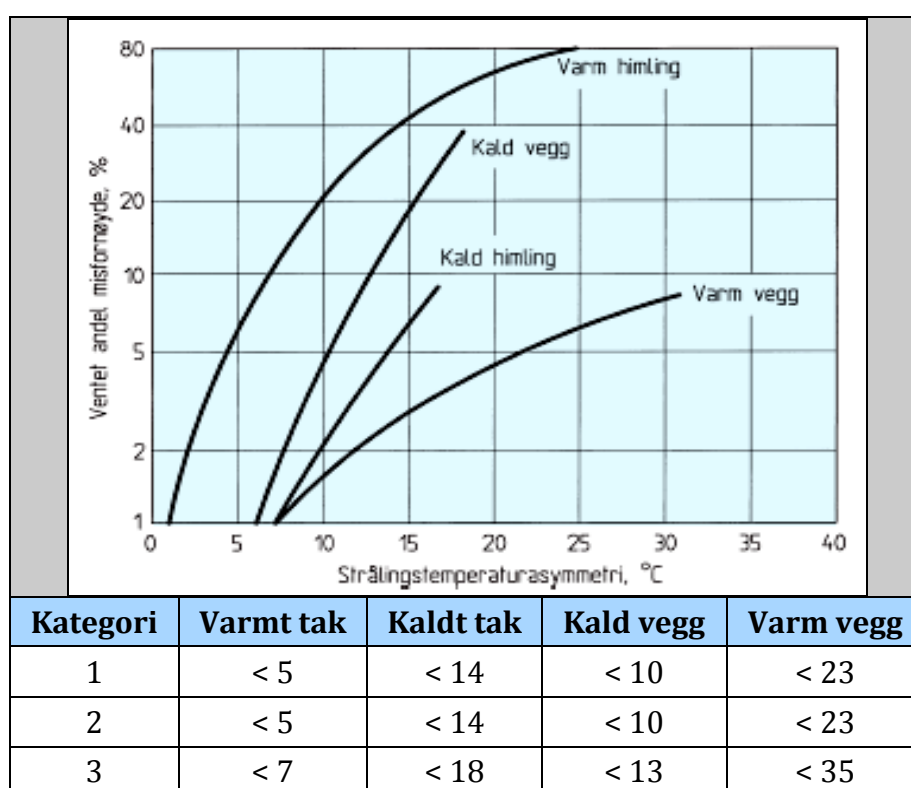


Figur 16: Optimal operativ temperatur[30]

Det er anbefalt at operativ temperatur ikke bør endres mer enn 2,2°C i løpet av en times periode, og maksimalt 1,1°C i løpet av et 15 minutters intervall innenfor denne timen[34].

Strålingstemperaturasymmetri

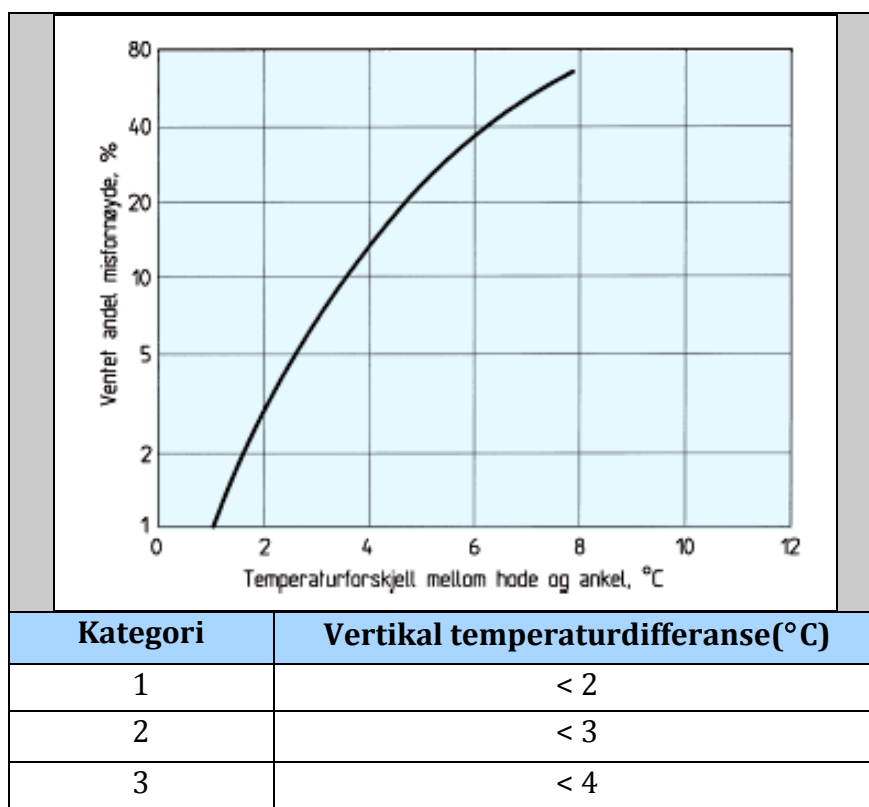
Strålingstemperaturasymmetri er differansen mellom strålingstemperaturen av to sider av en plan flate[30]. Asymmetrien oppstår når flater skaper store differanser i strålingstemperaturen i et rom. Dette kan eksempelvis oppstå på grunn av kalde vinduer eller takvarme med for høy temperatur. Strålingstrekk er noe som oppstår når strålingsasymmetrien er for stor, og det kan føles kaldt på de kroppsdelen som vender mot de kalde objektene eller flatene. Størst ubehag av strålingsasymmetri skjer ved varme tak og kalde vegger, vist i figur 17 . Tabell 13 viser grenseverdiene for strålingsasymmetri for vegg og tak i °C.



Tabell 13[15] og figur 17[30]: Strålingstemperaturasymmetri

Vertikal temperaturgradient

Vertikal temperaturgradient er forskjellen i lufttemperaturen i vertikal retning, f.eks. mellom hodet og føttene. Denne temperaturdifferansen må ikke være for stor for å unngå ubalanse i kroppstemperaturen[11]. Tabell 14 og figur 18 viser sammenhengen mellom vertikal temperaturdifferanse og PPD. Figuren viser også dette som funksjon av temperaturforskjell mellom hode og ankel og PPD.

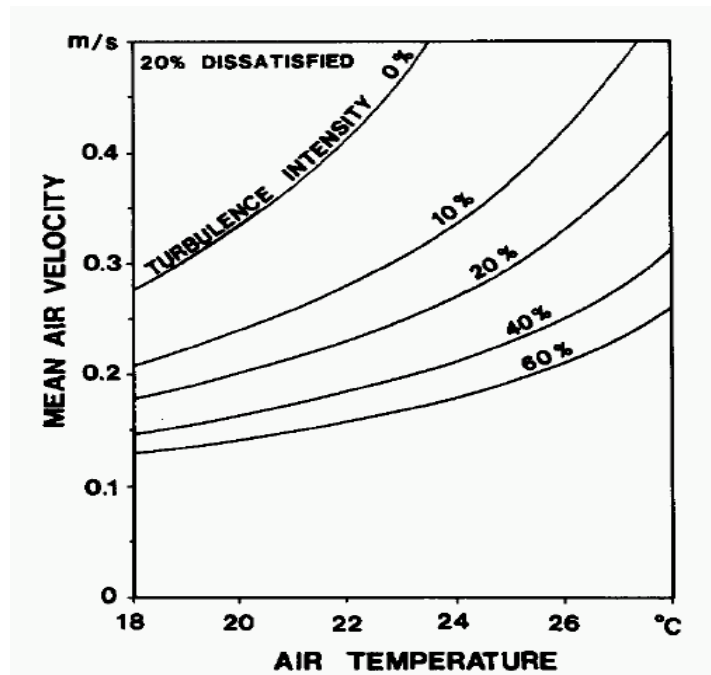


Tabell 14[15] og figur 18[30]: Vertikal temperaturdifferanse

Trekk

Slik som strålingstrekk kan oppstå, kan konvektiv trekk også det. Konvektiv trekk er en sammenheng av fuktigheten, hastigheten og temperaturen til luftstrømmene. Konvektiv trekk er altså også en lokal avkjøling av en person, og særlig intensiteten til luftstrømmene har mye å si for følelsen av trekk. Ventilasjon gir turbulente luftbevegelser, noe som fører til større ubehagsfølelse og en fornemmelse av trekk[11].

Studier har vist sammenheng mellom ubehagelig trekkfølelse og turbulensintensiteten til luftstrømmene i et rom[35]. Figur 19 viser sammenhengen mellom lufttemperatur, middelhastighet på luften og turbulensintensiteten som vil gi en prosentandel på 20% som føler ubehag med trekk. Omrøringsventilasjon utgjør normalt en turbulensintensitet på 30-60%[11].



Figur 19: Ubehagsfølelse ved konvektiv trekk[11]

Kaldras

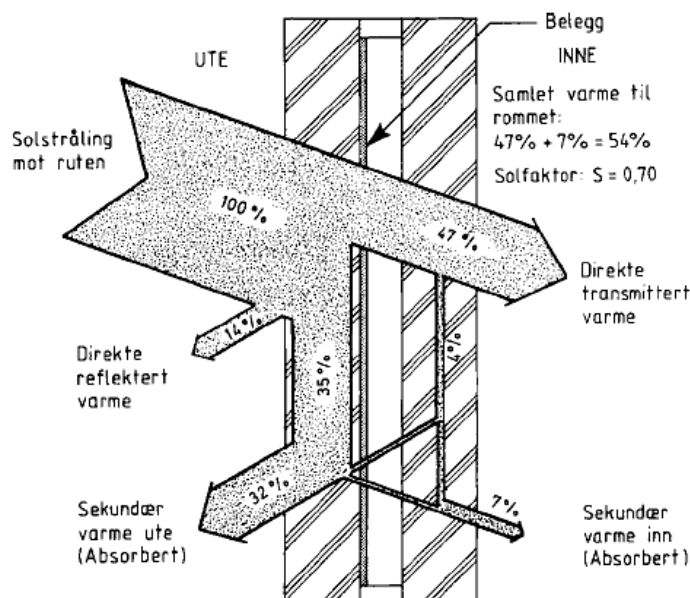
Kaldras oppstår når kalde flater som vegger eller vinduer, kjøler ned luften som legger seg inntil. Det avkjølte luftsjiktet blir da tyngre enn resten av romluften, og synker mot gulvet. Kaldraset kan forårsake trekk som følge av den kalde luftstrømmen, i tillegg til at det danner seg et kaldt sjikte ved gulvet som vil skape en høyere, vertikal temperaturgradient. I vinterperioden vil dette fenomenet skape komfortproblemer, selv med lave U-verdier for vinduer og vegger[36]. I tårnkabinen vil dette være et veldig vanlig fenomen med store vinduer. Vinduer er ofte de største kildene til kaldras.

Kaldras kan unngås på flere forskjellige måter. Den vanligste måten er å installere en varmekilde under vinduet. En konveksjonsstrøm tilført unnenifra vil stoppe kaldraset på sin vei ned, men vil ha problemer med kaldrasets akselerasjon nedover dersom vinduet er høyt. En annen mulighet er å rette varmestråling mot vinduet, slik at innsiden av de kalde flatene varmes opp, og det nærmeste luftsjiktet ikke blir avkjølt. Dette gir til gjengjeld et stort energitap gjennom vinduene. Innblåsning av varmluft under vinduet er en mulig løsning ved større vinduer, men vil føre til at oppad- og nedadgående luftstrømmer blandes og føres ut i rommet med en mer eller mindre stor impuls. Dette skaper unødvendig stor turbulens på luften i rommet, og kan føre til ubehagelig trekk[36].

Solinnstråling

Solinnstråling har innvirkning på byggets energiflyt, avhengig av årstid. Om vinteren kan sola gi et varmetilskudd som gir et mindre behov for oppvarming. I varmere perioder av året vil varmetilskuddet fra sola føre til et større kjølebehov.

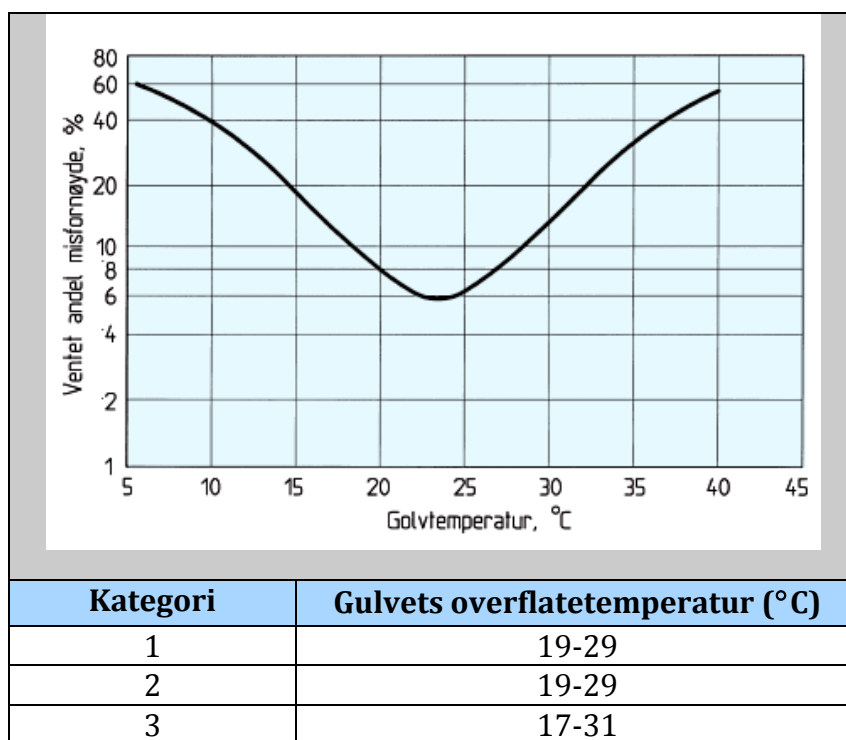
Solavskjerming er dermed viktig for å regulere innstrålingen gjennom året. I tillegg til vanlig solavskjerming som persienner og gardiner, kan det benyttes vindusglass som enten absorberer, reflekterer eller transmitterer solstrålene. Figur 20 viser et eksempel på absorpsjon, refleksjon og transmisjon i et tolags vindu[11, 37]. I tårnkabinen vil valget av vindustype ha stor innvirkning på energiflyten og det termiske innklimaet. Med store vindusarealer vil solinnstrålingen skape et stort overskudd av varmeenergi gjennom sommermånedene.



Figur 20: Absorpsjon, refleksjon og transmisjon for vindu[11]

Konduksjon via gulv

Kontakt med gulvet kan være en viktig årsak til uønsket varmeoverføring. Komfortabel temperatur på gulvet oppfattes forskjellig fra person til person, og er også avhengig av fottøyet, og gulvtypen der en ikke bruker fottøy. Gulv mot grunnen og gulv lagd av keramikk og fliser, holder ofte en lavere temperatur enn anbefalt, og kroppen kan da miste mye varme ved lengre kontakt. Optimal temperatur for gulvet ligger på omtrent 23°C for lett fottøy, som vist i figur 21. Tabell 15 gir anbefalt overflatetemperatur for gulv på bakgrunn av 3 PPD-kategorier[38].



Tabell 15[15] og Figur 21[30]: Optimal gulvtemperatur

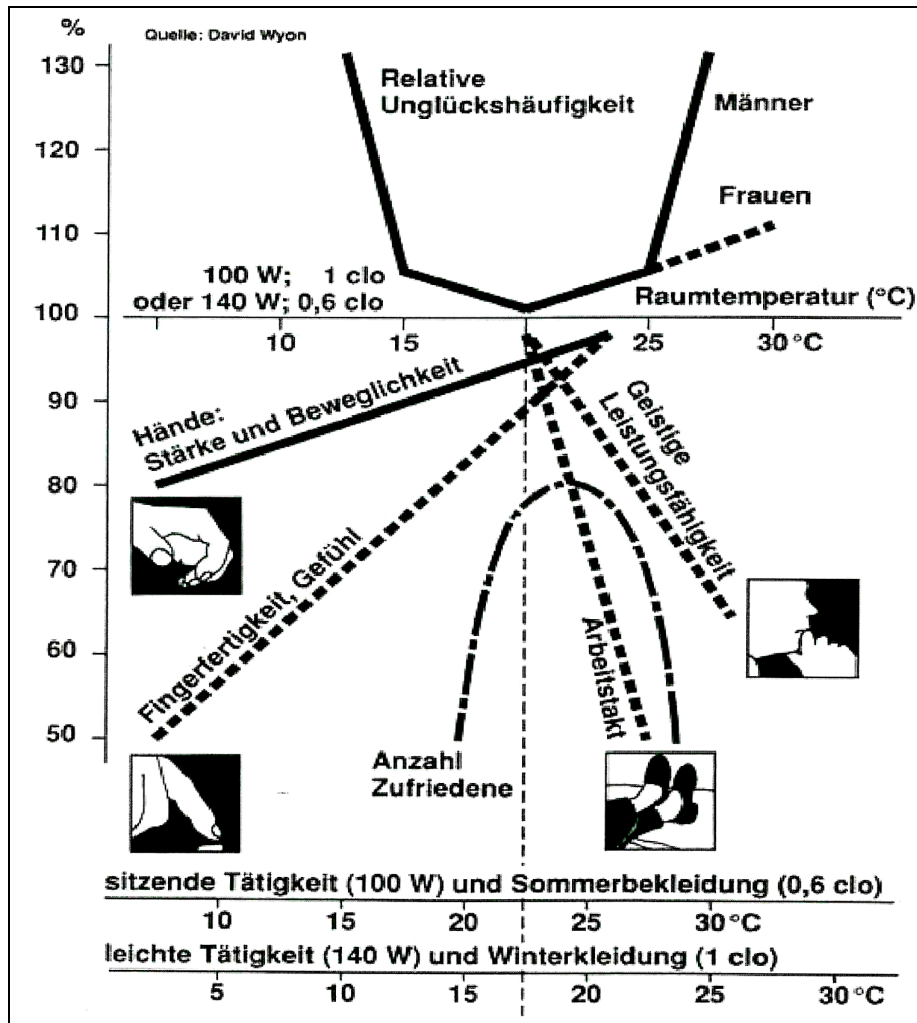
Konduksjon via gulvet i tårnkabiner er sjeldent et problem, da det ofte er gulv mot oppvarmede rom under.

2.3.5 Mental prestasjon

For flygelederne er viktigheten av god tilrettelegging for høy mental prestasjon viktig. Store arbeidsmengder og skiftende, krevende arbeidsoppgaver gir et høyt krav til termisk komfort for hver enkelt, slik at ingen føler ubehag. Dermed kan det være nyttig å se på hvordan termisk inneklima påvirker mental ytelse og prestasjon. Det kan fort oppstå konsekvenser av både for lav og for høy temperatur, særlig siden temperaturen påvirker viktige parametere som komfort og trivsel. Disse to parametrene styrer mange andre viktige forhold som arbeidseffektivitet, konsentrasjon og produktivitet[39].

Under moderate, varme forhold, vil det være naturlig å prøve å unngå at svetting oppstår ved å redusere metabolsk varmeproduksjon. Dette fører til en senkning av opplagthet, og er et resultat av avslappethet og en mindre vilje til å jobbe raskt og hardt. Studier gjort på skolebarn, studenter og kontorarbeidere viser en klar redusert konsentrasjon og 30-50 % lavere prestasjon på oppgaver som krever konsentrasjon for temperaturforhold rett under svettegrensen. Den minst optimale temperaturen ble målt til å være 27°C[40, 41].

Dr. Wyons studier med bl.a. temperatur og mental prestasjon[39] er blitt satt i sammenheng i et diagram kalt Wyon-diagrammet, vist i figur 22. Diagrammet viser mental ytelse, ulykker, arbeidstempo m.m. som funksjon av operativ temperatur.

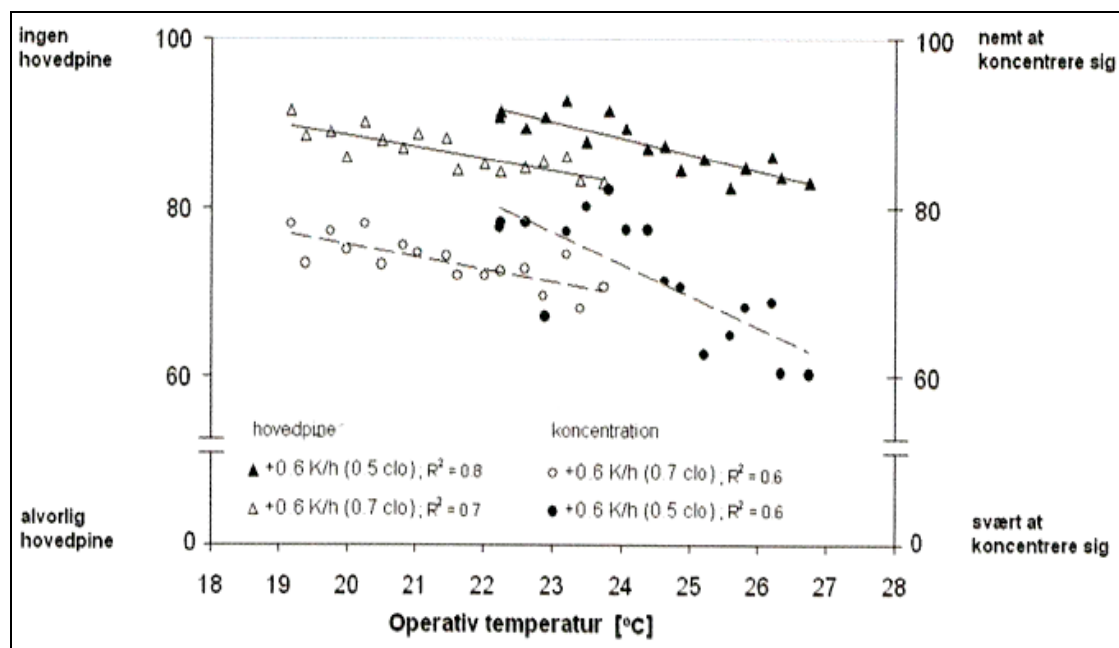


Figur 22: Wyon-diagrammet[42]

Ut av diagrammet kan man for eksempel lese at en persons mentale ytelse reduseres med 4 % for hver grad over den operative temperaturen i rommet. Maksimum produktivitetstap for mental ytelse kan bli så mye som 28 % ved 7°C over optimal temperatur. Figuren viser i tillegg at produktivitetstap ved manuelt arbeid synker med temperaturen, samt at ulykker oppstår oftere ved høyere og lavere temperaturer. Antall prosent tilfredse er størst, 80 %, ved omtrent 24,5°C operativ temperatur.

Et annet forsøk er gjort på komfort, symptomer og prestasjoner med varierende temperaturer[43]. Forsøkene ble gjort med forskjellig bekledding og varierende eksponeringstid. Med fast bekledding førte en stigende operativ temperatur til økende hodepine og tretthet, noe ikke varierende bekledding førte til. Resultatene for forsøkene er vist i figur 23. Figuren viser hvordan forsøkspersonenes konsentrasjonsevne og opplevelse av hodepine faller med stigende temperatur, både for sommerbekledding(0,5 clo) og vinterbekledding(0,7 clo). Figuren viser også at det ikke bare er temperaturendringer, men også temperaturnivået som påvirker hodepine og konsentrasjonsevne. Den opplevde luftkvaliteten ble redusert lineært med stigende operativ temperatur, og prestasjonsevnen sank med opplevd

luftkvalitet. Forverringen av opplevd luftkvalitet var da på grunn av en økning av luftens entalpi, noe som også er blitt vist i tidligere undersøkelser[44].



Figur 23: Forsøkspersonenes gjennomsnittlige vurdering av hodepine og konsentrasjonsevne med stigende operativ temperatur[43]

Dermed vil det være viktig at operativ temperaturen i tårnkabinen ikke er for høy, samt at den ikke øker for raskt. Da vil symptomer som hodepine, tretthet og konsentrasjonsproblemer forsterkes. Med så stor fokus på arbeidsmiljøet i flytårnet, vil dette være viktig i utformingen av riktig klimatiseringsløsning.

3. Varmeutveksling

Materialoverflater mot luft avgir eller mottar varme ved konveksjon mot lufta og ved langbølget stråling med de omkringliggende flatene. Netto varmetransport q mellom flater og omgivelsene regnes gjerne som proporsjonal med temperaturdifferansen mellom overflaten og omgivende luft[11].

Varmeoverføring for gasser skjer ved konveksjon, når det kommer i kontakt med et temperert objekt eller en flate. Gassen blir varmet opp eller kjølt ned av flaten før den blandes med de nærliggende gassene, og enten synker eller stiger avhengig av temperatur. Konveksjonen er enten fri eller tvungen, som vil si at den skjer naturlig eller at strømmingen drives mekanisk eller av andre krefter[11].

Ved kontakt mellom to legemer skjer varmeoverføringen ved konduksjon. Det skjer da en varmeledning som gjør at varmen går fra det varmeste legemet til det kaldere legemet. Det er de "varme" molekylene som avgir noe av sin kinetiske energi ved støt til de "kalde" molekylene[11]. Dette er ikke så aktuelt for klimatiseringsløsninger, sett bort i fra kontakt med gulv med installerte varmekabler.

Utveksling mellom legemer som ikke berører hverandre skjer ved varmestråling ved elektromagnetiske bølger innenfor det infrarøde området. Utstrålingens bølgelengde avhenger av temperaturen på overflaten, og det stråles kortere bølgelengde jo høyere temperatur overflaten har[11]. Ved varmetransport over et tynt luftsjikt ved materialoverflater er strålingstransporten vanligvis dominerende, og utgjør over 70 % for luftsjikter tykkere enn 15mm[45].

Når vi mennesker føler en "kald stråling", så er det fordi objektet som sender ut stråling mot oss produserer mindre varmestråling enn vi selv gjør. Så når vi f.eks. er i et rom med kalde vegger vil vi føle en kald stråling som betyr at loven om termisk likevekt ikke jobber til vår fordel. Vi avgir varme til flatene og objektene i rommet selv uten at vi er i kontakt med de.

Det er derfor fordelsmessig om store flater i oppholdsrom, som vegger, gulv og tak, ikke er lavere enn optimal operativ temperatur. Høy temperatur på luften er uheldig for luftkvaliteten, og bør ikke ligge over 21-22°C[44]. Dersom optimal operativ temperatur ligger på 24°C, bør altså strålingstemperaturen ligge på 26°C.

Dette viser en fordel med varmeavgivere som hovedsakelig utveksler varme ved stråling med omgivelsene. Det vil være uheldig å varme opp et lokale med bare varm ventilasjonsluft, da det må tilføres tilluft med høy temperatur for å nå optimal operativ temperatur med lav varmestråling. Dette fører til dårlig luftkvalitet som følge av luftens høye entalpi.

4. Ulike alternativer for oppvarming

Det finnes flere måter å varme opp et rom på. Alternativene til oppvarming i tårnkabinen må kunne gi et godt termisk inneklima ved varmestråling og konveksjon.

4.1 Ventilasjonsoppvarming

Sentral oppvarming er en løsning som går ut på å varme opp ventilasjonsluft, som så blir distribuert ut til de enkelte sonene med oppvarmingsbehov ved hjelp av luftkanaler. Den vanligste måten å varme tilluften på er å bruke et varmebatteri forsynt med varmtvann gjennom rør. Andre muligheter for oppvarming av ventilasjonsluften er å substituere varmt vann med damp ved lavt trykk, i tillegg til at elektriske varmeelementer kan installeres istedenfor vannrørene. Oppvarmingen ved ventilasjon reguleres ved å forandre mengde eller temperatur på tilluften[46].

4.2 Radiatorer

Radiatoren er den mest brukte varmeavgiveren til lokal oppvarming. Radiatorer blir forsynt med oppvarmet vann gjennom rør, og varmeavgivelsen reguleres ved å endre på gjennomstrømmingen av vannet, eller ved å forandre på temperaturen til vannet. Varmeavgivelsen er normalt rundt 40 % ved konveksjon og 60 % ved stråling. Radiatoren har en rask temperaturrespons grunnet en lav termisk masse[47].

4.3 Lukkede panelovner

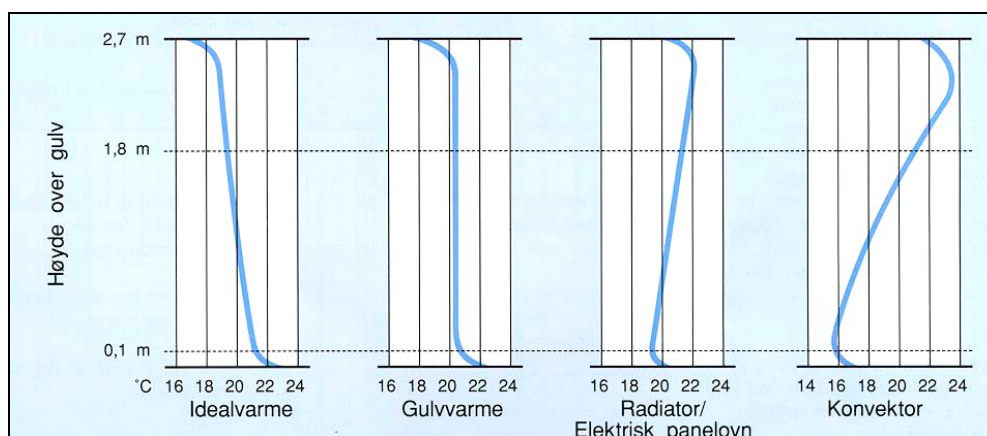
Radiatorer, som er det vanligste alternativet, kan eventuelt byttes ut med helelektriske lukkede panelovner som gir mer strålevarme. Lukkede panelovner forsyner lokalene med varme basert på stråling, med en andel på opp mot 70 %. Dette gir da en mer behagelig oppvarming, samt at luftens entalpi ikke stiger for mye[44].

4.4 Gulvvarme

Gulvvarmesystemer bruker gulvet som heteflate, og det finnes flere muligheter for oppvarming av gulvet. Konseptene består av elektrisk varmemefolie, elektriske varmekabler eller varmekabler med vann som oppvarmingsmedium. Deler eller hele gulvet kan brukes som heteflate.

Varmeavgivelsen skjer i stor grad ved varmestråling, noe som fører til minimal luftomrøring i rommet og en tilnærmet ideell oppvarming av rommet. I figur 24 er denne varmeprofilen vist i forhold til oppvarming med radiator og konvektor, samt

den ideelle varmeprofilen.



Figur 24: Temperaturprofil for gulvvarme, sammenlignet med idealvarme[44]

Til gjengjeld er gulvvarmesystemet et tregt system når det kommer til temperaturresponsen, men avhenger litt av materialene gulvvarmen er lagt i. Lette gulvvarmesystem installert i trebjelkelag kan ha en responstid på 10-15 minutter, mens responstiden for betong vil være på flere timer. I tårnkabinen vil det være et lett gulv, slik at dersom gulvvarme er et alternativ, vil responstiden være ganske lav[44].

4.5 Varmelister

Dette konseptet går ut på å legge brede gulvlistor med enten elektriske varmekabler eller rør med vannbåren varme innebygget. Omtrent 60 % av varmen avgis som stråling, 40 % som konveksjon, litt avhengig av temperaturen i gulvlisten. Temperaturprofilen vil være veldig lik den for gulvvarme i avsnitt 4.4. Plasseringen nær kuldebroer kan være et av problemene med varmelister dersom de skal installeres i yttervegger. Da vil varmetapet gjennom kuldebroene være av betydelig størrelse[44].

5. Ulike alternativer for kjøling

I bygninger med høye krav til termisk komfort og stor varmelast, vil det i tillegg til kjøling med ventilasjon normalt installeres lokale kjøleenheter. Utenom sentral ventilasjonskjøling kan kjøleenhetene i et klimaanlegg deles inn i kjøletak og kjølekonvektorer.

5.1 Ventilasjonskjøling

Sentral ventilasjonskjøling er den vanligste metoden for komfortkjøling, der konseptet går ut på å kjøle ned tilført uteluft eller inneluft(resirkulert) med et kjølebatteri. Kjølebatteriet er enten forsynt med kaldt vann eller et annet kjølemedium som lett fordampes i rør. Som med ventilasjonsoppvarming reguleres kjølingen med lufttemperatur og luftmengde[18].

5.2 Kjølebafler

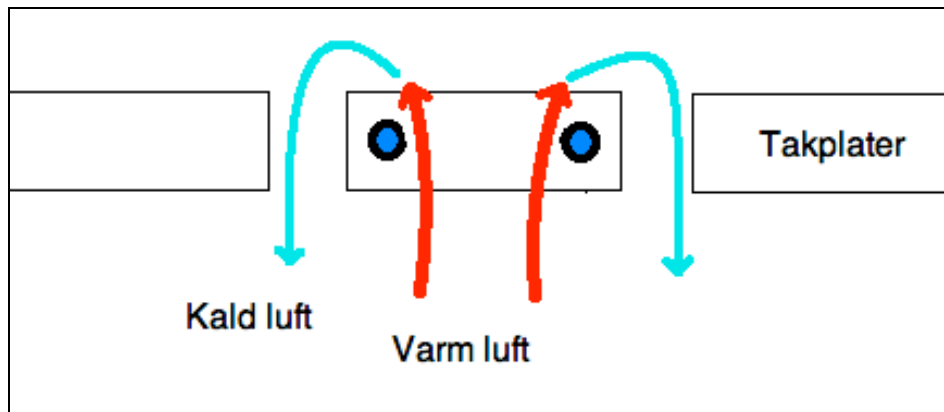
Selv om teknologien for kjølebafler, også kalt kjølekonvektorer, har eksistert i mer enn 50 år, har det vært problemer med kondensering av fuktighet på de kalde overflatene i kjølekretsen. Dette er noe som har ført til ødeleggelse på bygningsmaterialer og har ført til biologisk vekst rundt stedene det har oppstått dugg og kondens.

Kondens er felling av vann av luften når den blir kjølt ned til en temperatur lavere enn luftens duggpunktstemperatur. Dersom luften passerer kalde flater kjøles den ned lokalt ved overflaten, og det dannes kondens på overflaten. Faren for kondens er regulert av lufttemperaturen, luftfuktigheten, strømningsforhold og overflatetemperaturen. Problemet med kondensering kan enkelt unngås med overvåking av duggpunkttemperaturen, slik at tilført vann får lavere temperatur enn denne[10, 48, 49].

Kjølebafler er delt inn i to hovedkategorier, passive og aktive, der forskjellen ligger i at passive kjølebafler har varmeoverføring til luften ved naturlig konveksjon, mens de aktive kjølebaflene bruker vifte og tilfører samtidig frisk luft[48].

5.2.1 Passive kjølebafler

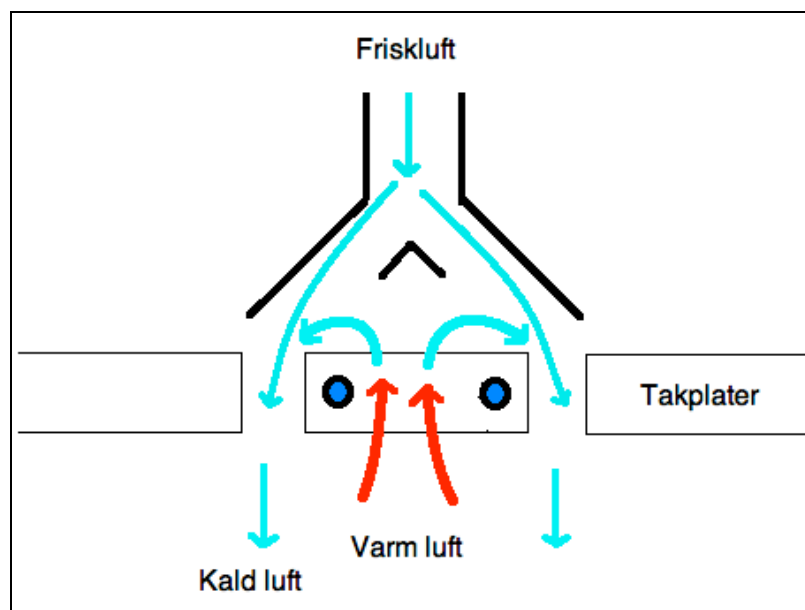
Passive kjølebafler består av kjøleenheten med gjennomstrømmende isvann i rør. Her drives konveksjonen fritt ved at varm luft stiger opp til taket, føres mellom takplatene og kjølebaflen, og kjøles der ned av kjølebaflen. Den kalde luften vil da synke ned mot gulvet igjen, som vist i figur 25 [48]. Passive kjølebafler er normalt avhengige av tilførsel av friskluft fra et ventilasjonsanlegg for å oppnå minimumskravene for oppholdssonen.



Figur 25: Passiv kjølebaffel

5.2.2 Aktive kjølebafler

Aktive kjølebafler virker på den varme luften i rommet på samme måte som den passive, men samtidig tilføres frisk, underkjølt luft ved hjelp av en vifte. I visse tilfeller er det da ikke nødvendig med annen tilførsel av ventilasjonsluft i lokalet, men dersom det kreves høyere kvalitet på inneluften og på det termiske inneklimaet, anbefales ikke dette[50]. Avkjølingen av den stigende varme luften skjer da med tvungen konveksjon, da det er vifter som driver konveksjonen. Aktiv kjøling kalles da også mekanisk kjøling[15]. Figur 26 viser en aktiv kjølebaffel.



Figur 26: Aktiv kjølebaffel

De aktive kjølebaflene har vist seg å konsumere lite energi, samt at kostnadene for driften er lave. Dette er på grunn av mindre behov for viftekraft, som drastisk reduserer energibehovet. Det er et reduksjon i behovet for tilluft på 75-85% i forhold til "all-air"-systemer[50].

Den aktive kjølebaflen oppnår en tetthet på kjølingen som er dobbelt så stor som for en passiv kjølebaffel, grunnet den tvungne konveksjonen. Det ville vært mulig å redusere energibehovet for tårnkabinen betraktelig ved å ta i bruk aktive kjølebafler i stedet for passive kjølebafler med ventilasjonen, men som sagt anbefales det ikke, da luftkvaliteten og det termiske inneklimaet ikke blir godt nok[48].

5.3 Kjøletak

Kjøletak får som kjølebaflene tilført isvann gjennom rør som er trukket gjennom aluminiumsplater for best mulig kuldeoverføring. Kjøletakene har også det samme problemet med kondensering på overflatene som kjølebafler, men problemet kan også her unngås ved overvåking av duggpunktstemperaturen. Aluminiumsplatene er ofte plassert under takplater med små hull i, slik at kald luft synker ned. Dette er vist i figur 27 for kjøletaket installert i flytårnkabinen ved Trondheim flyplass, Værnes. Kjøletak har som kjølesystem normalt rask responstid ved økning i kjølebehovet[49].



Figur 27: Kjøletak i flytårnkabin

Kjøletak vil ofte, litt avhengig av takhøyden, kunne gi en følelse av strålingstrekk mot øvre deler av kroppen, som hodet[49].

6. Prinsipper for ventilasjon

Ventilasjon er sentral kjøling og oppvarming av luft tilført et rom eller et lokale. I dette arbeidet blir bare balansert, mekanisk ventilasjon vurdert. Her driver elektriske vifter luften rundt ved å skape drivtrykk i kanalene. Dermed blir ikke ventilasjonen avhengig av de uforutsigbare og varierende forholdene ute, samt at det blir mulig å drive varmegjenvinning fra avtrekksluften[11].

Ventilasjon har en tett sammenheng med atmosfærisk inneklime og luftkvalitet. Hensikten med å ventilere er å[11]:

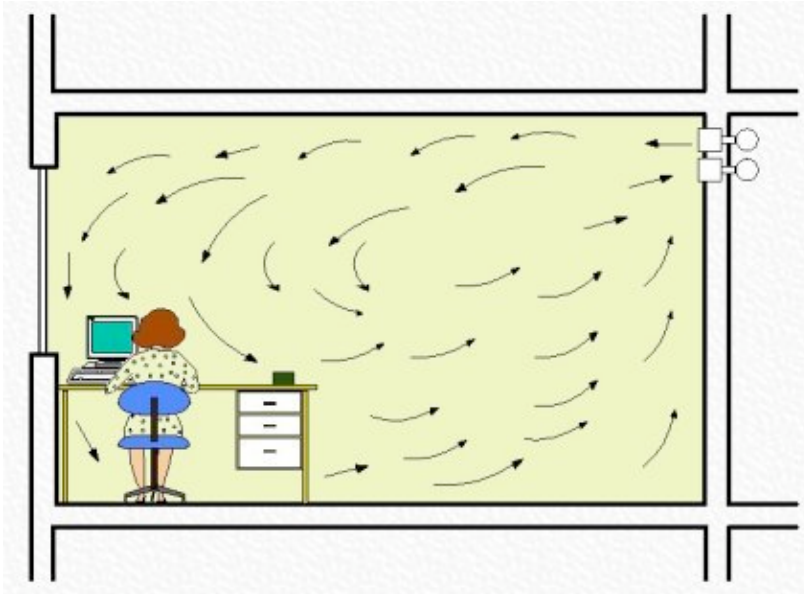
- Gi tilførsel av frisk luft
- Fjerne uønsket lukt
- Fjerne forurensinger
- Gi fuktighetskontroll
- Gi temperaturkontroll

Behovsstyrt ventilasjon er et ventilasjonssystem der kvaliteten på luften, fuktighet, personbelastning eller andre parametre regulerer luftmengden[15]. Behovsstyring vil utdypes senere i kapittel 8.

Ofte hentes frisk luft utenifra for å kunne tilføre oppholdssonen god luftkvalitet. For å oppnå større energieffektivitet er det vanlig å installere varmegjenvinner som beskrevet i avsnitt 2.2.3.

6.1 Omrøringsventilasjon

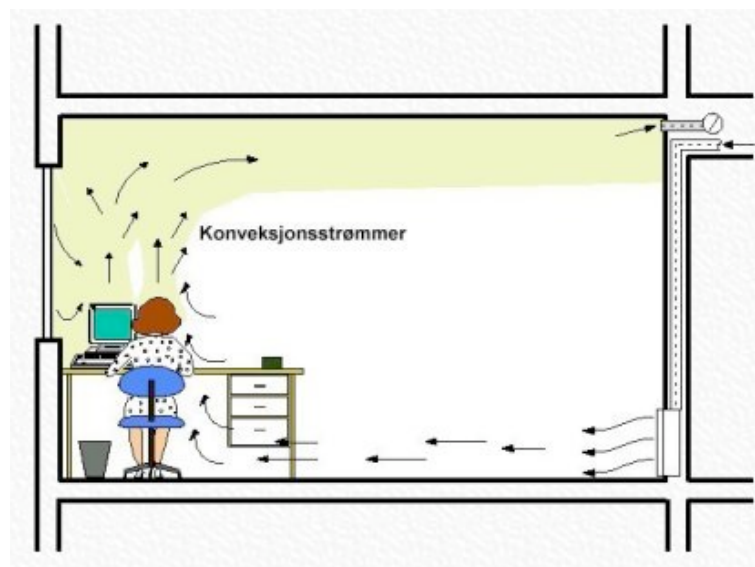
For omrøringsventilasjon(OV), blir luften blåst inn i rommet med høy impuls. Luftstrålen drar med seg bruktlufta slik at de blir blandet sammen. Luften blir tilført utenfor oppholdssonen som konsentrerte stråler, og entrer ikke her før luften har lav impuls og en utjevnet temperaturprofil. Det ideelle er om temperatur, konsentrasjon av forurensinger og fordelingen av luft blir uniform i hele rommet. Det er viktig at luftstrålene dimensjoneres slik at temperatur og hastighet på strålen ikke overskrider gitte grenseverdier for termisk komfort[36].



Figur 28: Luftbevegelse for omrøringsventilasjon[51]

6.2 Fortrengningsventilasjon

For fortrengningsventilasjon(FV) tilføres undertemperert friskluft med lav hastighet ved gulvhøyde. Dette fører til en ensrettet strømming som effektivt fjerner forurensing fra oppholdssonen og rommet. Som vist i figur 29 tilføres luften lavt, mens avtrekket ligger ved takhøyde. Den undertempererte tilluften fyller rommet nedenifra, og ettersom den møter på varme objekter, vil den varmes opp ved konveksjon og stige mot taket. Det oppstår dermed en termisk lagdeling, hvor den nye luften ligger nederst i oppholdssonen, og den gamle, varme luften ligger øverst til den blir trukket ut av rommet[36].



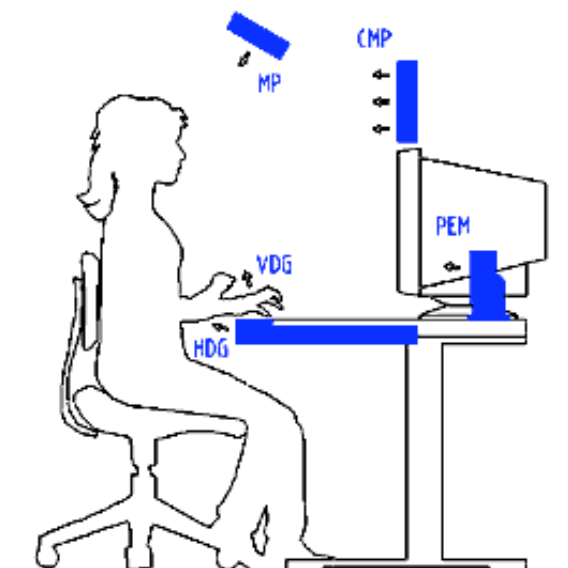
Figur 29: Luftbevegelse for fortrengningsventilasjon[51]

6.3 Personlig ventilasjon

Personer er forskjellige når det kommer til fysiologiske og psykiske reaksjoner, bekledning, metabolisme og individuelle preferanser for inneklimate. Dette fører til delte meninger om hva som er optimale, termiske forhold til enhver tid. Vist i figur 15 kan en lese ut at det alltid er en viss missnøye i lokaler der det oppholder seg flere enn én person. Dette er et problem ikke alltid de vanlige ventilasjonsprinsippene kan løse. Prinsippet med personlig ventilasjon kan være med å redusere disse individuelle behovene.

Personlig ventilasjon (PV) har som hovedmål å forsyne hver enkelt person med frisk uteluft direkte til pustesonen. Hver person kan selv styre sine nærmeste omgivelser, og en har individuell kontroll av sitt eget atmosfæriske og termiske mikroklima. Tilfredshet og produktivitet kan da øke som et resultat av forbedret luftkvalitet og termisk komfort. En PV-enhet gir muligheten til å stille på både temperatur og mengde på tilluften. Normalt kan temperaturen stilles inn på 18-26°C, og lufthastighetene ligger på 0-25 l/s for de forskjellige PV-enhetene, litt avhengig av plasseringen.

Det finnes forskjellige typer PV-enheter til plassering i og på arbeidsbordet. I figur 30 er de vanligste luftterminal-enheter vist. Studien som er gjort på disse enhetene har vist at versjonen VDG (vertical desk grill), som forsyner frisk luft opp mot ansiktet fra integrerte tilluftsventiler i arbeidsbenken, gir det mest tilfredsstillende resultatene[52]. Også versjonen MP (movable panel) gir gode resultater for effektiviteten.



Figur 30: Forskjellige typer personlig ventilasjon[52]

En studie gjort på individuell kontroll for eget lokale klima og termisk komfort, viste at dersom brukerne hadde muligheten til å justere sitt mikroklima 6°C, ville 99% vært termisk komfortable. Med et justeringsspenn på 4,6°C og 3,9°C ville henholdsvis 95% og 90% vært fornøyde[41]. En annen studie demonstrerte at

individuell temperaturkontroll på $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ga en økning i prestasjon på konsentrasjonsbaserte mentale oppgaver med 2,7%[41]. En studie med PV viste at et rom med temperatur på 26°C og med tilført PV på 20°C eller 23°C var bedre enn et rom med bare omrøringsventilasjon alene og en temperatur på 23°C [53]. Dette viser at PV klarer å tilføre et godt nok termisk lokalt klima. I enkelte tilfeller kan problemer oppstå med følelse av trekk, særlig mot hodet, samt tørrhet i luftveier og øyne[52]. Studier gjort på problemer med støy for PV har ikke vist noen form for overskridelse av lydkrav[53].

Personlig ventilasjon kan gi forbedret kvalitet på luften i lokal oppholdssone med mye mindre tilluft enn ved ventilasjon basert på omrøring. Dersom OV blir erstattet med PV, vil altså dette ha stor innvirkningen for energibehovet, helt opp til en reduksjon på 60 % [54]. Dette er først og fremst på grunn av viftene, som står for størsteparten av energibehovet ved vanlig ventilasjon[55]. Problemet med dette grepet er at utenfor pustesonen vil det bli en forverring av luftkvaliteten, samt at det vil bli en stor varme- eller kjølelast som må håndteres. Det vil ikke være mulig å installere bare PV i lokaler med høye krav til inneklima, eksempelvis i en flytårnkabin. Svakheten ligger i at det ikke alltid vil være behov for PV, for eksempel i tilfeller hvor det føles trekkfullt ved lite bekledning. Det må være mulig å stenge av PV-enheten og likevel få forsynt en luftkvalitet som er høy nok.

Situasjonene hvor PV er installert, men ikke alltid brukes, tvinger frem en installasjon av et total-ventilasjonssystem i tillegg. Det er gjort forsøk på hvordan luftbevegelser påvirker effektiviteten til PV-systemet i samhandling med FV- og OV[56]. Eksperimentene viste at PV alltid beskytter okkupantene fra forurensing i rom med OV. Luftkvaliteten var enten like god eller bedre med PV enn med bare OV. I samhandling med FV viste det seg derimot at interaksjonen førte til omrøring av romluften, økning i transporten av bioeffluenter og utåndet luft mellom okkupantene, samt redusert luftkvalitet av inhalert luft ved lave PV-lufthastigheter. Studiet viste dermed en mer ønskelig effekt i samhandling med OV.

En annen studie har vist at luftstrømmene som skjærer PV-luftstrømmen ikke må ha en høyere hastighet enn 0,2 m/s. Høyere hastigheter vil redusere PV evne til å beskytte mot forurensinger[57]. Dermed er det viktig at ikke hastigheten på luft fra OV ikke er for høy i pustesonen.

6.4 Effektivitet for ventilasjonsprinsipper

Det finnes flere måter å sette et mål på hvor effektiv ventilasjonssystemet er. Luftstrømmer i rom med OV- og FV blir målt etter følgende faktorer[10]:

- Ventilasjons-effektivitet
- Forurensingsfjernings-effektivitet
- Lokal luftskifte-indeks
- Lokal luftkvalitet-indeks

Ventilasjons-effektiviteten er her den vanligste å bruke[52]. Den forteller hvor stor del av en sporgass det er i avtrekksluften dividert med total mengde sporgass i lokalet.

For PV brukes disse indeksene[52]:

- Ventilasjons-effektivitet
- Personlig eksponerings-effektivitet
- Re-inhaleringsindeks

Her er personlig eksponerings-effektivitet blitt innført i sammenheng med arbeidet med personlig ventilasjon, og er 1 når 100 % av inhalert luft er fra PV-enheten, 0 ved 0 %. Denne indeksen har blitt innført på bakgrunn av vanskeligheter med å måle ventilasjons-effektiviteten for PV.

7. Sammenligning av ventilasjon og enheter for oppvarming og kjøling

En sammenligning av de foregående alternativene for ventilasjon, kjøling og oppvarming er plassert i tabell 16.

Tabell 16: Fordeler og ulemper ved alternative klimatiseringsenheter

Enhet	Fordeler	Ulemper
Ventilasjon		
Omrøring	<ul style="list-style-type: none"> • Forhindrer sjiktning av lufttemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stor lufthastighet/trekk • Oppvirvling av bl.a. partikler • Fjerner ikke forurensing helt
Fortrengning	<ul style="list-style-type: none"> • Fjerner forurensing 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemer med tett møblering • Temperatursjiktning
Personlig	<ul style="list-style-type: none"> • Personlig behovsstyring • Frisk luft 	<ul style="list-style-type: none"> • Trekkfølelse
Oppvarming		
Ventilasjonsoppvarming	<ul style="list-style-type: none"> • Enkelt å installere varmebatteri i ventilasjonssystemet 	<ul style="list-style-type: none"> • Høy entalpi på luften • Støy
Radiatorer	<ul style="list-style-type: none"> • Høy avgivning av strålingsvarme • Rask temperaturrespons 	
Lukkede panelovner	<ul style="list-style-type: none"> • Høy avgivning av strålingsvarme • Rask temperaturrespons 	
Gulvvarme	<ul style="list-style-type: none"> • Høy avgivning av strålingsvarme • Integrert i bygningskonstruksjonen 	<ul style="list-style-type: none"> • Treg temperaturrespons • Varmeavgivelse til underliggende rom
Varmelister	<ul style="list-style-type: none"> • Rask temperaturrespons • Integrert i bygningskonstruksjonen • Høy avgivning av strålingsvarme 	<ul style="list-style-type: none"> • Varmetap ved kuldebro

Kjøling		
Ventilasjonskjøling	<ul style="list-style-type: none"> • Enkelt å installere kjølebatteri i ventilasjonssystemet 	<ul style="list-style-type: none"> • Støy • Trekkfølelse
Kjølebafler	<ul style="list-style-type: none"> • Tilfører friskluft(aktive) • Stille 	<ul style="list-style-type: none"> • Fare for trekk mot hodet • Kondensfare
Kjøletak	<ul style="list-style-type: none"> • Stille • Integrert i bygningskonstruksjonen 	<ul style="list-style-type: none"> • Trekkfølelse

8. Behovsstyring

Mest mulig av utstyret som krever energi i en bygning bør i størst mulig grad styres av behovet til okkupantene. Behovet er sjelden konstant, og særlig ikke over lengre tid. Optimal behovsstyring reduserer energiforbruket, og opprettholder samtidig et godt inn klima. Blant annet kan belysning, ventilasjon, solavskjerming, oppvarming og kjøling reguleres med automatisk styring. Her er en oversikt over aktuell behovsstyring for tårnkabiner.

8.1 Ventilasjon

Ventilasjon har som tidligere nevnt som hovedformål å fjerne forurensinger i inneluften. Frisklufttilførselen reguleres i forhold til *menneskelig aktivitet*:

- Tilstedeværelse ved hjelp av persondetektor. Her gjelder bare enten minimum eller maksimum ventilasjon som nivå for regulering.
- Forurensingskonsentrasjon, for litt større rom hvor personantall varierer. Dersom mennesket utgjør hovedkilden brukes CO₂-nivået som reguleringsparameter

Også *termiske parametre* kan styre ventilasjonen:

- Relativ luftfuktighet.
- Lufttemperatur i rommet.

Automatisk styring av friskluftmengde kan også skje ved:

- Tidsstyring, dersom bruksmønster og produksjon av forurensing er kjent.
- Regulering etter trykkforskjellen mellom rom(spesialventilasjon).

Sensortypene som kan bli tatt i bruk er:

- Bevegelsessensor
- Temperatursensor
- Fuktsensor
- CO₂-sensor
- VOC-sensor

Forutsetningene for at den behovsstyrte ventilasjonen fungerer godt, er at det ikke er for mange forurensingskilder som dominerer. Også vanskelighetsgraden av målbarhet, og tidligere erfaringer og normtall vil ha noe å si for effektiviteten av behovsstyringen[58].

8.2 Oppvarming og kjøling

Ønsket romtemperatur er avhengig av tilstedeværelse av mennesker og deres individuelle følelse av termisk komfort.

I periodene med oppvarming kan energiforbruket reduseres ved å la temperaturen synke nattetid. Vanlige varmeavgivere har ofte programmerbar termostatstyring som gir god energieffektivitet. Komforttemperaturen kan eksempelvis bli stilt inn på tidspunkt før personer skal ta i bruk lokalene om morgenen. Sentrale styringsenheter er de mest effektive styringssystemene, hvor sentrale enheter styrer og regulerer lokale varmeavgivere. Dermed kan enhetene styres manuelt for alle rom fra en sentral[58].

I perioder med kjøling er det mulig å la romtemperaturen stige nattetid for å redusere energiforbruket.

Oppvarming og kjøling kan også delvis styres etter tilstedeværelse på dagtid. Problemet her ligger i at komforttemperaturen må kunne oppnås raskt når det kommer personer inn i rommet. Dermed kan ikke komforttemperaturen forandres mange grader utenom brukstiden.

For det termiske innemiljøet er det flere måter å styre innetemperaturen[58]:

- Lufttemperatur
- Strålingstemperatur

I en tårnkabin bør det installeres en sensor som måler både strålingstemperaturen samt tørrkuletemperaturen, som er det samme som lufttemperatur. I et rom med så store vindusarealer vil varmeutvekslingen med vinduene ha mye å si for opplevelsen av termisk komfort for okkupantene. Den operative temperaturen bør ligge på et godkjent nivå der strålingstemperaturen er høyest. Som tidligere nevnt vil en høy strålingstemperatur og en lav lufttemperatur gi det best følte inneklimaet.

Det kan by på problemer å installere en sensor for strålingstemperaturen, i og med at den vil være av en såpass variabel størrelse avhengig av flere parametre. Avstand fra de dominerende overflatene, samt skjerming av møbler eller personer vil ha mye å si for måleresultatet.

Den beste sensoren for termisk klima er uten tvil personene selv som oppholder seg i rommet. Problemet er at personene har forskjellige preferanser for hva de mener er komfortabelt når det kommer til temperatur og termisk komfort.

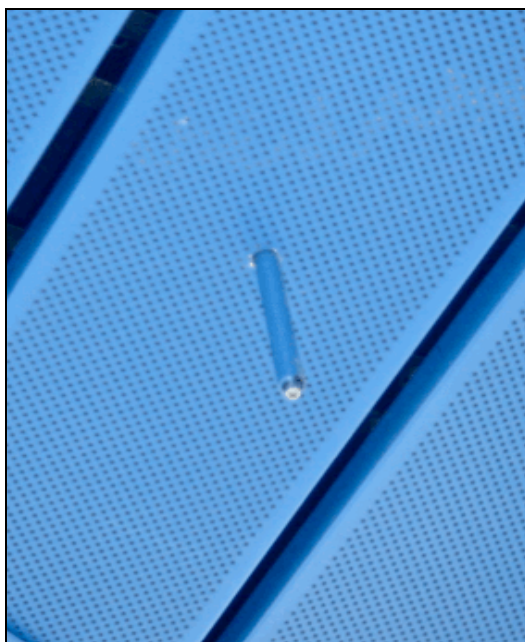
8.3 Solavskjerming

Solavskjerming i form av rullgardiner med delvis gjennomsyn er aktuelt som behovsstyring. Disse rullgardinene kan styres av dagslyssensorer som plasseres utvendig på tårnkabinen. Denne sensoren avdekker solavskjermingsbehovet, og sørger for å senke rullgardinene. Dette vil sørge for et mindre kjølebehov gjennom sommeren med mye solinnstråling. Det bør i tillegg være mulig å styre rullgardinene fra flygeledernes arbeidsposisjon.

8.4 Sensorplassering i flytårnkabin

Det er mange faktorer som spiller inn for bestemmelsen av plasseringen til sensoren. Det første spørsmålet er om det skal installeres én sensor ett sted i kabinen som måler alle de forskjellige parametrene, eller om flere sensorer skal plasseres der de vil gi best mulig tilbakemelding hver for seg.

Dersom fokuset ligger på det termiske inneklimaet, som det ofte gjør, så bør det unngås å plassere sensoren i takhøyde. Luftens temperatur vil her være høyest både om sommeren og om vinteren, i og med at den varme luften stiger, og det kan være vanskelig å regulere anlegget riktig, da lufttemperaturen er lavere i oppholdssonen. Et annet problem som kan oppstå om sommeren er at kjølebaflene er i kort avstand fra sensoren i taket. En plassering nær vinduer eller over varmekilder/avgivere er heller ikke heldig, da de skaper konveksjonsstrømmer og strålingsutveksling som vil påvirke sensormålingene. Figur 31 viser sensoren som er installert i tårnkabinen på Værnes flyplass. Den er satt til å måle CO₂ og lufttemperatur, det samme som for sensoren i Honningsvåg. Den henger ikke lenger enn 20 cm ned fra taket, altså 30 cm høyere enn i Honningsvåg. Denne sensoren er i kort avstand fra kjøletaket, noe som kan skape problemer med målingene.



Figur 31: Sensor plassert under takhøyde i tårnkabin ved Værnes flyplass

I utgangspunktet vil en plassering så nære okkupertene og oppholdssonen som mulig være det optimale. Det lokale klimaet rundt okkupertene er den sonen som skal optimaliseres for best mulig komfort. Men plasseringen av en sensor midt i oppholdssonen vil skape problemer med den enkle forklaringen at den vil kunne være i veien. En tilnærmet optimal plassering vil være mellom flygelederens arbeidsbenker, og i høyde over eventuelle dataskjermer etc. Der vil sensoren være i kort avstand fra pustesonen for å lett kunne måle luftkvaliteten, strålingstemperaturen, fuktigheten i luften, samt at lufttemperaturen vil være rimelig lik den okkupertene føler.

9.2 *Hvorfor Simien?*

SIMIEN er spesielt egnet til simuleringer av enkle bygninger med tradisjonelle tekniske anlegg. Det evalueres mot energiltak, energirammer og minstekrav.

SIMIEN er programmet som er blitt tatt i bruk av store deler av energibransjen for energiberegninger i bygninger. Nyere versjoner av programmet brukes nå til energimerking av bygninger.

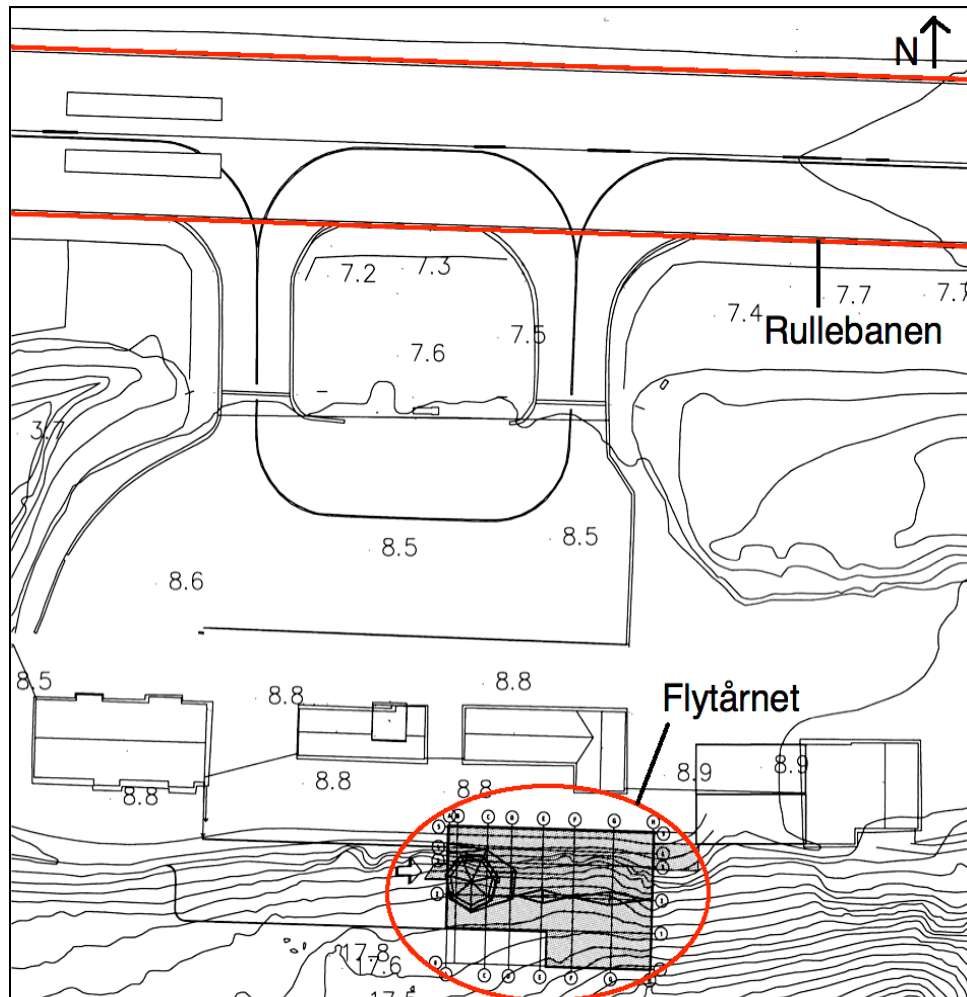
Programmet ble valgt som simuleringsprogram for energiberegningene i masteroppgaven av Multiconsult AS.

Programmet kan lastes ned på:

<http://www.programbyggerne.no/SIMIEN/>

10. Beskrivelse og utforming av den aktuelle tårnkabinen

10.1 Lokalisasjon



Figur 33: Oversiktstegning av flyplassen i Honningsvåg

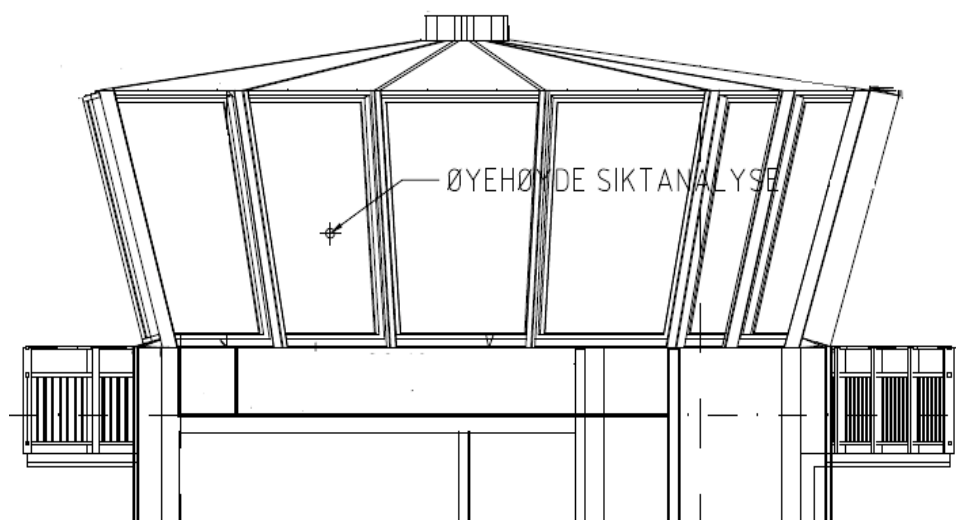
Tårnkabinen som skal studeres ligger i øverste av 5 etasjer i flytårnet på flyplassen i Honningsvåg. I simuleringsprogrammet får Honningsvåg klimadata fra den nærmeste store byen, nemlig Hammerfest. Hammerfest ligger med en lengde- og breddegrad på hhv. $23^{\circ} 22'$ og $70^{\circ} 24'$. Selve flystripen ligger med en vinkling på 15 grader i forhold til nord, og er vist med tilhørende bygninger i figur 33. Klimatiske data for Hammerfest, gitt av SIMIEN, er gjengitt i tabell 17.

Tabell 17: Dimensjonerende klimatiske tall for flyplassen

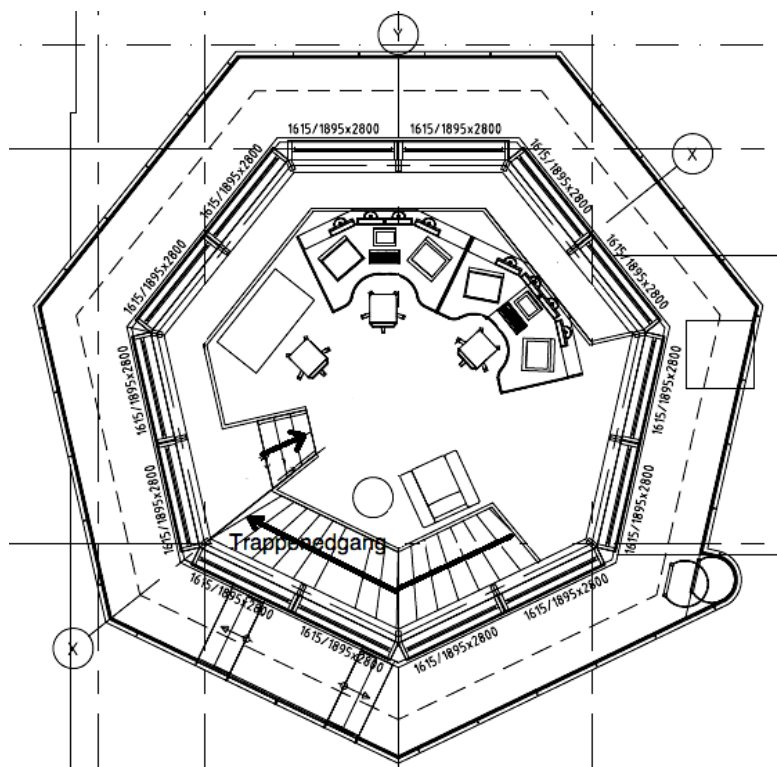
Klimatisk data	
Midlere temperatur sommer	16.6°C
Midlere temperatur vinter	-18.9°C
Årsmiddeltemperatur	1.9°C
Midlere horisontal solflux	80.8 W/m ²
Årsmiddel relativ fuktighet	71.4%
Årsmiddel vindhastighet	4.3 m/s

10.2 Bygningskroppen

Etasjen har en total grunnflate på 71,6 m² og består av to forskjellige høydenivåer. Etasjen består av et teknisk mellomgulv, også kalt servicegangen, på 19,4 m². Et nivå opp, på omtrent 0,7 m, sitter flygelederene med en grunnflate på 52,2 m². Hele rommet har et volum på 200 m³. Flygelederene sitter vendt mot rullebanen på forkanten av det øverste nivået. Denne plasseringen er absolutt, og det vil ikke foregå noen form for ommøblering etter ferdigsstillelse.



Figur 34: Flytårnkabinen i Honningsvåg sett utenifra[59]



Figur 35: Flytårnkabinen i Honningsvåg vist ovenifra[59]

Etasjen er bygget opp av vegger i 7-kant. Den veggen som står parallellt med rullebanen står 15 grader på nord, og det er 50 grader mellom hver vegg. Veggene består av store vindusarealer for å tilfredsstille de pålagte visuelle kravene for flygelederne. Flytårnkabinen er vist i figur 34 og 35. Arealer i tårnkabinen er gjengitt i tabell 18.

Tabell 18: Arealfordeling i tårnkabin

Bygningsdel	Areal (m ²)
Teknisk mellomgulv	19.44
Øverste nivå	52.22
Totalt gulvareal	71.66
Vegger inkl. vinduer	70.98

Det har blitt møblert slik at de to flygelederne har et sammensatte arbeidsbord, hvor det bare er åpning inn under der flygelederne sitter. Dette skrivebordet er litt over 1 meter i høyden. Det kommer ikke til å bli brukt tepper av noe slag i tårnkabinen. Gulvet blir bestående av et rutemønster som kan tas opp for enkel tilgang til teknisk utstyr under gulvet.

I beregningene i SIMIEN vil bygningen ende i kategorien "lett industri, verksted". Bygningskategori brukes ved evaluering mot foreskrifter i TEK07[60]. Valg av bygningskategori påvirker også standverdiene for en rekke inndata. Disse standverdiene er hentet fra tillegg A og B i NS 3031:2007.

10.3 Krav for flytårnkabinen

Vinduene utgjør størsteparten av fasadearealet, og blir da automatisk en viktig brikke for energiflyten og innklimaet i tårnkabinen. De store glassfasadene vil øke energibehovet gjennom hele sesongen, og det er derfor viktig å velge vinduer som minimaliserer varmegjennomgangen.

Vinduene har disse kravspesifikasjonene, satt av Avinor[17]:

Tabell 19: Kravspesifikasjoner for vinduer i flytårnkabin

Kravspesifikasjoner	
U-verdi totalt	Maks. 1,2
Totalt energitransmisjon inn (solfaktor)	Maks. 34 %
Lysgjennomgang	Min. 50 %
Utvendig refleksjon	Maks. 15 %
Innvendig refleksjon	Maks. 15 %
Lydreduksjon (RW)	Minst 40 dB i gjennomsnitt for karm og glass

Glassfeltene i tårnkabin skal helle utover slik at det ikke skal oppstå refleksjon av solstråler som kan være til sjenanse for piloter i fly. Dette kravet ligger på 14-15° helning innover i forhold til loddlinjen. Innvendig side av vindusprofiler lakkres i blå farge. Hensikten med å bruke blå farge er å redusere kontrasten mot himmelen, slik at det forbedrer sikten for flygelederne.

Ingen frittstående bærekonstruksjoner er tillatt i tårnkabinen, de skal plasseres i hjørnene av vindusflatene. Utforming av hjørner i tårnkabinen skal gi minst mulig dødvinkel for flygelederne.

Kravet til varmegjennomgangskoeffisienten(W/m^2K) for bygningskonstruksjoner gitt i TEK07[60], samt hva det er prosjektert med for tårnkabinen er gjengitt i tabell 20:

Tabell 20: Krav til varmegjennomgangstall fra TEK07

Konstruksjon	Krav(TEK07)	Dimensjonert for tårnkabinen
Tak	0,13	0,13
Vindu	1,2	1,0
Vegg	0,18	0,17

Dermed blir alle kravene i TEK07 oppfylt for bygningskonstruksjonene i tårnkabinen. Også andre krav fra TEK07 er gjengitt i tabell 21, hvor en kan se at de også er oppfylt for dimensjonering av tårnkabinen.

Tabell 21: Diverse krav fra TEK07

	Krav(TEK07)	Dimensjonert for tårnkabinen
Kuldebroverdi	0,06 W/m ² K	0,03 W/m ² K
Spesifikk vifteeffekt	2,1 kW/m ³ s	1,9 kW/m ³ s
Årsmidlere effektivvirkningsgrad varmegjenvinner	0,7	0,8
Lufttetthet	1,5 luftvekslinger/h ved 50 Pa	1,5 luftvekslinger/h ved 50 Pa

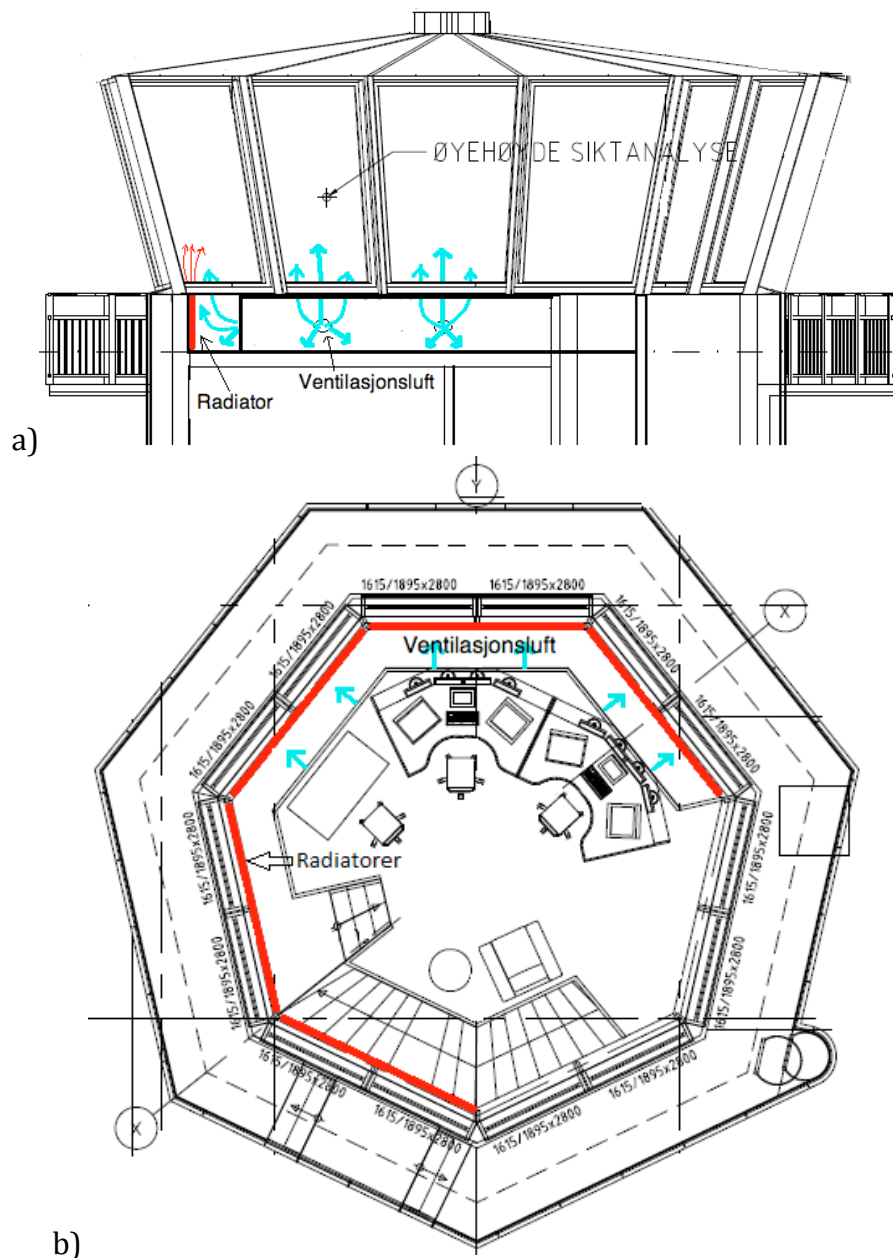
Samling av kravspesifikasjoner for inneklime i tårnkabiner gitt av Avinor:

Tabell 22: Krav til inneklime for tårnkabinen

	Krav fra Avinor
Lydreduksjon	Min. 40 dB for vindu, min. 50 db for yttervegg
CO ₂ -konsentrasjon	800 ppm

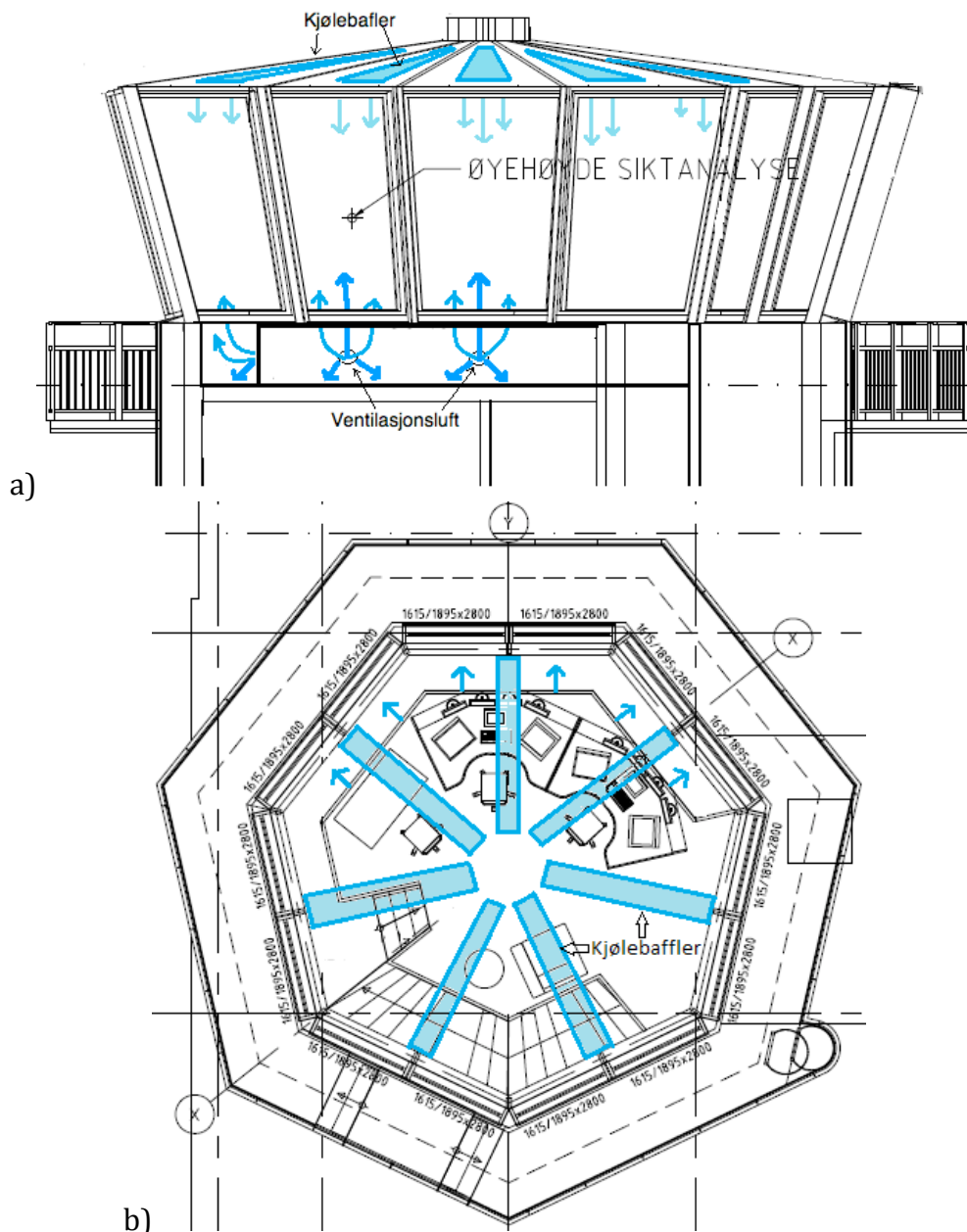
10.4 Beskrivelse av Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning

Tårnkabinen får tilført vannbåren varme gjennom 5 radiatorer. Radiatorene har en konveksjonsgrad på 0,5, og varmeavgivelsen styres av en romtermostat plassert i taket midt i kabinen. Radiatorene er plassert på ytterveggen rett under vinduene, og vises i figur 36 a) og b). Designtemperaturer for distribusjonsvannet ligger på 45°C for turtemperatur, og 40°C for returtemperatur.



Figur 36 a) og b): Multiconsults foreslåtte klimaløsning for vinterhalvår

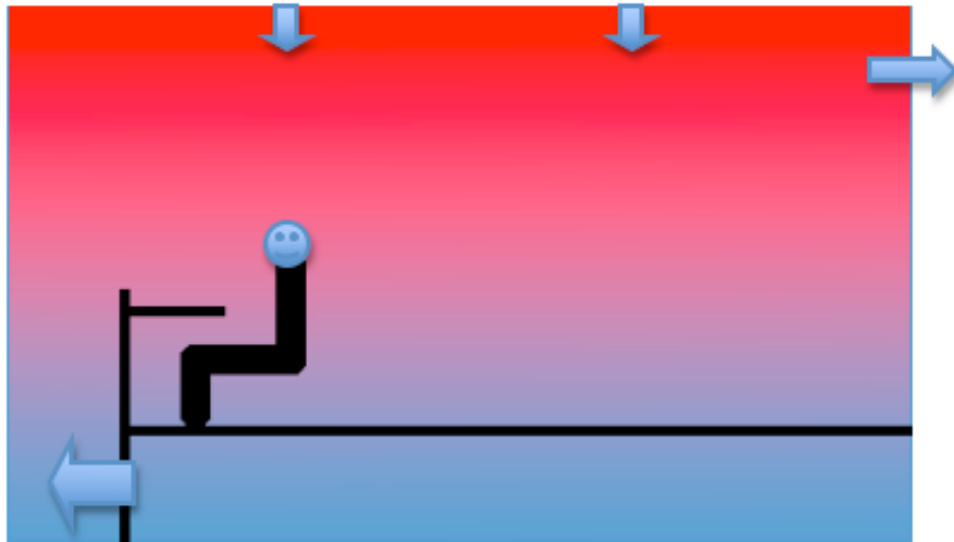
Kjøleanlegget i tårnkabinen består av 7 passive kjølebafler plassert i taket uten tildekning. De blir plassert som vist i figur 37 a) og b). Kjølebaflene blir forsynt gjennom rør med isvann med en turtemperatur på -14°C . Konvektiv andel kjøling for kjølebaflene er 0,5.



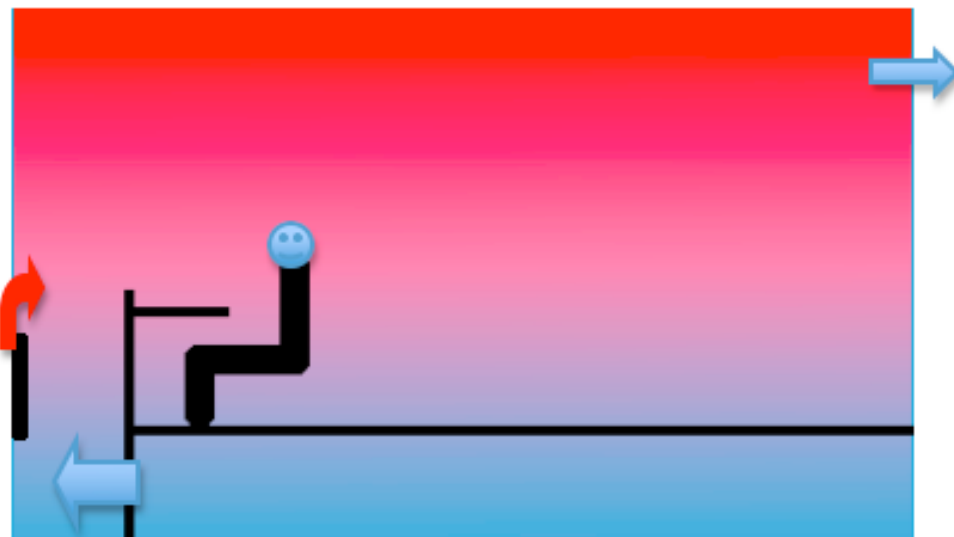
Figur 37 a) og b): Multiconsults foreslåtte klimaløsning for sommerhalvår

Ventilasjonen blir tilført som omrøring med konstant mengde fra lav høyde (ca. 30 cm) bak operatørpultene ved teknisk mellomgulv. Luften blir rettet mot ytterveggene, og skal leveres med lav hastighet, og gjøres for å hindre trekkfølelse i oppholdssonen. Maksimal tillutsmengde ligger på 3000 m³/h, og ventilasjonsaggregatet har en SFP-faktor på 1,9 kW/(s/m³).

Klimatiseringsløsningen for sommer- og vinterforhold er vist mer oversiktlig i figurene under:



Figur 37: Løsningen for sommerforhold



Figur 38: Løsningen for vinterforhold

Fra kalde til varme forhold vil disse trinnene virke for systemløsningen:

- Trinn 1: Varmeanlegg slås av
- Trinn 2: Ventilasjonsluften reguleres kaldere
- Trinn 3: Kjølebaflene settes i drift

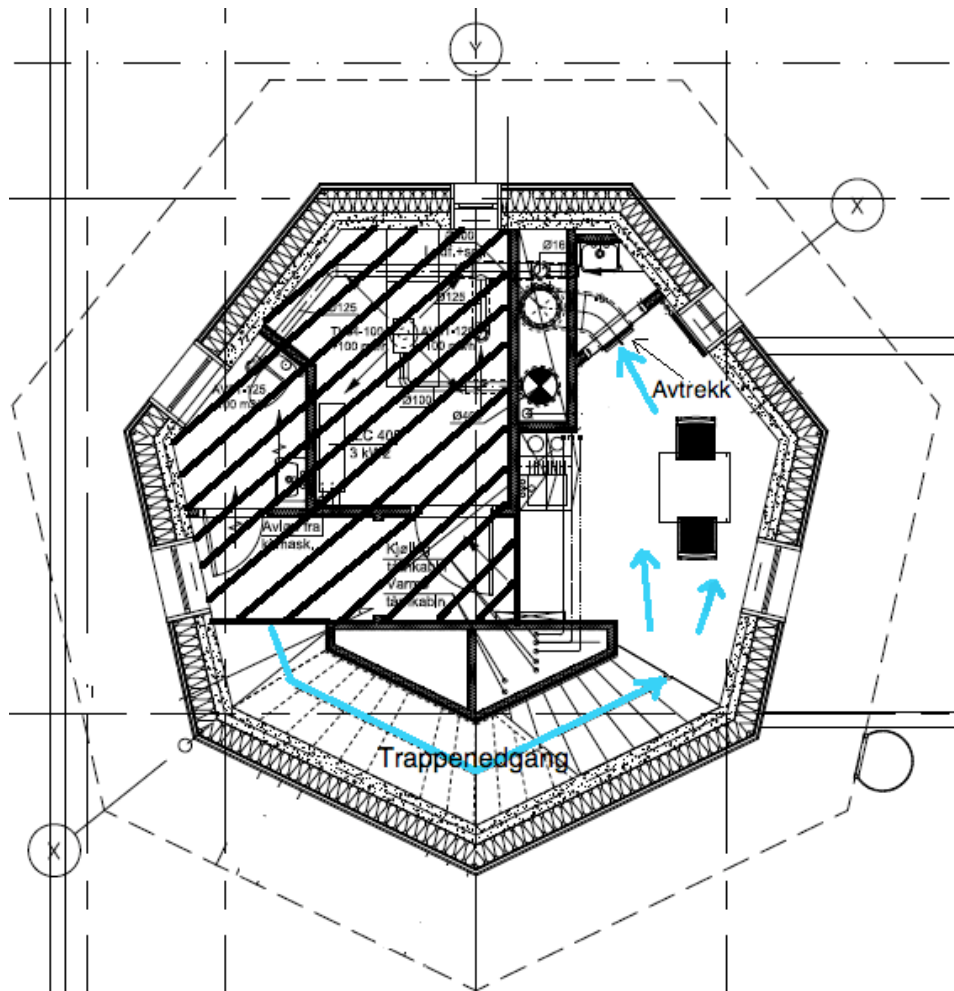
Settpunktstemperaturen er på 22°C, og romlufttemperaturen skal kunne reguleres fra flygelederens arbeidsposisjon.

Luftinntaket til ventilasjonsanlegget som forsyner tårnkabinen er plassert på yttervegg i teknisk rom i 2. etasje, gavlvegg mot vest.

Det er installert finfilter av typen EU7 på begge sider av varmeveksleren. Dette betyr at den kan skille ut fint støv i størrelsesorden 0,2-3 µm med en prosentandel på mellom 80 og 90.

Vinduene som er valgt til tårnkabinen er av typen Suncool Briliant 66/33, og er 2-lags nøytralt glass med en solfaktor på omtrent 35 % [61]. Det er installert rullgardiner med transparent film på innsiden av glassfeltene.

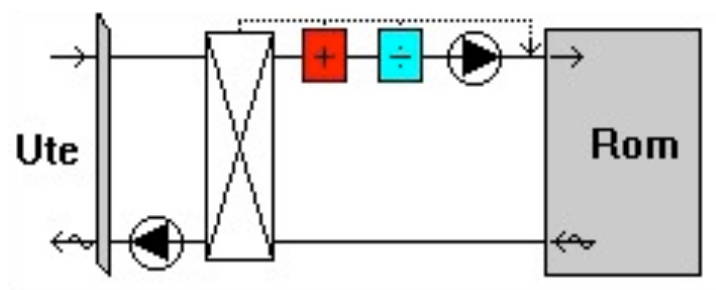
Avtrekket er i etasjen under tårnkabinen, som vist i figuren under, slik at avkastluften trekkes ned fra tårnkabinen og ut.



Figur 38: Avtrekk av ventilasjonsluft i underetasjen

10.5 Energi- og effektbehov

Det er installert en regenerativ, roterende varmegjenvinner med en gjenvinningsgrad på 80 %. Denne er vist som i SIMIEN i figur 39. Viftene er plassert på sugesiden av avtrekksviften og trykksiden av tilførselsviften.



Figur 39: Regenerativ varmegjenvinner

10.5.1 Oppvarming

Det er beregnet et totalt varmetap på 6 kW for tårnkabinen. Til å dekke dette varmebehovet utstyres bygget med en el.kjel og en oljekjel som begge kan dekke 100% av effektbehovet(ca 75 kW). Det er også installert en vann/vann varmepumpe med sjøvann som primærkilde som skal dekke 50 % av effektbehovet til oppvarmingen. El-kjelen er ment til å skulle dekke spisslastbehovet, mens oljekjelen er ment som sikkerhetseffekt dersom det skulle bli problemer med hovedelektrisitetsforsyningen til bygget. Systemet er også beregnet på at markedsprisene skal bestemme om el- eller oljekjelen skal dekke spisslasten.

10.5.2 Kjøling

Det totale kjølebehov for tårnkabinen er beregnet til å være 11 kW. Av dette går 5 kW til kjøling av ventilasjonsluft, og dermed 6 kW til å forsyne kjølebaflene med tilstrekkelig kaldt vann. Frigjort energi fra kjøleprosessene skal nyttes som tilskudd til varmepumpens lavtemperaturside.

Det legges ut kollektorslanger i sjøen utenfor flyplassen. Denne kretsen er lukket med vann og glykol, og vil så veksles mot kjølekretsen som er i flytårnet.

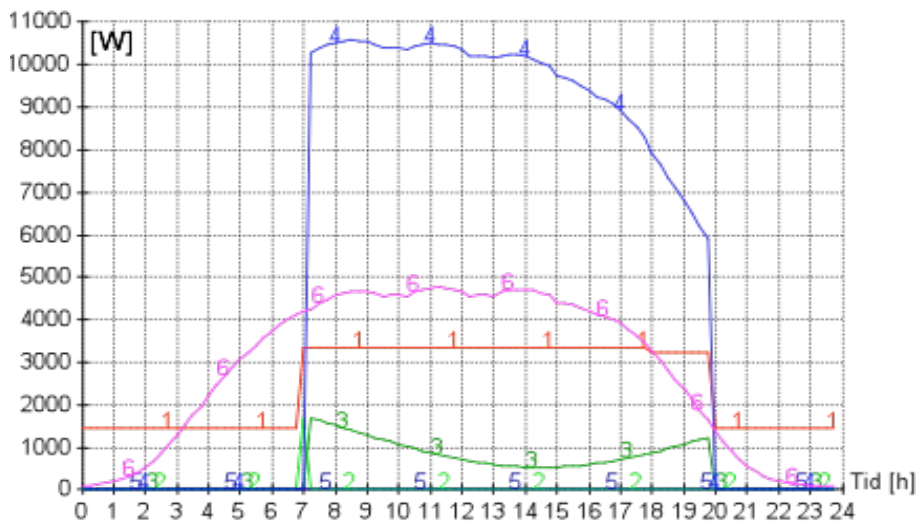
10.5.3 Solinnstråling

Solinnstrålingen gjennom året i Honningsvåg er av veldig varierende grad. Fra midten av mai til slutten av juli er det midnattssol, og sola står på himmelen hele døgnet. Fra midten av november til slutten av januar når ikke sola over horisonten. Dette har mye å si for varmetilskuddet fra sola til tårnkabinen, da vindusarealene er dominerende.

En døgnsimulering for sommerforhold ble gjort i SIMIEN for å se forskjellen på solinnstråling mellom tårnkabinene ved flyplassene i Honningsvåg og Oslo, Gardermoen. Resultatene er vist i figur 40 for Honningsvåg og figur 41 for

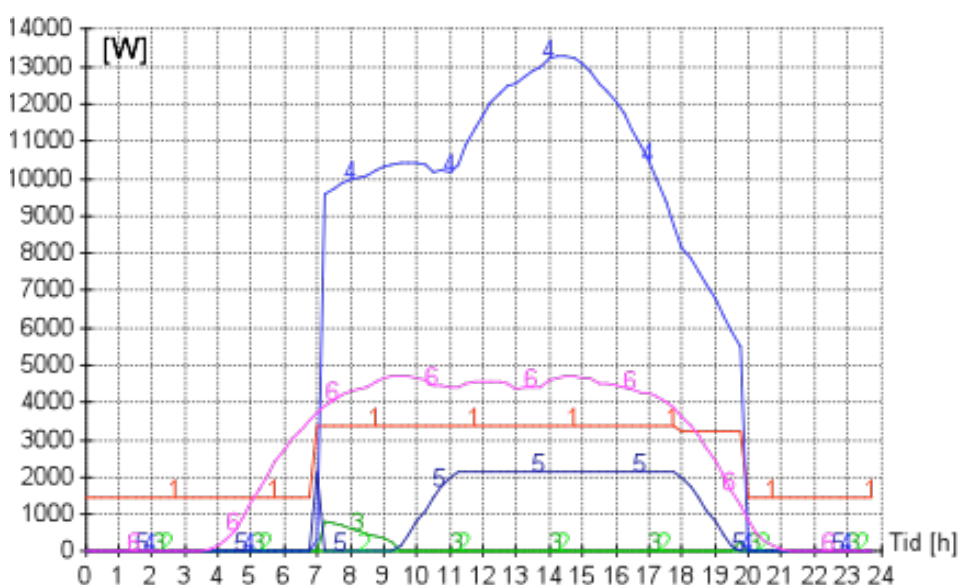
Gardermoen, der graf nr. 6 beskriver solinnstrålingen. Figur 40 viser at solinnstrålingen ikke har en høyere maksimal effekttilførsel enn ved Gardermoen, men gir en mye høyere total effekttilførsel i løpet av døgnet, da det er et konstant varmetilskudd.

Altså vil behovet for fjerning av varmelast være stor om sommeren, mens vinterstid vil det ikke være noen form for betydelig tilskudd fra sola.



- 1 Internlaster
- 2 Oppvarming
- 3 Varmebatteri
- 4 Kjøling
- 5 Kjølebatteri
- 6 Solstråling

Figur 40: Solinnstråling sommer Honningsvåg



Figur 41: Solinnstråling sommer Oslo lufthavn, Gardermoen

10.5.4 Internlast

Internlast gjelder belysning, teknisk utstyr og varmetilskudd fra personene til stede gjennom døgnet. Det er drift i flytårnkabinen alle dager i uka, og driftsmønster for belysning og teknisk utstyr satt i SIMIEN er for tidsperioden 07.00-20.00. Varmetilskudd som resultat av personbelastning er satt i SIMIEN til å være for tidsperioden 07.00-18.00. Disse driftsdataene er tatt fra simuleringsdata mottatt av Multiconsult.

Tabell 23: Internlast i tårnkabinen

Internlast	Årlig energibruk(kWh/m ²)
Belysning	91,3
Teknisk utstyr	202,6
Personer	8,1

Gjennomsnittlig varmetilskudd over året, altså alle internlaster, ligger på til sammen 34,5 W/m².

10.6 Befaring i flytårnet ved Trondheim lufthavn, Værnes



Figur 42: Kontrolltårnet ved Trondheim lufthavn, Værnes

I forbindelse med oppgaveskrivingen ble det gjort et besøk i flytårnet ved Værnes flyplass. Her ble det gjort vurderinger av klimatiseringsløsningen, samt at det ble holdt en uformell samtale med flygelederne om deres opplevelse av innneklimaet.

Klimatiseringsløsningen som er valgt i flytårnkabinen på Værnes er identisk som den i Honningsvåg, med unntak av at det er valgt kjøling fra kjølehimling i stedet for kjølebafler. Tårnkabinen ved Værnes ble ferdigstilt i 2005, og er større både i

gulvareal og volum. Utformingen av klimatiseringsløsningen er gjort av MEK Consult AS[62].

Radiatorene og tilluftsspjeldet for ventilasjonsluften kan sees i figurene 43 og 44. Radiatorene er laget som flere rør som tilføres varmtvann. Ventilasjonsluften blir tilført med omrøring lavt nede i teknisk mellomgulv. Luften blir tilført med konstant luftmengde og med regulert, konstant temperatur. Tilførselen skjer gjennom små dyser med mulighet for regulering av retning på tilluften. Kjøleanlegget består av distribuert isvann til kjølehimling, der takplatene har mellomrom og små hull til gjennomstrømming av luft. Dette er vist i figur 27 i avsnitt 5.3 om kjøletak.



Figur 43 og Figur 44: Radiatorer plassert under vinduene(t.v), og tilluftsventilene plassert lavt i teknisk mellomgulv

Samtalene med flygelederne[29] gikk på opplevelsen av det termiske inneklimaet, da det var parameteren som er enklest å registrere. Det var samstemmighet blant flygelederne, 4 stykker i antall, om at det var alt for kaldt om vinteren, og samtidig alt for varmt om sommeren. Kjølebehovet om sommeren var da så stort at det var blitt installert 2 stk. air-conditionere på 3 kW hver i takhimlingen i ettertid. Vinterforholdene krevde tykk påkledning for opprettholdelse av termisk komfort.

Konklusjonen ut av befaringen var at løsningen med kjølehimling ikke klarte å ta unna stor nok del av kjølebehovet. Med tanke på at det var nødvendig å installere to separate kjølere i tillegg setter et spørsmålstegn ved den valgte klimatiseringsløsningen. En løsning med kjølebafler, som i Honningsvåg, vil trolig gi et bedre resultat, da de ikke er dekket til av takplater og gir en friere konveksjon og strålingsutveksling. Det ligger også en usikkerhet med effektiviteten av omrøringsventilasjonen. Dette vil bli diskutert i neste avsnitt, da dette er samme løsning som i Honningsvåg. Det samme gjelder for radiatorene og varmetilførselen om vinteren.

11. Vurderinger av Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning

11.1 Resultater fra SIMIEN

Årssimulering:

Tabell 24: Årlig energibudsjett for tårnkabinen

Energipost	Energibudsjett	
	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	4925 kWh	68.7 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	9752 kWh	136.1 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3a Vifter	7536 kWh	105.2 kWh/m ²
3b Pumper	2140 kWh	29.9 kWh/m ²
4 Belysning	6537 kWh	91.2 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	14514 kWh	202.5 kWh/m ²
6a Romkjøling	10812 kWh	150.9 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	78 kWh	1.1 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	56294 kWh	785.6 kWh/m ²

Resultatene fra simuleringen med Multiconsults klimatiseringsløsning gir et årlig netto energibehov på 56.294 kWh for tårnkabinen. Levert energi lå på til sammen 45.868 kWh. Teknisk utstyr står for den største energiposten med 25,8 %, og dekker sammen med ventilasjonsvarme og romkjøling 62,3 % til sammen. Energipostene er vist i figur 24. Årlige energikostnader som følge av kjøpt energi i form av direkte elektrisitet og elektrisitet til varmepumpesystemet er på 36.695 kr.

Sommer- og vintersimuleringer:

Det er gjort simuleringer for både sommer- og vinterforhold. Flygelederne har for begge årstider en bekledding og en aktivitet satt til hhv. 1 clo og 1,2 met.

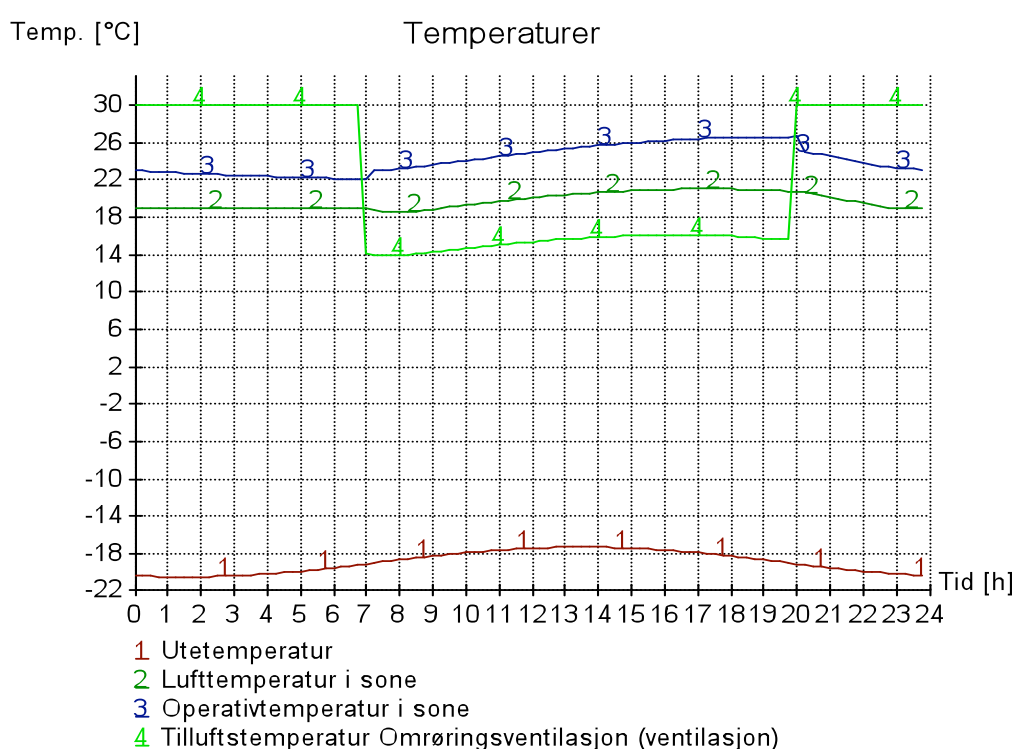
For vinterforhold er simuleringer gjort 16. Januar og i 3 døgn.

Det er i denne perioden litt temperaturer representert i tårnkabinen. Den operative temperaturen i tårnkabinen overskrider kravene på 25°C klokken 12.00, og ender på over 26°C på slutten av dagen (blå graf vist i figur 45). Dette gir en ekstra lav temperatur på ventilasjonsluften, rundt 14°C, som vil kunne føles ubehagelig og trekkfull. PPD-indeksen for innnetemperaturen er ved arbeidsstart på 13 % misfornøyde, men synker ned til under 10 %.

Det er litt usikkert hvorfor resultatene fra simuleringene viser slik høy operativ temperatur, men det tenkes å skyldes at det bare er beregnet en bekledding på 1 clo i

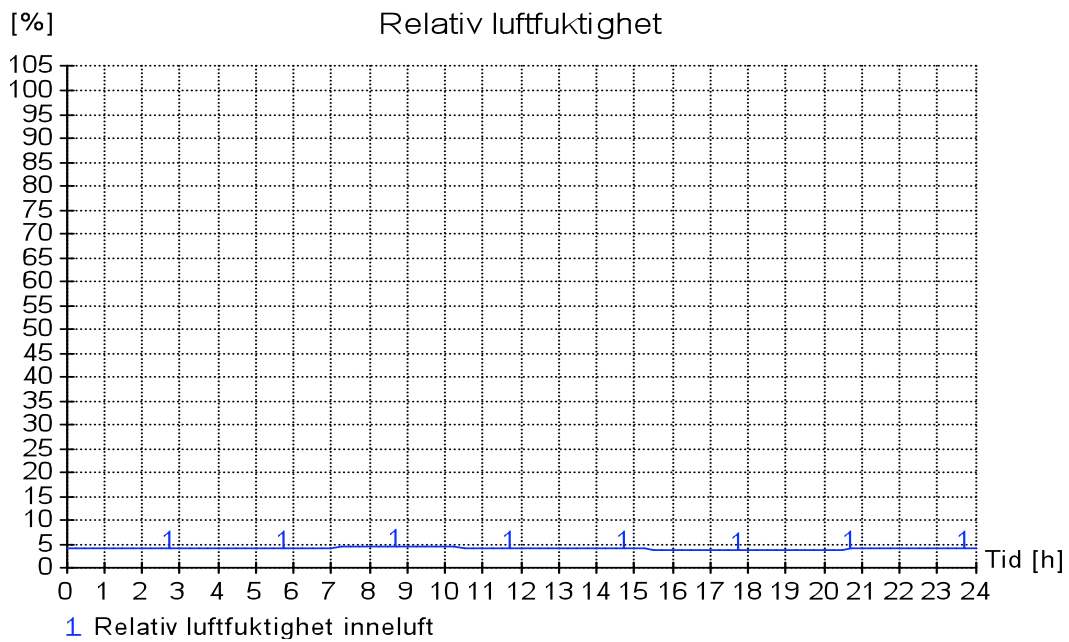
simuleringene, som er litt lite for vinterforhold. I og med at den laveste og høyeste misfornøydheten oppstår ved operativ temperatur på 25°C og 22°C, samt at det vises samme misfornøydhethet ved 27,5°C som ved 23,5°C (PPD = 7 %). Dette kan vise at det er den tynne bekleddingen som krever en høyere operativ temperatur i tårnkabinen. Det er ikke mulig å stille på bekledding eller aktivitet i SIMIEN, så det har ikke vært mulig å få ut noen håndfaste resultater for dette.

Normalt skal operativtemperaturen være gjennomsnittet av luft- og strålingstemperatur. Dette betyr at strålingstemperaturen er nødt til å ligge høyt, i og med at lufttemperaturen ikke ligger jevnt mellom 19°C og 21°C. Klokket 15.00 ligger lufttemperaturen på 21°C og den operative temperaturen på 26°C, noe som vil si at strålingstemperaturen må ligge på 31°C. Dette gir god luftkvalitet for tårnkabinen, da luftentalpien ikke er høy.



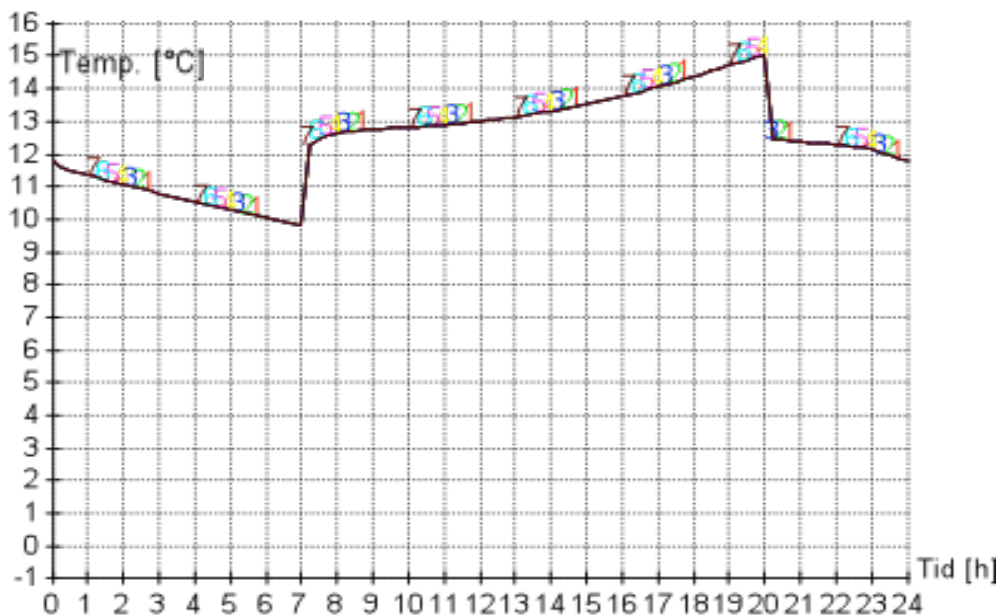
Figur 45: Temperaturforhold i tårnkabinen vinterstid

Relativ luftfuktighet ligger jevnt under 5 %, og vil være en kilde til følelse av blant annet tørr luft og tørre luftveier. Nederste grense for relativ luftfuktighet ligger på omtrent 20 % for at det skal være behagelig for okkupertene. Resultatet fra simuleringene til relativ fuktighet er vist i figur 46.



Figur 46: Relativ fuktighet i tårnkabinen vinterstid

CO₂-verdiene er derimot på et godkjent nivå, jevnt 390 ppm, med samme verdi som om sommeren, noe som ikke er overraskende, i og med at kildene til CO₂ er identiske året igjennom. Duggpunktstemperaturen på romluften ligger langt under overflatetemperaturen til vinduene. I tillegg er som sagt luftfuktigheten veldig lav, og det vil ikke oppstå kondens på rutene i tårnkabinen.



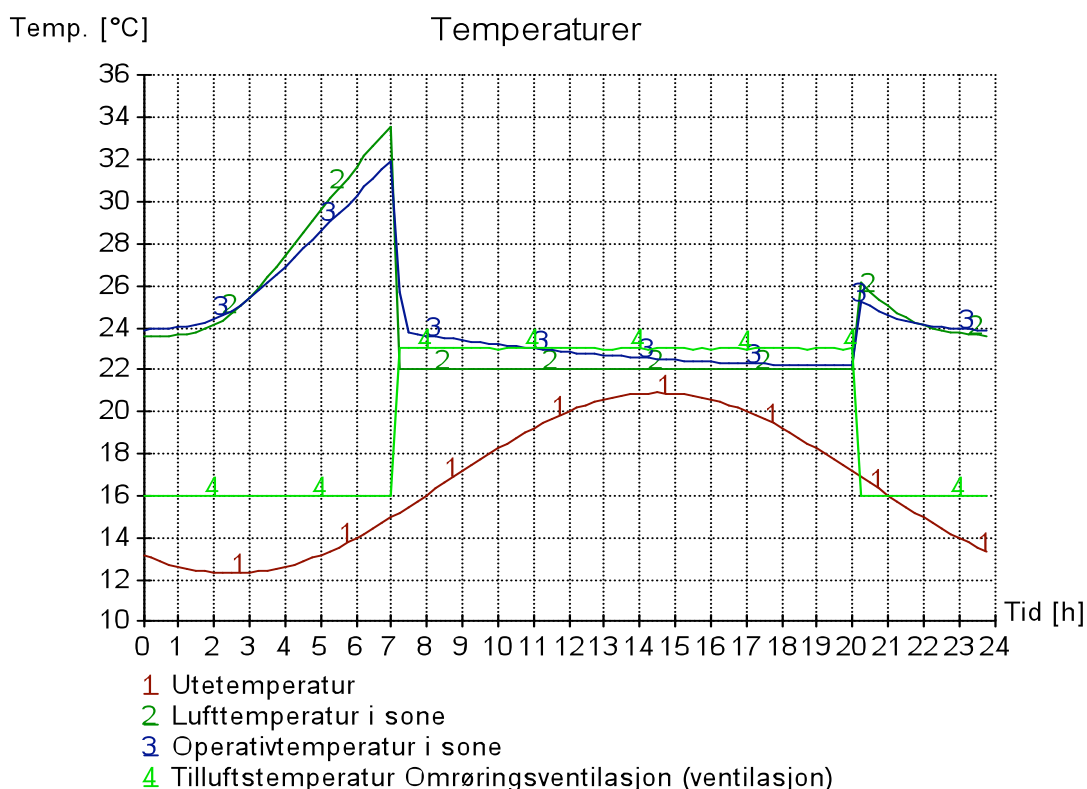
Figur 47: Temperaturasymmetri mot vindusflatene, nummerert fra 1-7

Et problem i følge resultatene, er temperaturasymmetri vendt mot de kalde vindusflatene i tårnkabinen. Dette er vist i figur 47. Dette er ingen overraskelse med tanke på de store vindusarealene som vil holde en ganske lav temperatur. Tidlig på dagen er temperaturasymmetrien på 12°C, som er litt over grensen, og øker videre til 15°C når innetemperaturen stiger.

Antall misfornøyde som følge av kaldras fra vinduene er vist å være opp mot 40 %. Dette blir ikke et reelt problem i tårnkabinen, da kaldraset stort sett vil rase ned i teknisk mellomgulv.

For sommerforhold er simuleringer gjort 20. Juli og i 5 døgn.

Både CO₂-verdier og operativ temperatur ligger på et akseptabelt nivå, med maksimumsverdier på 390 ppm og 23,8°C. Verdiene for blant annet operativ temperatur og lufttemperatur i tårnkabinen er vist i figur 48. Relativ luftfuktighet ligger jevnt på 48 % gjennom arbeidsdagen, og PPD-indeksen for innetemperaturen ligger jevnt mellom 5 og 10 % for hele perioden.



Figur 48: Temperaturforhold for tårnkabinen sommerstid

Dermed viser simuleringene gjort i SIMIEN at de inneklimate verdier for sommerperioden ligger godt innenfor kravene for god luftkvalitet og termisk komfort.

Evaluering opp mot byggforskriftenes energikrav:

Tabell 25: Resultater av evalueringen

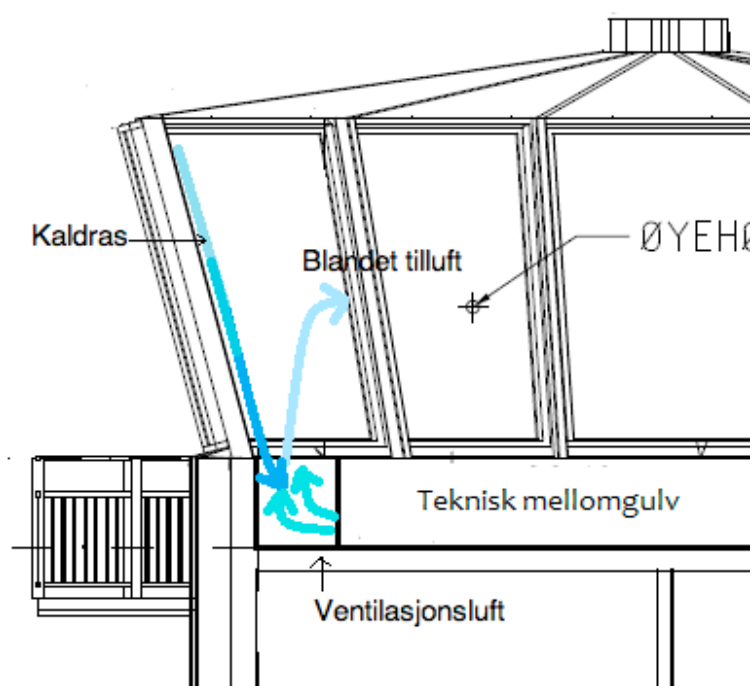
Resultater av evalueringen	
Evaluering av	Beskrivelse
Energiltak	Bygningen tilfredsstillter ikke kravene til energiltak i paragraf §8-21 a
Varmetapsramme	Bygningen tilfredsstillter ikke omfordeling energiltak (varmetapstall) ihht. §8-21 a
Energiramme	Bygningen tilfredsstillter ikke energirammen ihht. §8-21 b
Minstekrav	Bygningen tilfredsstillter minstekravene i §8-21 c
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstillter ikke minstekrav gitt i NS3031:2007 (tabell A.6)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstillter ikke byggforskriftenes energikrav

Resultatene fra evalueringene viser at tårnkabinen ikke tilfredsstillter byggeforskriftenes energikrav. Dette er i utgangspunktet på grunn av store vindusarealer, som ikke er anbefalt grunnet stort energitap til omgivelsene. Dette er grunnen til at § 8-21 a) ikke er tilfredsstillt, og som fører til et så stort varmetap at heller ikke energirammen tilfredsstilltes i § 8-21 b). U-verdiene og lekkasjetallet er alle godkjente i § 8-21 c) for tårnkabinen. Luftmengdene er i følge tabell A.6 i NS 3031:2007[33] ikke godkjent, men dette er fordi det her kreves luftmengder utenfor drift, noe det ikke er regnet med for tårnkabinen.

11.2 Vurdering av systemløsningen

I tillegg til utfordringene med klimatiseringsløsningen som ble påpekt i delen med resultatene fra SIMIEN, er det flere problematiske scenarier som taler for at forholdene i tårnkabinen ikke vil være optimale.

Om vinteren er det viktig å forsyne flygelederne med tilstrekkelig varme og god luftkvalitet. Enkelte aspekter med den valgte klimatiseringsløsningen kan skape problemer med å oppnå dette.



Figur 49: Blanding av ventilasjonsluft og kaldras

Om vinteren vil det oppstå kaldras fra innsiden av vinduene i tårnkabinen. Dersom kaldrasen over teknisk mellomgulv ikke blir tilstrekkelig stoppet, vil det synke kald luft ned i teknisk mellomgulv og blande seg med den tilførte varme ventilasjonsluften, for så å føres ut i rommet. Dette er vist i figur 49. Dette fører til at tilluften ut til oppholdssonen delvis synker i temperatur, og kan da gi et høyere energibehov for å oppfylle ønsket termiske kriterier for okkupantene.

Det vil kunne oppstå et betydelig kaldras fra vinduet som er festet sammen med nivået hvor flygelederene oppholder seg. Her vil kaldrasen rase fritt ned, og fordele seg utover det øverste nivået og gjøre det kaldt på gulvet, slik at det oppstår høyere vertikal temperatur enn ønsket for okkupantene. Dette vil føre til større termisk diskomfort for flygelederene, og vil føre til et ønske om et generelt høyere temperatur i tårnkabinen for å få tilført nok varme til kroppen. Dette vil igjen føre til høyere kostnader knyttet til oppvarmingen av rommet. Normalt vil det ikke være nødvendig med varmeavgiver for vinduer med U-verdi mindre enn $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ [63], men det er

aldri mulig å stoppe kaldras helt, særlig med slike store dimensjoner som på vinduene i tårnkabinen. Simuleringsresultatene viste også at det vil være kaldras til stede, da det ble simulert en PPD på hele 40 %.

Slik plasseringen er for radiatorene og tilluftsventilen for ventilasjonen, vil det kunne oppstå et problem med tilstrekkelig varmetilførsel til flygelederne. Arbeidsbordet vil i stor grad virke som et skjold mot varmen fra de fleste kantene. Varmetilskudd fra ventilasjonsluften vanskeliggjøres på grunn av arbeidsbordets plassering, og usikkerheten ved omrøringsventilasjonens kvalitet, samt at radiatorene vil være plassert for langt ned og bak skrivebord til å kunne tilføre tilstrekkelig med varmestråling direkte til kroppen. Dette gjelder særlig for behovet for varmetilførsel til nederste del av kroppen, som er plassert "under" skrivebordet. Noe varmestråling vil det komme fra radiatorene plassert i motsatt ende av tårnkabinen, men dette blir bare varmetilførsel i mindre grad på grunn av stor avstand.

I tårnkabinen vil det bli montert radiatorer/konvektorer som varmeavgivere på veggene i teknisk mellomgulv. Med en konveksjonsfaktor på 0,5 vil det i samhandling med omrøringsventilasjonen kunne bli veldig mye luftbevegelse og turbulens i de kaldeste periodene. Også større hastighet på tilluften vil kunne føre til det samme problemene om sommeren. For mye luftbevegelse og turbulens i oppholdssonen vil skape en følelse av trekk for okkupantene, og skaper en termisk ubalanse.

Selv om filteret i ventilasjonsanlegget normalt klarer å filtrere luften som strømmer igjennom for luftbårne partikler, og den samme luftbevegelsen og luftturbulensen vil virvle opp finstøv fra andre steder i rommet. Store luftstrømmer gjør at bakterier, støv og partikler distribueres fra kilder og ut med luften, og det fører til en større fare for spredning og inhalering av forskjellige forurensinger.

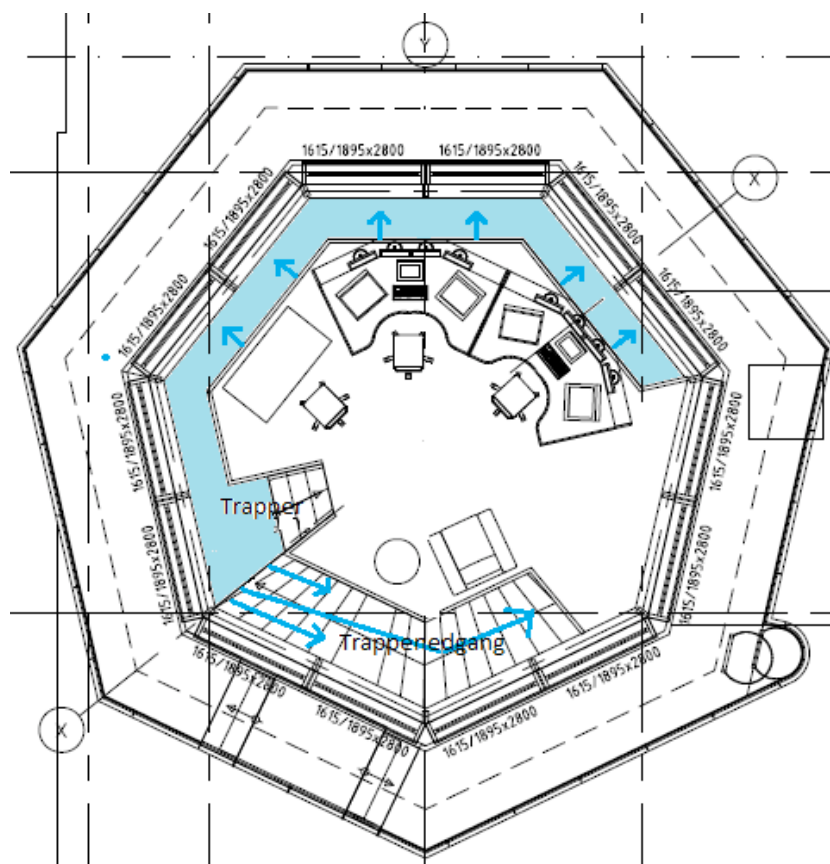
Om sommeren vil det kunne oppstå andre problemer relatert til kjølebehovet og til fjerning av varmluft.

Hastigheten på tilluften er essensiell for å få en omrøring i oppholdssonen som er god nok. Om sommeren må den kalde luften ha stor nok hastighet for ikke å bare synke og bli liggende ved gulvet i servicegangen. Det kan derfor oppstå problemer med å tilføre flygelederene tilstrekkelig kald ventilasjonsluft i sommermånedene. Det er nevnt i forprosjektrapporten at lufttilførselen skjer i bakkant i servicegangen for å hindre trekkfølelse, men dette kan samtidig vanskeliggjøre full omrøring og temperaturendring av luften i oppholdssonen.

Det ville vært uheldig om ikke ventilasjonen gir godt nok termisk inneklima, men luftkvaliteten er vel så viktig. Dersom ikke nok frisk og ren luft blir tilført pustesonen, vil konsentrasjonen av bl.a. CO² stige høyere enn ønsket. Dette kan gå utover blant annet konsentrasjonen og tvevnen til flygelederene.

Ved for lav hastighet på tilluft vil deler av ventilasjonsluften vende av luftstrålen på vei ut i rommet, og heller synke. Den kalde ventilasjonsluften som legger seg i

teknisk mellomgulv kan da enkelt synke ned til underetasjen. Dette fører til et større behov for kjøling i tårnkabinen. Scenarioet er vist i figur 50.



Figur 50: Kaldluften synker fra teknisk mellomgulv ned trappeoppgangen

En solfaktor på 35 % kan gi stor total solinnstråling om sommeren, og vil sammen med varmekilder innendørs i tårnkabinen kunne lede til en sjiktning med varm luft i takhøyde. Dette kan skape problemer dersom sjiktet blir tykkere og synker for langt ned mot flygelederens oppholdssone, da det vil føre til en uønsket temperaturstigning, og en større vertikal temperaturdifferanse.

Andre forhold som kan påvirke, er eksempelvis plasseringen av luftinntaket til ventilasjonsluften. Den er plassert på vegg mot vest, som delvis vender mot rullebanen, noe som kan gi et større inntak av VOC og partikler generert av flytrafikken.

Filteret som er installert i ventilasjonsanlegget som forsyner tårnkabinen er av typen EU7, og filtrerer ut finstøv mellom 0,2-3 μm , som røyk(sot), tobakksrøyk og bakterier. Utskilleprosentsen ligger på mellom 80 og 90, så utskillingen av forurensing i partikkelform vil være akseptabel[22]. Problemet ligger i forurensing i form av gass som kan være tilstede på en flyplass. Både forurensing fra take-off og landing, samt fra lagret drivstoff etc. kan føre til en forverring av kvaliteten på tilluften til ventilasjonsanlegget.

Sensorene i tårnkabinen er plassert omtrent en halv meter under maksimal takhøyde midt i rommet, og måler CO_2 -nivå og lufttemperatur. Svakheten til

sensoren som er installert i tårnkabinen ligger både i plasseringen og hva den måler. Med tanke på termisk komfort registrerer sensoren bare lufttemperaturen, noe som er en svakhet i forhold til at stråling vil ha mye å si i et rom dekket med så store vindusarealer som i et flytårn. Også luftfuktigheten kunne med fordel vært overvåket med tanke på kondens og tørr luft. Plasseringsmessig kan det være et problem at sensoren for temperaturen henger for nærme taket med tanke på varmesjiktning og kjølebafler i taket, som kan virke forstyrrende på målingene. Sensoren vil da kunne oppgi en annen temperatur enn hva det egentlig er i oppholdssonen.

Varmegjenvinneren som er installert er av regenartiv type, og vil i praksis kunne overføre deler av avkastluften rett inn i tilluften. Dette problemet vil oppstå ved for dårlig vedlikehold og renhold av anlegget.

Det er et varselsskudd at tårnkabinen ved Værnes flyplass har så store problemer med det termiske inn klimaet. Klimatiseringsløsningen er veldig lik, særlig vinterstid. Oppvarming med radiatorer og ventilasjonsluft tilført bak arbeidsbordene ved omrøring, er tydeligvis ikke en optimal løsning. Det kreves en mer gjennomtenkt måte å tilføre nok varme direkte til flygeledernes oppholdssone. Om sommeren er kjølehimlingen forskjellen for klimatiseringsløsningene mellom tårnkabinene, og kan være kilden til problemene ved Værnes. Allikevel bør det her også gjøres forbedringer, slik at det ikke blir nødvendig å installere ekstra air-condition enheter i ettertid, som var nødvendig å gjøre i tårnkabinen ved Værnes.

11.3 Anbefalte forbedringer ved den foreslåtte løsningen

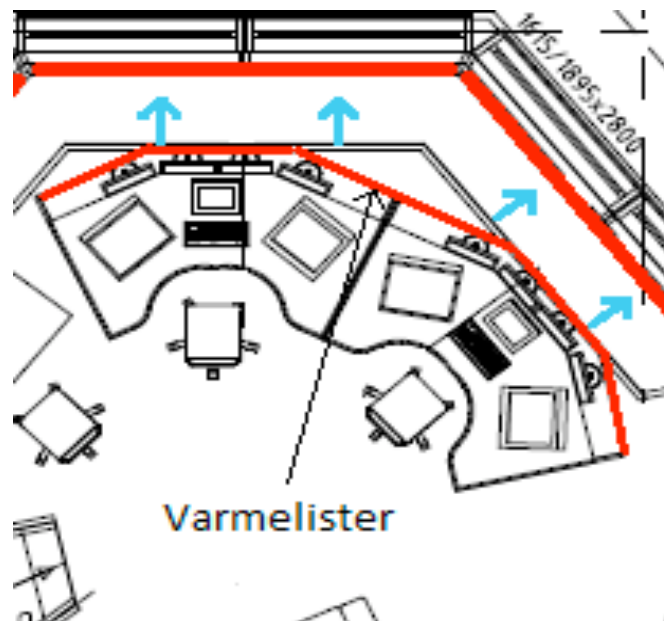
For Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning er det som påpekt i de foregående avsnittene flere scenarier som kan føre til enten et økt energibehov eller et forverret inn klima for flygelederne. Ved enklere eller mer kompliserte løsninger, vil det kunne oppnås forbedringer for klimatiseringsløsningen.

For problemet med sammenblanding av kaldras og ventilasjonsluft om vinteren, vil det være en mulighet å heve tilluftsventilene noe i høyden. Ved en høyere plassering vil ikke varmluften blande seg i like stor grad med den nedadgående, kalde luftstrømmen. For høy hastighet på ventilasjonsluften inn mot kaldraset ved vinduet vil kunne gi trekk ut i rommet, grunnet at den blir blandet med kaldraset, og at de sammen lager en mikset luftstråle ut i rommet. Dermed er retning og hastighet på tilluften av stor betydning for de termiske forholdene. For at dette skal kunne bestemmes på en ordentlig måte, bør det gjennomføres CFD-analyse*, slik at luftstrømmene kan simuleres og analyseres. Også de termiske forholdene vil enklere synliggjøres for tårnkabinen ved en slik simulering.

Forsyningen av god nok termisk komfort for flygelederne er som sagt avgjørende for et godt arbeidsmiljø og maksimal ytelse i jobben. For dårlig oppvarming i tårnkabinen er en utfordring vinterstid, og eksempelet over med nedkjøling av

* En CFD-analyse stammer fra fluidmekanikken, og bruker numeriske beregninger og algoritmer til å løse og analysere problemer relatert til fluide strømnings.

ventilasjonsluft ved kaldras kan føre til lavere varmetilskudd til flygelederne. Dette problemet kan løses ved å feste varmelister på innsiden av skrivebordet, som vist i figur 51. Det vil være mulig for flygelederne å styre varmetilskuddet fra arbeidsbordet. Varmelisten vil avgi omtrent 60 % av varmen via stråling direkte til nederste del av kroppen, og på samme tid avgi resten som konvektiv varme opp og ut fra skrivebordet til oppvarming av overkroppen. Arbeidsbordet er delt i to av en plate, og dermed oppstår muligheten for personlig styring av varmetilførselen.



Figur 51: Forslag til løsning med varmelister under skrivebord

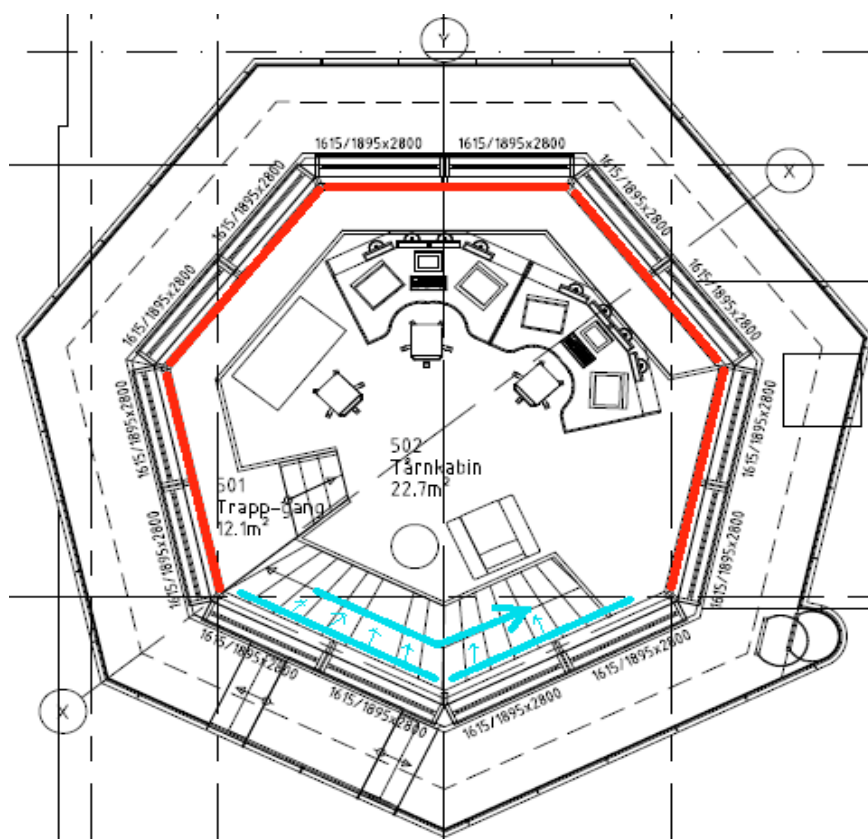
Også lokal gulvvarmeanlegg rundt og ved arbeidsbordet hvor flygelederne er stasjonert er et alternativ, men det er gjort lite forsøk med eksponering for denne oppvarmingsløsningen. Det ligger som tidligere sagt en usikkerhet i om kroppens varmebalanse kan bli negativt påvirket av konstant tilførsel av varme gjennom føttene. Normalt vil varmetapet til grunnen eller til kalde, underliggende rom være stort, men i tårnkabinens tilfelle vil dette ikke være et problem.

Rundt arbeidsbordet kunne det tenkes å tilføre forskjellige former for personlig ventilasjon. Under arbeidsbenken vil det være mulig med en tilførsel av ventilasjonsluft med lav hastighet, slik at det eventuelt kan varmes opp med varmluft vinterstid og undertemperert tilluft sommerstid ved behov. Forskjellige enheter, særlig VDG-typen, vil være aktuell for ventilering direkte til kroppen. For å oppnå høy nok luftkvalitet i pustesonen vil eventuelle svakheter med full omrøring for omrøringsventilasjonen tale til personlig ventilasjon sin fordel, da luftkvaliteten er viktig i tilfellet med flytårnkabiner. Med frisklufttilførsel fra PV-enheter oppnås en tilnærmet forurensningsfri pustesone for flygelederne. Personlig ventilasjon vil kunne forsyne pustesonen med tilstrekkelig friskluft, samtidig som det blir enklere å regulere det lokale termiske klimaet. Bruken av personlig ventilasjon vil føre til en positiv effekt ved at flygelederne oftere vil oppleve termisk komfort. For å oppnå godkjent ventilasjonseffektivitet uten personlig ventilasjon bør enkelte av tilluftsventilene for omrøringsventilasjonen plasseres annerledes. Dermed nevnes igjen viktigheten av riktig installering og dimensjonering av ventilasjonsanlegget.

Plasseringen bør være slik at luften dirigeres i riktig retning, og med en slik hastighet og temperatur at det ikke oppstår dødsoner som fører til svekket luftkvalitet for flygelederne. Samtidig kan følelsen av trekk som sagt også være et resultat av for store luftmengder man ikke har muligheten til å kontrollere.

Oppvirvling av støv på grunn av store luftstrømmer kan være vanskelig å unngå. Det hjelper ikke bare med filtrering av tilluften, men også generell rengjøring av rommet er essensielt for en høy kvalitet på inneluften. Særlig for områdene rundt tilluftsventilene for ventilasjonsluften er det viktig med regelmessig rengjøring, særlig av horisontale flater. Personlig ventilasjon kan være et alternativ for friskluft til pustesonen, men man bør ikke sette sin lit til at personlig ventilasjon skal være løsningen alene, da man ikke alltid tar denne i bruk. Vanlig ventilasjon og rengjøring skal være godt nok til å unngå dårlig luftkvalitet for okkupantene.

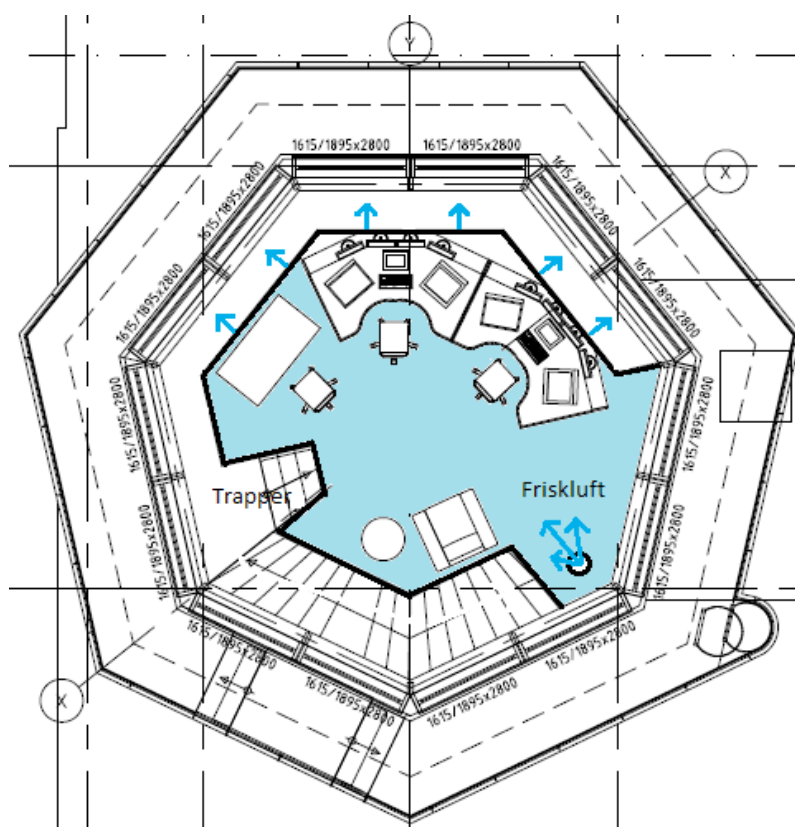
Kaldraset ved øverste nivå kan enkelt stoppes ved å plassere en radiator under vinduet. Kaldraset vil da bli stoppet av den oppadgående varme konveksjonsstrømmen som blir satt opp av radiatoren. Det kan også her bli et problem med en blandet, utadgående luftstrøm som oppstår på grunn av miksingen av kaldraset og konveksjonsstrømmen. Dette problemet avhenger av impuls og hastighet på begge luftstrømmene. Det er mulig å minke kaldraset dersom radiatoren avgir mye varmestråling. Da vil innsiden av vinduet få en høyere temperatur, og ikke like mye omkringliggende luft blir kjølt ned.



Figur 52: Forslag til løsning for kaldras på øverste nivå

Dersom det er å foretrekke at effektbehovet ikke økes for flytårnkabinen, kan den ene radiatoren plassert over trappeoppgangen flyttes til nevnte plassering. Dermed kan kaldrasen bare rase over vinduene, og blir så fjernet ved at det synker ned trappene til etasjen under. Dette er vist i figur 52.

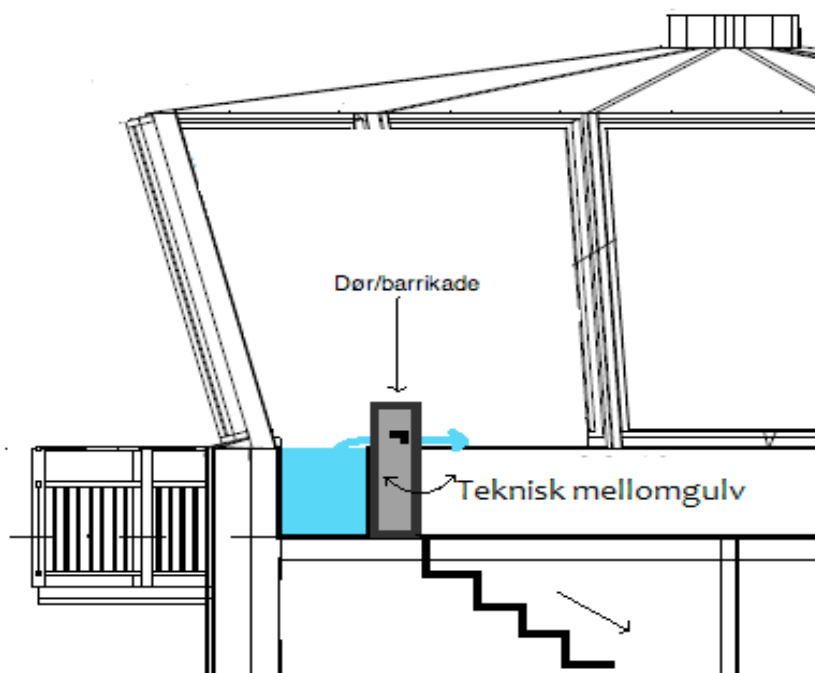
For å oppnå termisk komfort om sommeren må kjølebehovet for flygelederne dekkes. Det er mulig å tilføre ventilasjonsluft med litt lavere hastigheter, avhengig av plassering av tilluftsventil, på nivået hvor flygeleiderne sitter. Plasseringen av lufttilførselen kan legges enten i nærheten av skrivebordet, eller eventuelt i hjørnet hvor det ikke er plassert noen møbler, ved siden av trappeoppgangen, som vist i figur 53. Da vil det bre seg et teppe av underkjølt tilluft utover det øverste nivået, forutsatt at det er plassert en langsgående kant rundt hele plataet, slik at kaldluften ikke strømmer ned. Da vil den kalde luften konvektivt avkjøle personene og varmekildene som er plassert på nivået. Dette er ikke tenkt som personlig ventilasjon, men som en del av totalvolum-ventilasjonen i tårnkabinen.



Figur 53: Forslag til løsning med underkjølt tilluft og langsgående kanter på øverste nivå

For å minske kjølebehovet på grunn av kaldluft som synker til underetasjen om sommeren, vil en mulighet være å lage en barrikade eller en svingdør ved teknisk mellomgulv ned mot trappeoppgangen. Kaldluften bør fanges i teknisk mellomgulv, slik at den herfra kan bygge seg oppover til nivået til flygeleiderne, hvor luften kan virke som avkjølingsmedium. Dette er vist i figur 54. Det bør også som tidligere nevnt lages en langsgående kant for plataet hvor flygeleiderne sitter på, slik at

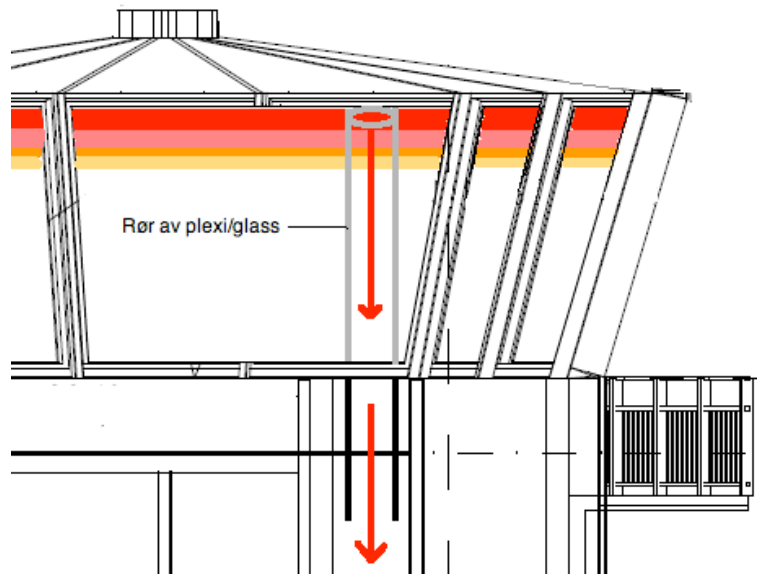
kaldluften ikke forsvinner ned herfra. Deler av den langsgående kanten bør være flyttbar, slik at det på denne måten skal være mulig å fjerne kaldluft om vinteren.



Figur 54: Forslag til løsning med dør/barrikade som forhindrer kaldluften fra å synke ned trappeoppgangen.

Luftsjakter til avtrekk fra taket vil normalt vært en god løsning på problemet med store mengder varmluft ved takhøyde som sjiktes ned mot oppholdssonen, for eksempel ved bruk av fortrenningsventilasjon. Visuelle hensyn og kravspesifikasjoner for flygelederne vanskeliggjør imidlertid muligheten for å legge store rør opp til taket i tårnkabinen. I dette tilfellet vil det være mulig å ta i bruk et rør av plexiglass eller vanlig glass for å gi maksimalt gjennomsyn for flygelederne, selv om den er i veien for utsyn, vist i figur 55. I følge plantegningene vil det være en god løsning å plassere røret i hjørnet inn mot fjellsiden bak flytårnet. Dette byr ikke på noen store utfordringer siktmessig, da rullebanen ligger på motsatt side.

Dersom det er problemer med installeringen av et glass- eller plexiglassrør gjennom tårnkabinen, er det et alternativ å bygge inn trappeoppgangen i glassvegger. Da vil det være mulig å se igjennom, samtidig som glassinnheiningen virker som et avtrekk for den varme luften som ligger ved takhøyde. Glassveggene må bygges nesten opp til taket, og det er i tillegg nødvendig med en glassdør ved oppgangen som lukker seg igjen automatisk, slik at ikke glassinnheiningens funksjon som avtrekk ødelegges. Den varme luften vil trekkes ned gjennom innrammingen på grunn av undertrykket som blir satt opp av avtrekksluften i underetasjen.



Figur 55: Forslag til løsning for avtrekk av varmluft i takhøyde

En annen løsning for å fjerne varmluft ved takhøyde vil være å installere aktive istedenfor passive kjølebafler. Da kan man plassere et luftinntak på taket av flytårnet, samt installere et aggregat i taket over tårnkabinen. Det trengs ikke store mengder friskluft, i og med at kjølebaflene i tillegg kjøler ned den varme luften som stiger opp til taket. Friskluften og den nedkjølte luften blandes og tilføres tårnkabinen med en lav temperatur, slik at den vil synke ned mot gulvet. Dette alternativet tilfører dermed høyere luftkvalitet til oppholdssonen i forhold til passive kjølebafler valgt i Multiconsults systemløsning. Det kan på en annen side ligge en utfordring i at det oppstår for store luftbevegelser med både aktive kjølebafler og omrøringsventilasjon sammen.

For å hindre for mye varmetilskudd fra vinduene som installeres i tårnkabinen kan de lages med lavere solfaktor. Dette gir et mindre varmetilskudd fra sola om vinteren, men det er til gjengjeld sjeldent sol i 4 av månedene vinterstid på de aktuelle breddegradene. Varmetilskuddet fra sola om vinteren er tilnærmet neglisjerbar, slik at så lenge vinduene isolerer godt nok vinterstid, kan de dimensjoneres slik at det slippes inn mindre sol om sommeren.

Når det gjelder svakheter og mangler ved plassering av sensor, samt overvåkingen av det termiske og det atmosfæriske inn klimaet i flytårnkabinen, ble det utført en utredning av dette i kapittel 8. De viktigste punktene fra utredningen av den optimale plasseringen av sensoren er ved arbeidsbenken mellom flygelederne. Også en overvåking av middelstrålingstemperaturen og luftfuktigheten i dette punktet vil bidra til optimale arbeidsforhold.

Plasseringen av luftinntaket er på den vestvendte veggen. Den optimale plasseringen ville vært på den sørvendte veggen, vendt bort fra rullebanen. Men som det er mulig å se ut fra figur 33, så skal flytårnet bygges inn i fjellet, og dette kan føre til problemer med at det ikke er mulig å få plassert inntaket langt nok i fra plantevekster etc.

Det burde vært plassert et kullfilter i ventilasjonsanlegget for å fjerne eventuelle forurensinger i gassform i uteluften. Dette er ikke bare for at det normalt oppstår mye slik forurensing fra flytrafikken, men det er mange forhold på flyplassen som kan føre til eksempelvis lekkasjer og forbrenning med farlig forurensing i gassform som resultat. Finfiltrene som skal installeres vil ikke klare å skille ut gassmolekyler fra tilluften og gir dermed en usikkerhet med tanke på inneluftkvaliteten.

Det bør også vurderes å installere aktive lydfeller i ventilasjonsanlegget, slik at det ikke blir problemer med uønsket støy fra aggregat og vifter. Dette er litt vanskelig å forutse, og det bør gjøres forsøk med tårnkabiner som har samme ventilasjonsløsning.

Problemet med så lav relativ fuktighet som 5 % om vinteren gir god grunn til å installere en befukter ved tilluftskanalene i ventilasjonsanlegget. En så lav relativ fuktighet vil føre til inntørking av luftveier og slimhinner. Dette fører med seg et viktig ansvar for renhold, men det gir et bedret inneklima for flygeledeerne.

12. Alternative klimatiseringsløsninger

Ut fra forrige kapittel kan det tenkes at det finnes flere alternative klimatiseringsløsninger til den som primært har blitt foreslått av Multiconsult. Basert på vurderinger og anbefalte forbedringer vil disse alternativene funnet til å være best:

1. Omrøringsventilasjon sammen med kjølebafler, radiatorer og varmelister.
2. Fortrengningsventilasjon sammen med kjølebafler, radiatorer og varmelister.
3. Omrøringsventilasjon sammen med, kjølebafler, radiatorer og personlig ventilasjon.

Det er valgt å beholde kjølebafler og radiatorer for klimatiseringsløsningene. Passive kjølebafler tilfører ikke store luftmengder som kan føre til en høyere turbulensgrad sammen med omrøringsventilasjonen, slik aktive kjølebafler ville gjort. Kjøletak er blitt valgt bort på bakgrunn av observasjonene gjort ved tårnkabinen ved Værnes. Kjølebaflene legges åpent i taket, slik at varmluften enkelt kommer til og gir effektiv avkjøling.

Radiatorer gir en jevn og fin varme, og har normalt en stor grad av varmeavgivning ved stråling. For tårnkabinen er det originalt valgt en konveksjonsgrad på 0.5, men burde helst vært litt lavere, slik at mer varme avgis ved stråling. Alternativene vil allikevel ha en konveksjonsgrad på 0.5 for radiatorene. Alle alternativene vil få en plassering av radiatorene som vist i figur 52, hvor den ene radiatoren er flyttet to vinduer mot klokka, sett ovenifra. Dette er for å få en bedre varmefordeling på nivået der flygelederne sitter, samt å hindre kaldras fra vinduet.

Alle de alternative løsningene er basert på at flygelederne sitter stasjonært gjennom hele arbeidsdagen. Alternativene har alle løsninger basert på individuell kontroll av flygeledernes egne, lokale klima. Dette betyr at flygelederne har muligheten til å regulere enten varmetilskudd, kjøling eller begge deler for løsningene.

Alternativ 1

Det er satt spørsmål ved om omrøringsventilasjonen sammen med radiatorene gir god nok oppvarming for flygelederne i oppholdssonen vinterstid. En mulig løsning vil da være å tilføre varme fra varmelister under arbeidsbordet. Denne løsningen er altså lik Multiconsults foreslåtte, med unntak av varmelistene. Plasseringen av varmelistene vil se ut som i figur 51, og vil strekke seg omtrent 5,5 meter.

Det vil være mulig for den enkelte flygeleder å regulere varmeavgivelsen fra varmelistene under sitt arbeidsbord. Varmelistene vil få tilført varmtvann som radiatorene, og varmeavgivelsen reguleres ved vannmengde som passerer gjennom rørene i listen.

Det vil kunne bli et problem med for dårlig luftkvalitet med tilluftsventilene det er prosjektert med. Dette bør løses ved å flytte ventilene høyere opp, og gi muligheten

for litt mer styring av luftstrålen. Omrøringsventilasjon vil i utgangspunktet ikke være optimal ventilasjonsløsning for god luftkvalitet. Det ligger også en usikkerhet i om denne ventilasjonsmåten vil klare å fjerne varmelasten i de varmeste periodene om sommeren. Usikkerheten grunner i at hastighet og mengde på luftstrålen i oppholdssonen er ukjent.

Alternativ 2

Som nevnt i forrige alternativ ligger det en usikkerhet i om omrøringsventilasjon gir fullgod omrøring i pustesonen i tårnkabinen. Dersom dette ikke oppnås, vil det ikke bli høy nok kvalitet på luften som tilføres pustesonen. En løsning på det problemet kan være å bytte ut ventilasjonen fra å tilføres ved omrøring til å tilføres som fortregning.

I denne løsningen vil ventilasjonen altså tilføres som fortregning med undertemperatur og lav hastighet fra gulvhøyde eller tilluftskanal plassert litt over gulvet. For dette alternativet vil man være avhengig av ekstra forsyning av varmetilførsel til okkupasentene i tillegg til radiatorene, i og med at fortreningsventilasjon tilføres noen grader underkjølt. Det installeres derfor også varmelister under arbeidsbordene i dette alternativet. Dette sørger for full termisk tilfredshet for flygelederne vinterstid.

Ved å tilføre ventilasjonsluften ved fortregning vil forurensing fjernes med konveksjonsstrømmen som settes opp rundt personene eller forurensingskilder i tårnkabinen. Det er denne konveksjonsstrømmen som er skyld i at personlig ventilasjon ikke fungerer optimalt sammen med fortreningsventilasjon (se kapittel 6.3). Disse to ventilasjonsprinsippene ville ellers vært et naturlig valg.

Den største utfordring med denne løsningen er fjerningen av varmelasten i de varmeste periodene, samt løsning for avtrekk av varmluften ved taket. Det vil oppstå en sjiktning ved taket som består av varm og forurenset luft. Problemene med fjerning av varmelasten fører til redusert termisk komfort for flygelederne, særlig sommerstid. En foreslått avtrekksløsning er gitt i forrige kapittel, vist i figur 55, avsnitt 11.3. Dette alternativet krever altså avtrekksløsninger som ikke er optimale med tanke på Avinors visuelle krav og hensyn for tårnkabinen.

Alternativ 3

Denne løsningen er også lik Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning, med unntak av at personlig ventilasjon vil bli installert på arbeidsbordet til flygelederne. Dette gjøres for at okkupasentene skal kunne styre sitt eget lokale klima. Studier (se avsnitt 6.3) har vist at omrøringsventilasjon og personlig ventilasjon fungerer optimalt sammen. PV-luftstrålen er vist å ikke bli avbøyd så lenge hastigheten ikke er for stor for luftstrålene til omrøringsventilasjonen. Dette vil hjelpe både på den termiske komforten og luftkvaliteten i oppholdssonen både for sommer- og vinterforhold. Omrøringsventilasjonen vil være dimensjonert slik at den dekker ventilasjonsbehovet dersom PV ikke er i bruk.

Vurdering av alternativene

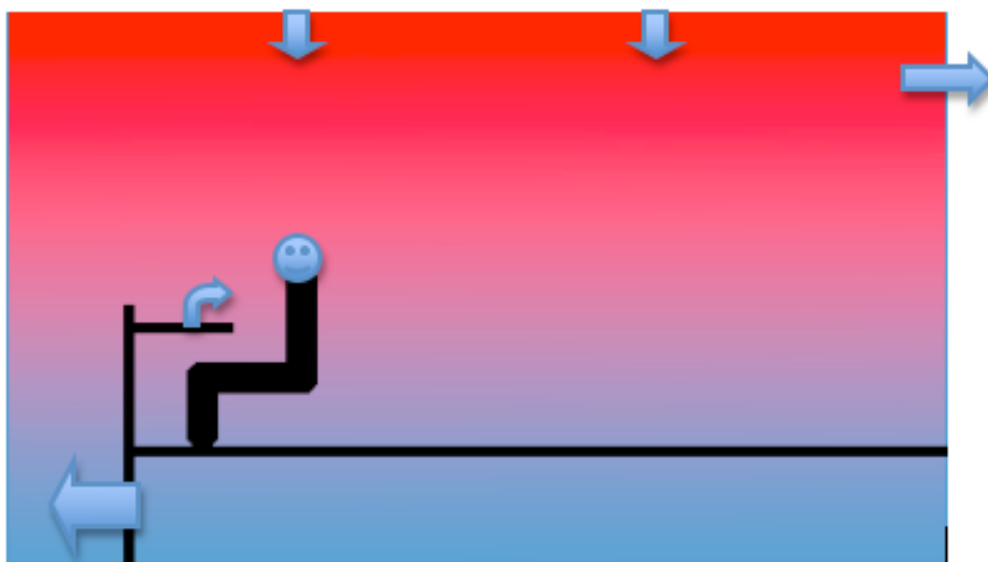
Her er alternativene vurdert på bakgrunn av luftkvalitet og termisk komfort gjennom hele året, med en klassifisering fra dårlig til bra, med nøytral som ingen endring.

Tabell 26: Vurdering av alternative klimatiseringsløsninger

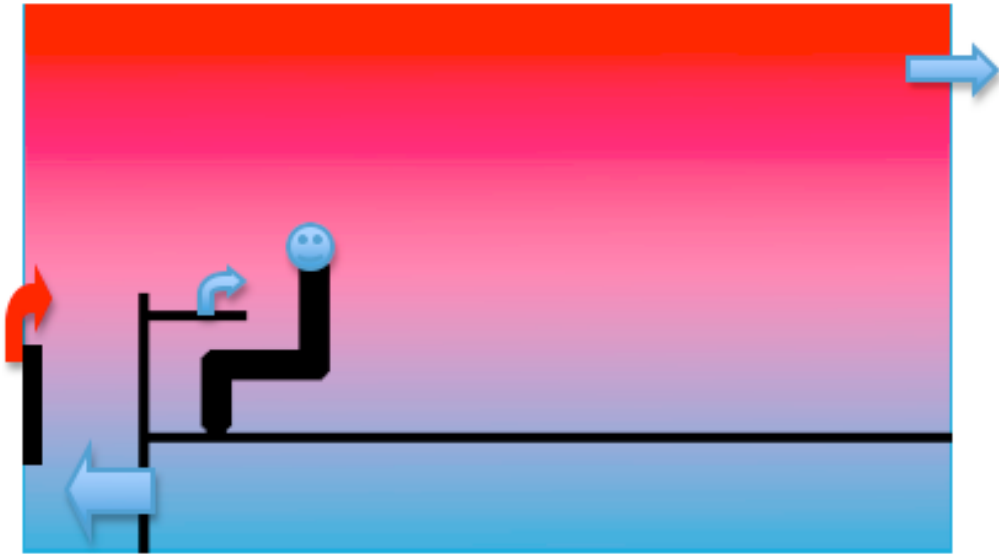
Alternativ	Luftkvalitet	Termisk komfort
Alt. 1	Nøytral	Nøytral
Alt. 2	Bra	Nøytral
Alt. 3	Bra	Bra

Alternativ 3 ble funnet som den beste løsningen for luftkvalitet og termisk komfort for både sommer- og vinterforhold. Alternativ 2 er også et godt alternativ, men er ikke funnet fullgod på grunn av problemer med fjerning av varmelast sommerstid. Alternativ 1 vil ikke gi god nok kvalitet på luften i pustesonen, og har en usikkerhet rundt effektiviteten av fjerning av varmelast om sommeren. Med bakgrunn i dette blir derfor alternativ 3 presentert mer detaljert og med simuleringsresultater, som et forslag til ny klimatiseringsløsning for tårnkabinen.

Den nye, foreslåtte klimatiseringsløsningen er vist for sommer- og vinterforhold i figur 56 og 57:



Figur 56: Foreslått løsning for sommerforhold

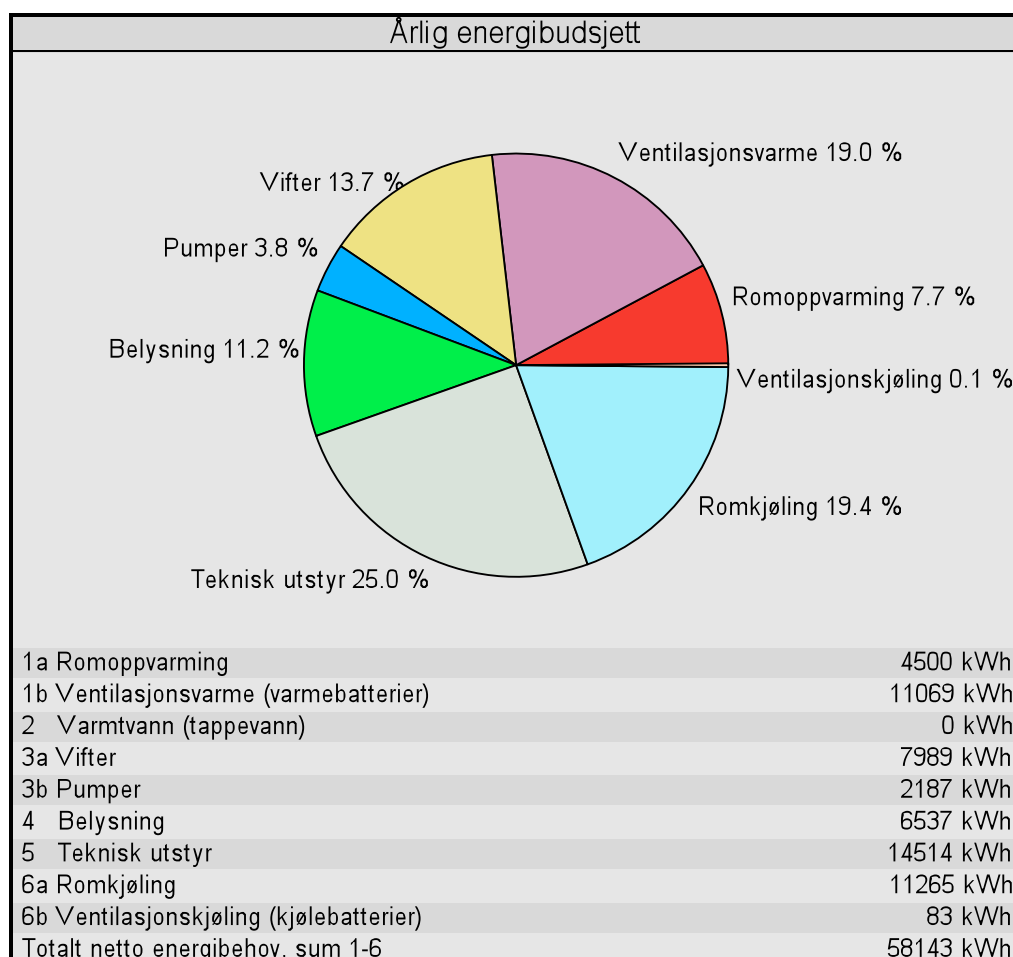


Figur 57: Foreslått løsning for vinterforhold

13. Forslag til ny klimatiseringsløsning for tårnkabinen

Forslaget til ny, forbedret klimatiseringsløsning er altså alternativ 3, med personlig ventilasjon som et tillegg til den originalt tiltenkte klimatiseringsløsningen.

Den foreslåtte klimatiseringsløsningen har veldig like resultater fra simuleringene i SIMIEN som oppnådd for Multiconsult sin originale løsning. Totalt netto energibehov for tårnkabinen vil naturlig nok øke med installasjon av personlig ventilasjon. Energiforbruket øker totalt med 1.849 kWh eller 3,2 % opp til 58.143 kWh over året. De forskjellige energipostene er vist i figur 58. Den energiposten som øker mest er ikke uventet varmebatteriets energibehov for oppvarming av ventilasjonsluft, med en økning på 1,7 %. Levert energi til tårnkabinen har økt til 45.868 kWh, en økning på 1.339 kWh, eller 2,8 %. De årlige energikostnadene øker med til sammen 1.070 kr. Dette er en lav pris å betale dersom den nye klimatiseringsløsningen gir forbedret termisk inneklima og luftkvalitet.



Figur 58: Årlig energibudsjett for tårnkabinen

Varmetapstallet øker forsiktig fra 2,89 til 2,94 W/m²K, dette på grunn av høyere varmetapstall for ventilasjon. Resultatene fra simuleringene viste samtidig en liten reduksjon i varmetapstallet for infiltrasjonen.

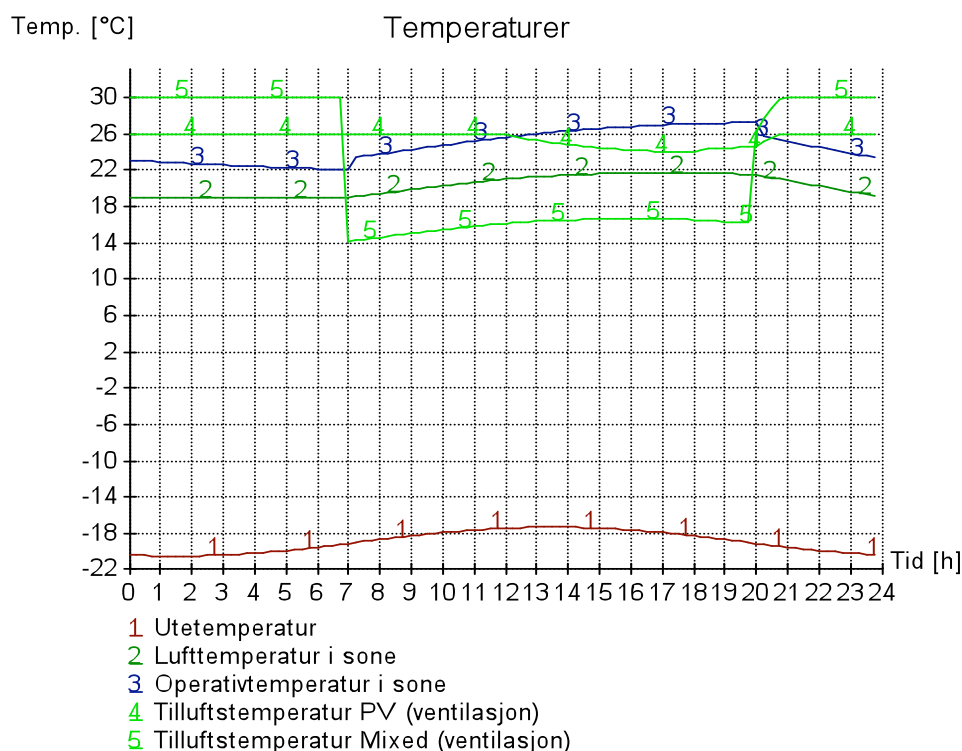
Når det gjelder resultatene fra evalueringene, viser de som for Multiconsults løsning at netto energibehov overskrider foreskriftskravene, at glass- og vindusarealene er

for store, og at luftmengdene for ventilasjonen er under minstekravet. En tårnkabin har en spesiell oppbygning og utforming for form og materialer, og det er derfor vanskelig å tilfredsstille kravene gitt for bygninger av en helt annen oppbygning og bruk.

Videre, for sommer- og vinterforhold, ser grafene for den nye, foreslåtte klimatiseringsløsningen med personlig ventilasjon tilnærmet identiske ut som de presenterte grafene i avsnitt 11.1. Dermed er ikke alle de samme grafene for simuleringen presentert her, men er nøye kommentert.

For vinterforhold for den nye foreslåtte klimatiseringsløsningen foreligger det også her noen litt uforutsette resultater for operativ temperatur. Det vises ikke noen høye verdier for PPD-indeksen for innnetemperaturen, som er godt under 10 %, bortsett fra første timen. Den operative temperaturen ligger mellom 24°C og 27°C gjennom dagen sammen med en lav lufttemperatur, noe som gir en høy strålingstemperatur. Med vinterbekledning burde dette vært over optimal operativ temperatur, men bekledningen er som sagt konstant gjennom hele året, og er muligens noe tynnere enn vanligvis for vinterforhold. Dette er også diskutert i avsnitt 11.1, og er et utfall av at det ikke er mulig å bestemme bekledningsnivå i SIMIEN.

For flygelederne finnes det med den nye klimatiseringsløsningen uansett en mulighet til å ta i bruk personlig ventilasjon for å oppnå termisk komfort, dersom den operative temperaturen skulle være utenfor det optimale området. Kravet til at operativ temperatur ikke skal øke mer enn 2,2°C i løpet av en time er innfridd for vinterforholdene.



Figur 59: Temperaturforhold for tårnkabinen vinterstid

Verdiene for CO₂ gjennom dagen ligger på under 400 ppm. Slik som for den originale løsningen er det heller ikke her noen problemer med kondens på vinduene, da overflatetemperaturene på vinduene er høye i forhold til duggpunktstemperaturen.

Den relative luftfuktigheten i tårnkabinen ligger rett under 5 % for hele døgnet. Her vil det være nødvendig å tilføre fuktighet til tilluften enten i totalvolum-ventilasjonen eller bare til den personlige ventilasjonen. Det er en mulighet å tilsette fuktighet til begge ventilasjonene, men befukterne må være plassert ved utgangen av tilluftskanalen, da sentrale befuktere er sterkt frarådet.

Det er mulig å se en viss forbedring for temperatrasymmetrien og PPD for kaldras med installeringen av personlig ventilasjon. Temperatrasymmetrien stiger saktere utover dagen, men ender til slutt på samme nivå som for løsningen uten personlig ventilasjon. Antall misfornøyde med kaldraset fra vinduene ligger litt lavere med personlig ventilasjon. Allikevel ligger verdiene for begge disse termiske parametrene over kravene som er satt. For å redusere temperatrasymmetrien fra vinduene kan det installeres radiatorer med en lavere konveksjonsgrad enn hva som er valgt for av Multiconsult. Varmestråling vil da mer effektivt varme opp innsidene av vinduene, og differansen mellom innsidetemperatur på vinduene og temperatur målt i midten av tårnkabinen vil reduseres. I gjennomførte simuleringer ligger konveksjonsgraden på 0.5 for radiatorene, og kan med fordel senkes.

I rom med store luftmengder i bevegelse kan det oppstå en ubehagsfølelse på grunn av trekk. Konvektiv trekk er, som tidligere beskrevet, en sammenheng mellom luftens fuktighet, temperatur, og ikke minst, hastighet og turbulens. I tårnkabinen tilføres ventilasjon ved omrøring, men det er dimensjonert til å levere tilluft med lavere hastigheter, nettopp for å unngå trekk. Omrøringsventilasjon har som oftest en turbulensintensitet på 30-60 %, men i tårnkabinen vil tilluftshastigheten være lav, og vil få en lavere verdi, tenkelig rundt 30 %. Ut fra figur 19, avsnitt 2.3.4, kan det leses ut at lufthastigheten ikke bør være høyere enn 0,2 m/s for 30 % turbulensintensitet og en lufttemperatur på 22°C for at 20 % skal være misfornøyde. Det vites ikke hva hastigheten har av verdi i tårnkabinen, og det kan dermed ikke sies noe om flygeledernes følelse av trekk.

Vertikal temperaturdifferanse kan oppstå vinterstid dersom det ikke blir levert nok varme direkte til nedre del av kroppen. Det vil trolig være en høyere temperatur i hodehøyde enn ved gulvet, da deler av kaldraset fra det ene vinduet på samme nivå kan tilføre kaldluft ut over gulvet. Dermed er det viktig at radiatoren som settes under dette vinduet forhindrer kaldraset så effektivt som mulig. Dette bør som sagt gjøres ved høy strålingsintensitet, slik at innsiden av vinduet varmes opp nok til å stoppe størsteparten av kaldraset.

Ved installasjon av en rekuperativ i stedet for en regenerativ varmegjenvinner, som er installert i den originale løsningen, vil kvaliteten på tilluften tilført tårnkabinen være av høyere kvalitet. En varmegjenvinner av rekuperativ type har en lavere varmegjenvinningsgrad, og det vil derfor bli et større energibehov, da mindre av varmluften blir gjenvunnet. En simulering ble gjennomført i SIMIEN, men programmet gir ikke muligheten til å velge ønsket type varmegjenvinner, bare

varmegjenvinningsgraden. Dermed er det ikke gitt en analyse av varmegjenvinnerens påvirkningen av inneklimate i dette arbeidet. Simuleringen ble gjort med en varmegjenvinningsgrad på 0.6 i forhold til 0.8 i den originale løsningen. Totalt netto energibehov er gitt i tabell 27:

Tabell 27: Energibudsjett gitt for løsning med rekuperativ varmegjenvinner

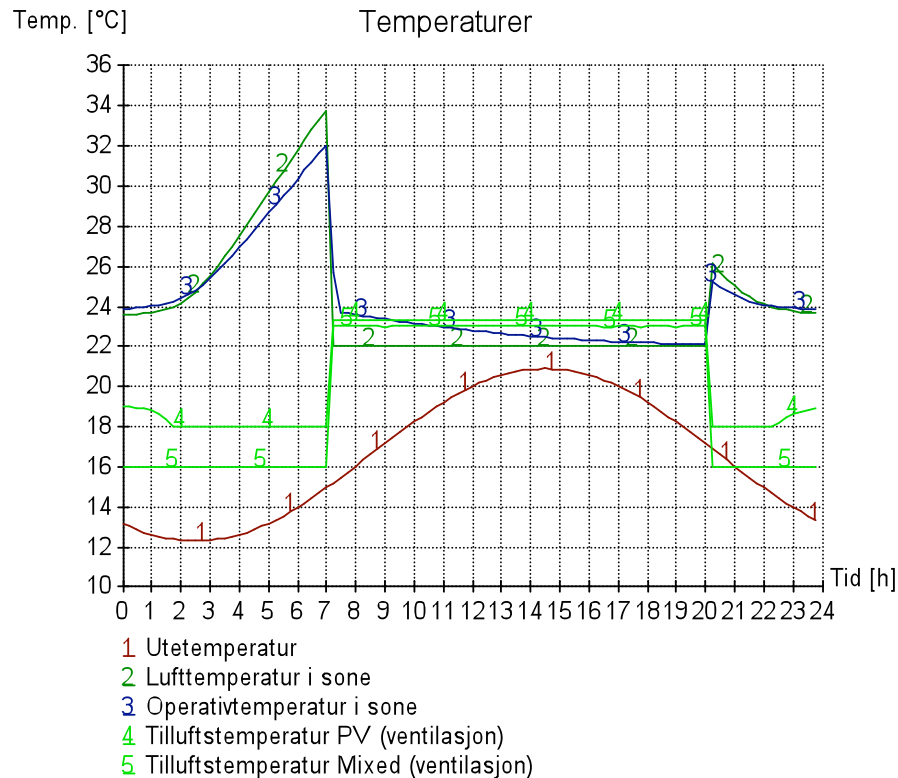
Energipost	Energibudsjett	
	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	16312 kWh	227.6 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	12694 kWh	177.1 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3a Vifter	7989 kWh	111.5 kWh/m ²
3b Pumper	2285 kWh	31.9 kWh/m ²
4 Belysning	6537 kWh	91.2 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	14514 kWh	202.5 kWh/m ²
6a Romkjøling	6071 kWh	84.7 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	83 kWh	1.2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	66484 kWh	927.8 kWh/m ²

Her er det mulig å se store forskjeller i energibehovet ved en senking av varmegjenvinningsgrad med 0.2. Energibehovet øker til 66.484 kWh totalt, en økning på 10.190 kWh, eller 15,3 %, i forhold til den originale løsningen. Dette tilsvarer 7.386 kroner for ett år. I forhold til den nye foreslåtte klimatiseringsløsningen med regenerativ varmegjenvinner var økningen på 12,3 % for totalt netto energibehov.

Grunnet at det ikke var mulig å gi noen klimatiske forskjeller for de to type varmegjenvinnere i SIMIEN, ble det i dette arbeidet valgt å bruke samme varmegjenvinner som i den originale løsningen gitt av Multiconsult, for å få et enklere sammenligningsgrunnlag. Normalt ville det vært et spørsmål om det er fornuftig å installere en rekuperativ type for å forbedre inneklimate, eller å velge en regenerativ for å holde energibehovet nede. For tårnkabinen bør det muligens velges i favør av inneklimate, altså en rekuperativ type, slik at flygelederne har et optimalt termisk inneklimate. Det bør absolutt gjøres forsøk på dette i en eksisterende tårnkabin for å se på de inneklimate gevinstene.

For sommerforhold foreligger omtrent de samme resultatene som for den originale løsningen. Resultatene for CO₂-nivå, PPD for innetemperatur, operativ temperatur og relativ luftfuktighet er alle innenfor et godkjent nivå gjennom arbeidsdagen for flygelederne.

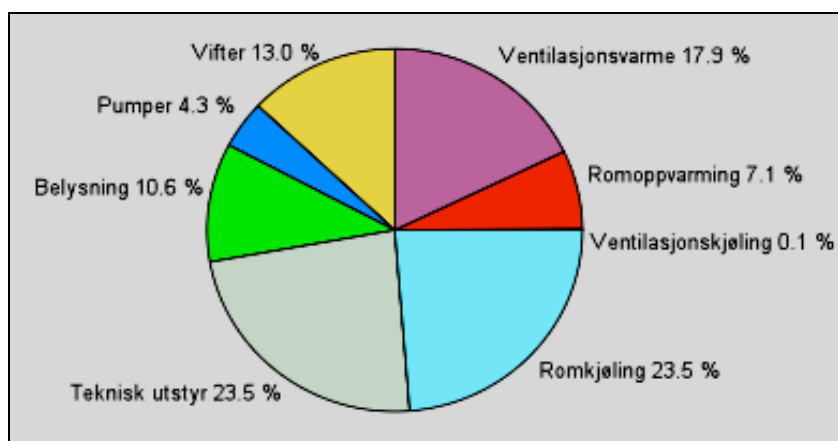
Resultatene for temperaturene i tårnkabinen viser at operativ temperatur, presentert som blå graf nr. 3 i figur 60, ligger mellom 22,0°C og 23,8°C for hele perioden flygelederne oppholder seg i tårnkabinen. Dette er godt innenfor optimale termiske forhold om sommeren. Personlig ventilasjon, vist som graf nr. 4, legger seg på 23°C jevnt, men kan for individuelle preferanser forandres til en annen ønsket temperatur. Kravet til at operativ temperatur ikke skal øke mer enn 2,2°C i løpet av en time er også innfridd for sommerforholdene.



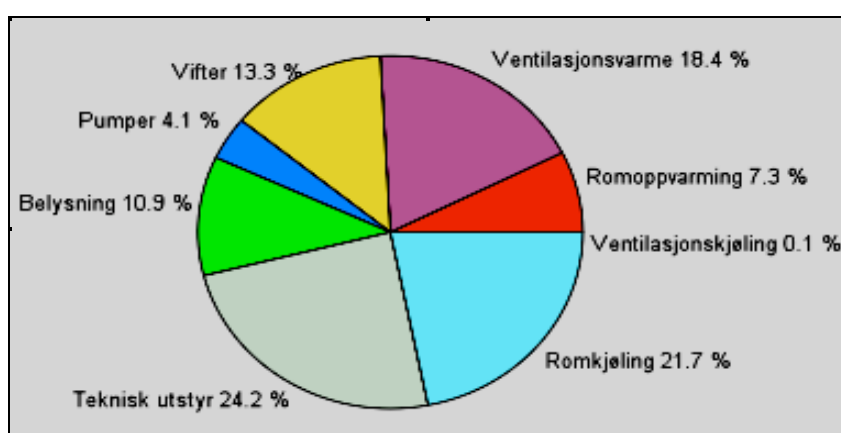
Figur 60: Temperaturforhold for tårnkabinen sommerstid

Antall misfornøyde med innnetemperaturen ligger fra 5 % og opp til 7 % på det meste. Dette er innenfor kravene som er satt til maksimalt 10 % PPD. CO-nivået ligger rett under 400 ppm, og er godt under kravet på 800 ppm for tårnkabinen. Dette er grunnet få personer som oppholder seg samtidig i tårnkabinen. Den relative fuktigheten på inneluften ligger jevnt på 48 %, som er godt under sommerens krav på maksimalt 60 %. Dermed er det heller ikke noe behov for avfukking av den tilførte ventilasjonsluften.

Solinnstråling for tårnkabinen i Honningsvåg er diskutert i avsnitt 10.5.3. Her ble det anbefalt en lavere solfaktor for vinduene, slik at varmetilskuddet fra solen blir mindre gjennom sommermånedene. Solen står på himmelen gjennom hele døgnet fra mai til juni, og varmetilskuddet er betydelig. Avinor bruker samme krav for vinduer for alle tårnkabinene i hele landet, selv med så store forskjeller i solinnstrålingsdata. Det ble i dette arbeidet gjort en sommer- og årssimulering i SIMIEN for å kunne se solfaktorens påvirkningen på det totale netto energibehovet. Det ble i første omgang valgt et referansescenario hvor solfaktoren var 35 %, som er ganske likt valgt til Multiconsult, mens for neste simulering ble solfaktoren satt til 30 %. Diagrammene for energipostene fra simuleringene med de forskjellige solfaktorene er vist i figur 61 og figur 62.



Figur 61: Energiposter for en solfaktor på 35 %



Figur 62: Energiposter for en solfaktor på 30 %

Resultatene viste en redusert maksimal solinnstråling for sommersimuleringen på hele 1000 W midt på dagen for lavere solfaktor. Det totale energibehovet sank med 2,7 % over året, hvor energiposten med størst nedgang var kjølebehovet i tårnkabinen med 1,8 %. Det totale oppvarmingsbehovet til tårnkabinen økte i forhold bare med 0,7 %, noe som bekrefter mistanken om lite varmetilskudd fra solen om vinteren. Altså bør det med god grunn velges vinduer med lav solfaktor, som dermed sørger for mindre varmelast om sommeren, samt en gevinst for det totale energibehovet. Eksempelvis vil et vindu med tre-lags glass gi en lavere U-verdi, som gir bedre isolasjon, og som samtidig øker refleksjonen av solstråling.

Dersom det er vanskelig å fjerne varmelast om sommeren, og det oppstår et sjikt av varmluft ved taket på grunn av for dårlig omrøring av luften, må det vurderes å plassere et avtrekk fra takhøyde. Den løsningen som er lettest å integrere i den totale klimatiseringsløsningen, er avtrekket ned et rør av glass eller plexiglass, vist i figur 55. Den opptar minimalt med plass i tårnkabinen, og gir ikke noe problem med gjennomsyn. Alternativet med glassinnheining rundt trappeoppgangen er mulig å sette til verks etter at flytårnet er bygget, og klimatiseringsløsning allerede er installert. Denne løsningen gir heller ikke dårlig sikt, da trappeoppgangen er på sørvendt side av tårnkabinen. Løsningen med avtrekk ved taket er normalt for klimatiseringsløsninger med fortrenningsventilasjon, men dersom

omrøringsventilasjonen ikke gir fullgod omrøring, vil det ofte dannes en sjiktning med varmluft nær taket som strekker seg ned i oppholdssonen.

Som tidligere foreslått, bør det plasseres en svingdør ved trappeoppgangen, slik at kald luft ikke synker ned til underetasjen. Dette er vist i figur 54. Det bør også plasseres en langsgående kant på kanten av øverste nivå, for å hindre kaldluften fra kjølebafler og ventilasjon å synke ned. Denne kaldluften bør samles her for bruk til avkjøling av varmekilder og personer. Dersom kaldluften i disse to tilfellene får synke, vil det totale energibehovet til kjøling av tårnkabinen øke.

Resultatene fra simuleringene i SIMIEN tilsier at det generelt skal være et godt nok termisk og atmosfærisk inn klima for flygelederne. Allikevel er det kjent fra befarings ved tårnkabinen ved Værnes flyplass og erfaringer fra andre tårnkabiner at dette ikke alltid er tilfellet i virkeligheten. Det mest tydelige tegnet på dette er at kjølebehovet om sommeren og varmebehovet om vinteren for flygelederne er større enn hva som er beregnet. En flytårnkabin er av en sjelden geometrisk struktur, og det er ingen tvil om at SIMIEN som simuleringsprogram kommer til kort for denne type spesialbygning.

Det er også andre forhold som er med på å prege inn klimaet, og som må optimaliseres for å gi et godt arbeidsmiljø i tårnkabinen.

Det er vanskelig å kunne si noe spesielt om de akustiske forholdene som oppstår i tårnkabinen. I SIMIEN er det ikke noe som omhandler dette området, som blant annet støy fra ventilasjonsanlegget. Det burde vært mulig å få noen indisier i SIMIEN på hvordan størrelsen på anlegget eller vifter, hastigheter og mengder på tilluft, eller utenforliggende støykilder, ville påvirke akustisk inn klima for tårnkabinen. Med Avinors krav for bygningskonstruksjoners lydreduksjon av støy utenfra, vil ikke flytrafikken skape nevneverdige problemer. Ventilasjonsanlegget bør derimot studeres for å finne ut om det oppstår ubehags- eller lavfrekvent støy. Dersom de akustiske forholdene ikke blir funnet gode nok, bør eventuelt en aktiv lydfelle installert, og andre tiltak igangsettes. For enhetene som tilfører tilluften for personlig ventilasjon er det gjort studier som viser at det ikke skjer noen overskridelse av lydkrav. Lydnivået vil ikke forstyrre vanlig tale mellom flygelederne i tårnkabinen.

Behovsstyring for tårnkabinen vil være med på å legge forholdene til rette for et enda bedre inn klima. Det er planlagt å installere en sensor som måler lufttemperatur og CO₂-nivå for den originale løsningen. Ut fra resultatene gjort i SIMIEN viser det seg at det bør plasseres sensorer også for luftfuktighet, strålingstemperatur og samtidig en solavskjermingssensor. Den relative luftfuktigheten ligger langt under de minimale kravene om vinteren, og det bør derfor være en fuktsensor som gir beskjed om oppstart av befukteren når det er behov for det. Måling av strålingstemperaturen viser seg viktig med så store temperatrasymmetrier mot vinduene som simuleringsresultatene viser. Dette for at radiatorene skal sette opp temperaturen, slik at innsiden av vinduene varmes opp. I tillegg bør oppvarming med personlig ventilasjon tas i bruk dersom for høy temperatrasymmetri oppstår, noe som vil minske varmebehovet til kroppen.

Plassering av sensorer bør være som beskrevet i avsnitt 8.4. Sensoren bør plasseres mellom arbeidsbordene, i en høyde som ikke gir avskjerming fra verken skjermer eller personer til vinduer, samt at den ikke må plasseres for nærme varmekilder. Det kan installeres én felles sensor for å måle alle parametrene som er nødvendig. Det er det lokale klimaet til flygelederne som skal optimaliseres for best mulig komfort, så det er naturlig med en plassering i kort avstand fra arbeidsbordene. Da kan luftkvalitet, luft- og strålingstemperatur samt fuktigheten måles i oppholdssonen.

Det bør utvilsomt installeres et kullfilter for å forhindre eventuelle forurensinger i gassform å trenge inn med ventilasjonsluften. Usikkerheten rundt forurensing fra flytrafikk og lagring av diverse kjemikalier på flyplassens område krever at det tas forhåndsregler. Inntaket for friskluft til ventilasjonsanlegget bør i tillegg vende bort fra potensielle kilder til forurensinger på flyplassen. En plassering mot sør anbefales for å vende lengst bort fra området med flytrafikk, så lenge det er forhold som legger til rette for dette i forhold til plantevekst etc.

Rengjøring er en faktor som ofte er undervurdert når det kommer til å oppnå et godt inneklime. En ting er at støv, partikler og mikrobielt liv får forurense fritt dersom det ikke rengjøres godt nok, men det skjer også en reduksjon i effektiviteten til ventilasjonsanlegg, befuktere og varmegjenvinnere. Tilsmussing av sjakter, kanaler, vifter, varmebatteri og gjenvinningsaggregat øker energibehovet, og øker samtidig faren for at forurensing blandes inn i tilluft.

Personlig ventilasjon gjør på en måte den store forskjellen i dette arbeidet for oppfattet termisk komfort og luftkvalitet for flygelederne, i forhold til Multiconsults tenkte løsning. Grepet med å ta i bruk personlig ventilasjon ved arbeidsbordene til flygelederne, reduserer problemene som ligger i usikkerheten rundt den originale klimatiseringsløsningens egenskaper med å fjerne varmelast, og å forsyne god nok luftkvalitet i pustesonen. Personlig ventilasjon gir muligheten for hver enkelt flygeleder til å styre sitt lokale klima etter sine egne preferanser. Også luftkvaliteten maksimeres ettersom det blir tilført friskluft uten noen form for forurensinger til pustesonen. Den enheten som har kommet best ut i studier, og som bør velges, er vertical desk grill (VDG), som er vist i figur 63. Denne tilfører friskluft ved magehøyde for maksimal termisk komfort og luftkvalitet.



Figur 63: Personlig ventilasjon, type "vertical desk grill"[64]

Med de resultatene som er utredet i tidligere studier (se avsnitt om PV, avsnitt 6.3) om personlig ventilasjon, er det ingen tvil om at den vil være fordelsmessig å ha med i klimatiseringsløsningen. Individuell kontroll av eget lokalt klima viser seg å være meget positivt for følelsen av termisk komfort. Dersom det gis et justeringsspenn på 6°C vil hele 99 % av brukerne oppnå termisk komfort. Dette er tall som taler for seg selv, og dette er et resultat som i utgangspunktet er delvis uavhengig av det omgivende klimaet. Personlig ventilasjon vil sørge for termisk komfort og god kvalitet på inhalert luft både for sommer- og vinterforhold.

Med bakgrunn i at den valgte alternative klimatiseringsløsningen er basert på den først tenkte løsningen, blir det mindre komplisert å integrere løsningene for personlig ventilasjon i ferdigstilte og bestemte plantegninger. Det er ikke kompliserte inngrep som skal til for å legge inn relativt små rør til tilluften. Ventilasjonssjaktene kommer opp i midten av flytårnkabinen, og det er kort vei bort til arbeidsbordet. Personlig ventilasjon kan også ganske enkelt installeres i ettertid i allerede funksjonelle tårnkabiner, og gjør dermed løsningen meget funksjonell.

Arbeidseffektivitetens påvirkning av den nyvalgte klimatiseringsløsningen er med positivt fortegn. Økt mental ytelse og prestasjon for flygelederne er særlig avhengig av operativ temperatur. Den operative temperaturen er viktig for prestasjon for oppgaver som krever konsentrasjon. Sommerstid ligger den operative temperaturen på et godkjent nivå for den nye, foreslåtte løsningen, men for vinterforhold er flygelederne mer utsatt for termisk diskomfort på grunn av temperatrasymmetri, kaldras og stor vertikal temperaturredifferanse. Det er derfor oftere at operativ temperatur er utenfor optimalt område.

Wyon-diagrammet (figur 22) viser at mental ytelse reduseres med 4 % for hver grad over operativ temperatur [39]. En annen studie viser at arbeid gjort rett under svettegrensen reduserte konsentrasjonen med 30-50 % [41]. En tredje studie viste at prestasjonsevnen igjen sank med opplevd luftkvalitet, som sank med stigende operativ temperatur [43]. For å løse problemet med periodene av dagen med for høy operativ temperatur tas personlig ventilasjon i bruk som ekstra kjøling direkte til kroppen. Dermed holdes temperaturen innenfor optimalt temperaturmessig område for flygelederne, og de kan oppnå høyest mulig arbeidseffektivitet.

I følge det tredje studiet skal heller ikke den optimale temperaturen øke for raskt. Det gir hodepine, tretthet, og konsentrasjonsproblemer oppstår. Den operative temperaturen skal ikke øke mer enn 2,2°C på en time, og skjer heller ikke for tilfellet med den nye klimatiseringsløsningen. Det er også da viktig å tenke på at personlig ventilasjon ikke skal tilføres med for lav eller for høy temperatur i forhold til hva kroppen er vant med, i forhold til den operative temperaturen. Det er da disse problemene oppstår, og en økning i den operative temperaturen bør gjøres gradvis.

Det er ingen høy konsentrasjon av karbondioksid i tårnkabinen gjennom året i følge SIMIEN. Grensen for en forventet andel misfornøyde på 15 % ligger på 350 ppm, og resultatene viser at konsentrasjonen i tårnkabinen ligger på omtrent 390, altså ikke langt over. Det vil altså ikke være noen problemer med hodepine eller søvnighet som kan føre til lavere prestasjon for flygelederne. Det vites ikke noe om annen

forurensing i tårnkabinen, men det bør gjøres en undersøkelse vedrørende dette etter at flytårnet er ferdigbygget.

Det samme gjelder som tidligere nevnt for akustiske forhold, da særlig lavfrekvent støy fra ventilasjonsanlegget kan føre til tretthet, hodepine og stressrelaterte utfall med en negativ innvirkning på arbeidseffektiviteten.

For en videreføring av klimatiseringsløsningen kunne det gått an å se for seg en enda mer teknisk løsning med både personlig ventilasjon og varmelister.

Sammen med personlig ventilasjon ville en individuelt styrt varmekilde med høy strålingsintensitet gitt gode utslag og vil gi bedre kvalitet på oppvarmingen direkte til kroppen om vinteren. Dette vil også hindre ubehag ved en eventuell vertikal temperaturdifferanse forårsaket av kaldras fra vinduet på nivået til flygeleiderne.

Grunnen til at ikke varmelister er valgt med i den nye foreslåtte klimatiseringsløsningen er at det vil kunne være noe overflødig med fire forskjellige former for oppvarming i tårnkabinen på samme tid. Det kan få flygeleiderne til å velge oppvarming bare fra de lokale varmekildene, da dette er hva de føler raskest og best på kroppen ved varmeregulering. Det er viktig at sentral oppvarming og radiatorer er dimensjonert til å styre det termiske og atmosfæriske inneklimaet mot optimalitet, og at en liten regulering skal kunne gjøres med en lokal varmeavgiver. Dersom radiatorene ikke står på riktig temperaturnivå, vil kaldras og temperaturasymmetri fra vinduene bli større. Også ventilasjonen må være dimensjonert riktig for å gi best mulig luftkvalitet og termiske forhold dersom personlig ventilasjon ikke tas i bruk.

Det er gjort en simulering hvor varmelister er lagt til som ekstra effekt i tillegg til radiatorene, men det ga ikke utslag på noen av resultatene, dette på grunn av lite energibehov for varmelistene. Det er derfor litt vanskelig å si noe om dens innvirkning på inneklima og energibehov for flytårnet. Allikevel er det et spennende alternativ dersom reguleringen av alle varmeavgivere optimaliseres.

Det er mange svakheter med SIMIEN som simuleringsprogram som gjør at simuleringsresultatene ikke helt kan sammenlignes med forholdene i den virkelige verden.

Det er ikke mulig å gi noen spesifikke, geometriske opplysninger om hvordan rommet er konstruert. For tårnkabinen som er konstruert som er et rom med to nivåer vil dette ha mye å si for simuleringsresultatene.

Programmet tar bare hensyn til internlaster, som belysning, teknisk utstyr og antall personer tilstede. SIMIEN gir ingen mulighet til å regulere verken bekleddning eller aktivitet for personene. Det er beregnet en bekleddning 1 clo gjennom hele året, noe som er en enorm forenkling. Normalt vil bekleddningen ligge på 0,3 clo om sommeren, og opp mot 1,3 clo om vinteren. Dette vil gi store utslag på forskjellige

termiske parametre i simuleringene. Aktivitetsnivået er satt konstant til å være 1 met, men dette fraviker ikke så mye fra aktiviteten til en flygeleder.

Det er heller ikke mulig å velge forskjellige varmegjennvinnere, noe som normalt vil gi utslag for inneklimaet gjennom vinteren. Det eneste som kan bestemmes er gjenvinningsgraden, som da gir en viss følelse av å kunne velge mellom forskjellige varmegjennvinnere.

For tårnkabinene som har såpass mye kaldras fra de store vindusarealene gir dette en veldig høy PPD-indeks, en verdi som vil være mye lavere i virkeligheten. På bakgrunn av at kaldraset raser ned i teknisk mellomgulv, og ikke rett på nivået hvor flygeleiderne sitter, vil lavere misnøye måles i virkeligheten enn hva som er gitt i simuleringsresultatene.

For omrøringsventilasjonen er det ikke mulig å velge tilluftsretning, -hastighet eller -turbulensgrad. Dette gir svakheter i forhold til om det faktisk oppstår full omrøring i rommet.

14. Konklusjon

I dette arbeidet har fokuset ligget på å forbedre klimatiseringsløsningen for en flytårnkabin med tanke på energiforbruk og inneklima. Klimatiseringsløsningen som er tiltenkt tårnkabinen består av omrøringsventilasjon, kjølebafler og radiatorer. En vurdering skulle gjøres av systemløsningen, for så å fremlegge forbedrede alternativer til denne.

Den nye, foreslåtte klimatiseringsløsningen som dette arbeidet har ført frem til består av:

- Omrøringsventilasjon
- Personlig ventilasjon
- Radiatorer
- Kjølebafler

Den nye komponenten i klimatiseringsløsningen, personlig ventilasjon, vil gi flygelederne individuell kontroll av deres egne, lokale klima. Personlig ventilasjon vil sørge for termisk komfort og frisk luft til pustesonen. Dette vil bidra til høyere mental ytelse og arbeidseffektivitet for flygelederne.

Dette tiltaket for bedre inneklima gir en økning i totalt netto energibehov med 3,2 %, til 58.143 kWh for kontrolltårnkabinen.

Andre tiltak anbefales samtidig for en mer energieffektiv drift for kontrolltårnkabinen, samt en bedring av arbeidsmiljøet for flygelederne:

Installering av en fuktsensor og en befukter i ventilasjonsanlegget vil hindre den relative luftfuktigheten i å synke til det uakseptabelt lave nivået simuleringene viste. I vinterperiodene lå relativ luftfuktighet ned mot 5 %, mot et krav om høyere enn 20 %. I tillegg til overvåking av luftfuktighet, lufttemperatur og CO₂-nivå vil det sett med inneklimatekniske øyne være en fordel å installere en sensor for strålingstemperaturen. Denne parameteren er sterkt delaktig for opplevelsen av et godt inneklima.

Det bør installeres radiatorer med lavere konveksjonsgrad, da dette vil føre til en mer behagelig oppvarming, samt bidra til å begrense kaldras fra vinduer. Ved å plassere en radiator under vinduet ved øverste nivå vil det stoppe kaldraset her og hindre høy vertikal temperatur for flygelederne, som igjen fører til et høyere energibehov på grunn av ønske om høyere romtemperatur.

En lavere solfaktor for vinduene vil føre til et mindre kjølebehov på grunn av stor solinnstråling gjennom sommerperioden. En reduksjon i solfaktoren på 5 % ga en reduksjon i totalt netto energibehov med 2,7 %. Dette vil kunne være med å dekke deler av det høyere energibehovet for den nye klimatiseringsløsningen. Tiltaket med lavere solfaktor vil samtidig hindre varmluft i å skape for høy vertikal temperaturdifferanse. Det bør plasseres et avtrekk fra takhøyde dersom det allikevel oppstår en stor varmelast om sommeren. Dette kan enten være i form av et

mekanisk avtrekk gjennom et rør av glass eller plexiglass, eller en glassinnheining av trappeoppgangen.

Det bør plasseres en svingdør eller en barrikade ved toppen av trappeoppgangen for å hindre kaldluft å synke ned til underetasjen om sommeren. Av samme grunn bør det også plasseres en langsgående kant langs kanten av øverste nivå i tårnkabinen. Dette vil føre til et redusert energibehov om sommeren, da kaldluften heller blir brukt til kjøling i tårnkabinen.

Et kullfilter vil øke sikkerheten vedrørende forurensinger som kan oppstå på flyplassen og trenge inn i tårnkabinen med ventilasjonsluften. Luftinntaket bør plasseres på den sørvendte veggen for å vende bort fra de største kildene til forurensing fra flytrafikken.

Det vil føre til en inneklimatisk gevinst ved å installere en rekuperativ i stedet for en regenerativ varmegjenvinner, da overføring av avkastluft til tilluften ikke oppstår. Her oppstår imidlertid en redusert varmegjenvinningsgrad som bidrar til et høyere energibehov.

Vurderingene er gjort på bakgrunn av simuleringsresultater i SIMIEN og en sammenligning med andre erfaringer.

15. Videre arbeid

Det anbefales å utføre simuleringer i et CFD-program på grunn av begrensninger i simuleringsverktøyet som ble tatt i bruk i dette arbeidet. Fluidsimuleringer vil kunne kartlegge luftstrømninger og inneklimateiske parametre på en bedre måte.

Det anbefales også å gjøre forsøk med tracer-gass for ventilasjonsluften etter at kontrolltårnet er ferdigbygd og ferdigstilt. Da vil man mer nøye kunne undersøke effekten ved å tilføre omrøringsventilasjon lavt nede ved teknisk mellomgulv.

Det bør også utføres prøver på akustiske forhold for å se om ventilasjonsanlegget fører til ubehagsstøy.

Subjektive reaksjoner fra okkupantene bør brukes til en samlet vurdering av inneklimateet i tårnkabinen. For å få en bedre oversikt over inneklimate, termisk komfort og oppfattet luftkvalitet bør jevnlig spørreundersøkelser gjennomføres blant flygeledeerne.

16. Referanser

1. Zeier, H., *Workload and psychophysiological stress reactions in air traffic controllers*. Ergonomics, 1994. **37**(3): p. 525-539.
2. Hopkin, V.D., *Human factors in air traffic control*. 1995, London: Taylor & Francis. XVIII, 479 s.
3. Avinor. *Trafikkstatistikk*. 2010 [cited 2010 28.05]; Available from: http://www.avinor.no/avinor/trafikk/10_Trafikkstatistikk.
4. Sperandio, J.-C., *The Regulation of Working Methods as a Function of Workload among Air Traffic Controllers*. Ergonomics, 1978. **21**(3): p. 195 - 202.
5. Sarason, I.G. and C.D. Spielberger, *Stress and anxiety*. Vol. 9. 1991, Washington, D.C.: Hemisphere Publ. Corp.
6. Kvetangen, K., *Forventningers betydning i forhold til opplevelsen av smerter*. 2009.
7. Costa, G., *Occupational stress and stress prevention in air traffic control*. CONDITIONS OF WORK AND WELFARE FACILITIES BRANCH, 1995. **6**.
8. Melsom, K., *Miljø og helse: en forskningsbasert kunnskapsbase*. Rapport. 2009, Oslo: Nasjonalt folkehelseinstitutt. 372 s.
9. M.C. Branch, e.a., *Federal Agency Review of Selected Airport Noise Analysis Issues*, F.I.C.o. Noise, Editor. 1992.
10. Ekberg, L.E., *Air*. 2008, Kvänum: Swegon Air Academy. 622 s.
11. Hanssen, T., Skarstein, Gjerstad, Novakovic, *ENØK i bygninger: effektiv energibruk*. 2007, Oslo: Gyldendal undervisning. 476 s.
12. *Noise Control*. 2010 [cited 2010 10.04]; Available from: http://www.safeworkaustralia.gov.au/swa/HealthSafety/HazardsSafetyIssues/NoiseHearing/NoiseControl.htm?wbc_purpose=Basic&WBCMODE=PresentationUnpublished.
13. Kakuichi Shiomi, S.H., *Fatigue and Drowsiness Predictor for Pilots and Air Traffic Controllers*, in *45th Annual ATCA Conference*. 2000: Taj Mahal Casino Resort Hotel, Atlantic City, New Jersey, U.S.A.
14. Klima&forurensningsdirektoratet. *Veiefilter: dBA og dBC*. Miljø i Norge 2009 [cited 08.05.2010]; Available from: <http://www.miljostatus.no/Tema/Stoy/Lyd-og-stoy/VeiefilterdBA-og-dBC/>.
15. *NS-EN 15251:2007 Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*. 2007, Oslo: Norges standardiseringsforbund. 44 s.
16. Sintef, *Støy i rom fra ventilasjonsanlegg*. Byggforskserien A552.306 Del 1, 1988.
17. Avinor, *Tårnnorm AFIS*, Avinor: Materiale mottatt av Multiconsult AS.
18. H.E.Hansen, P.K.-J., Ole B.Stampe, *Varme- og klimateknikk grundbog*. 1992. **1**: p. 17-44.
19. Spengler, J.D., J.F. McCarthy, and J.M. Samet, *Indoor air quality handbook*. 2001, New York: McGraw-Hill. Kap. 19.
20. Products, A. *Active Noise Control 'Anti-Noise' in Silencing Hardware* 2006 [cited 2010 29.05]; Available from: <http://www.acoustiproducts.com/en/cebit2006.asp>.
21. Pope III, C.A., et al., *Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution*. JAMA, 2002. **287**(9): p. 1132-1141.
22. Sintef, *Filtrering av luft i ventilasjonsanlegg*. Byggforskserien 552.331, 2005.

23. Helmis CG, A.V., Flocas HA, Stathopoulou OI, Sgouros G, Hatzaki M., *Indoor air quality assessment in the air traffic control tower of the Athens Airport, Greece*. Environ Monit Assess., 2009: p. 47-60.
24. Assimakopoulos, V.D. and C.G. Helmis, *On the study of a sick building: the case of Athens Air Traffic Control Tower*. Energy and Buildings, 2004. **36**(1): p. 15-22.
25. Sintef, *Krav til luftkvalitet*. Byggeforskserien 421.502, 1999.
26. *Statens institutt for folkehelse. Anbefalte faglige normer for inneklima*. 2004 [cited 04.05.2010; Available from: http://www.fhi.no/eway/default.aspx?pid=233&trg=MainLeft_5670&MainArea_5661=5670:0:15,2602:1:0:0:::0:0&MainLeft_5670=5544:44725::1:5675:1:::0:0.
27. allergiforbundet, A.-o. *Normer, retningslinjer og grenseverdier for inneklima*. 2003 [cited 10.05.2010; Available from: <http://www.allergiviten.no/index.asp?G=1993&ID=3908>.
28. *Norges Astma- og Allergiforbund*. 2010 [cited 2010 18.03]; Available from: <http://www.naaf.no/en/>.
29. *Samtaler med flygeledere på besøk i kontrolltårn ved Værnes flyplass*. 2010: Trondheim.
30. Sintef, *Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort*. Byggeforskserien 421.501, 1999.
31. Burroughs, H.E. and S.J. Hansen, *Managing indoor air quality*. 2004, Lilburn, Ga.: Fairmont Press. XII, 361 s.
32. Maroni, M., B. Seifert, and T. Lindvall, *Indoor air quality: a comprehensive reference book*. 1995, Amsterdam: Elsevier. IL, 1049 s.
33. *NS-EN ISO 7730 Termiske miljø - Moderate omgivelser - Bestemmelse av PMV- og PPD-indeks og betingelser for termisk komfort*.
34. ASHRAE, *Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE standard 55, ed. ASHRAE. 2005.
35. Fanger, P.O., Melikov, A.K., Hanzawa, H., Ring, J., *Air Turbulence and sensation of draught*. Energy and Buildings, 1988. **Vol.12**: p. Part 1, pp.21-39.
36. Skåret, E., *Ventilasjonsteknisk håndbok*. Håndbok. 2000, Oslo: Instituttet. 219 s.
37. Sintef, *Solstrålingsdata for energi- og effektberegninger*. Byggeforskserien 472.411, 1991.
38. Sintef, *Vannbåret lavtemperatur golvvarmeanlegg med stor energifleksibilitet*. Byggeforskserien 552.122, 2000.
39. Wyon, D.P., *The effects of indoor air quality on performance and productivity*. Indoor Air, 2004. **14**(s7): p. 92-101.
40. Cena, K. and J.A. Clark, *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Amsterdam: Elsevier. 289 s.
41. Spengler, J.D., J.M. Samet, and J.F. McCarthy, *Indoor air quality handbook*. 2001, New York: McGraw-Hill. Kap 16.
42. Keuene, A., *Rotwein am Kaminfeuer*. Sanitär + Heizungstechnik, 2010(März).
43. Jørn Toftum, J.K., Bjarne Olesen, *Komfort, symptomer og præstasjon med varierende temperaturer*. HVAC, 2010(6).
44. Steene, J., *Oppvarmingssystemer for lavenergiboliger*. 2006, SINTEF Energiforskning AS.
45. Sintef, *Beregning av U-verdi etter NS-EN ISO 6946*. Byggeforskserien, 1998.

46. Stampe, O.B., *Varme- og klimateknik: ventilationsteknik*. 2000, [Lyngby]: Danvak. 369 s.
47. Steene, J., *Oppvarmingssystemer for boliger av lavenergi- og passivhusstandard*. 2008, SINTEF Energiforskning AS.
48. John Dieckmann, K.W.R., James Brodrick, *Radiant ceiling cooling*. Emerging technologies, permission from ASHRAE Journal., 2004.
49. Mumma, S.A., *Ceiling panel cooling systems*. ASHRAE Journal, 2001. **43**(11): p. 28.
50. Arsen Melikov, B.Y., Lyuben Bozhkov, Viktor Zboril, Risto Kosonen, *IMPACT OF THE AIRFLOW INTERACTION ON OCCUPANTS' THERMAL COMFORT IN ROOMS WITH ACTIVE CHILLED BEAMS*. 2007, International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark,.
51. Sørensen, B.R. *Ventilasjon og ventilasjonseffektivitet*. [cited 2010 23.03]; Available from: <http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/vvs/docs/effektivitet/effektivitet.html>.
52. Melikov, A.K., R. Cermak, and M. Majer, *Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices*. Energy and Buildings, 2002. **34**(8): p. 829-836.
53. Kaczmarczyk, J., A. Melikov, and P.O. Fanger, *Human response to personalized ventilation and mixing ventilation*. Indoor Air, 2004. **14**(s8): p. 17-29.
54. Schiavon, S. and A.K. Melikov, *Energy-saving strategies with personalized ventilation in cold climates*. Energy and Buildings, 2009. **41**(5): p. 543-550.
55. Sintef, *Prosjektering av energieffektive ventilasjonsanlegg*. Byggforskserien 552.335, 2000.
56. Melikov, A.K., *Impact of airflow interaction on inhaled air quality and transport of contaminants in rooms with personalized and total volume ventilation*. Proceedings of Healthy Buildings 2003: p. 592-597.
57. Naiping Gao, J.N., *MODELING THE PERFORMANCE OF PERSONALIZED VENTILATION UNDER DIFFERENT ROOM AIRFLOWS*, in *Ninth International IBPSA Conference*. 2005: Montréal, Canada.
58. Sintef, *Behovsstyrt ventilasjon*. 552.323 Byggforskserien, 2005.
59. Multiconsult, *Materiale utlevert av Multiconsult AS*. 2010.
60. *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK)*. 2007: Statens Bygningsteknisk Etat.
61. Pilkington. *Hjemmeside til Pilkington (vindusprodusent)*. [cited 2010 03.06]; Available from: www.pilkington.no.
62. *Beskrivelse av klimatiseringsløsning ved Trondheim Lufthavn Værnes.*, M.C. AS, Editor. 2002.
63. Sintef, *Valg av vinduer til boliger-Energibehov og inneklima*. Byggforskserien 472.421, 2000.
64. Melikov, A., *Additional information regarding personalized ventilation*, T.U.o. Denmark, Editor. 2009, DTU.

17. Vedlegg

A) Vedlegg for generell inndata fra simuleringene i SIMIEN

A.1 *Beregnet nødvendig luftmengde for ventilasjon*

Nødvendig luftmengde gitt av ventilasjonsanlegget er forskjellig for vinter og sommer. Om vinteren er det kravet til luftkvalitet som dimensjonerer luftmengden, om sommeren er det kjølebehovet.

Vinter:

Krav til luftmengde om vinteren finnes ved metode gitt i NS-EN 152521:2007[15], og tar hensyn til antall personer tilstede, samt bygningsmaterialer. Tabellen for forskjellige krav til luftmengde er gitt i avsnitt 2.2.3.

Med 2 personer som jobber samtidig i en lavt forurensende bygning, kategori 1, og et areal på 71,66 m² vil regnestykket for luftkravet se slik ut:

$$\text{Personbelastning: } 10 \frac{l}{s \cdot \text{person}} \cdot 2 \text{ person} = 20 \frac{l}{s}$$

$$\text{Bygningsutslipp: } 1 \frac{l}{sm^2} \cdot 71,66 m^2 = 71,66 \frac{l}{s}$$

$$\text{Totalt: } 91,66 \frac{l}{s} = 330 \frac{m^3}{h} = \boxed{4,6 \frac{m^3}{hm^2}}$$

Altså må ventilasjonen bistå med minst $4,6 \frac{m^3}{hm^2}$ i luftmengde for å tilfredsstill

kravene gitt i NS:EN 15251:2007. Dette er da minste nødvendige luftmengde krevd for et vinterscenario i tårnkabinen. Luftmengden som er beregnet vil gjelde for både omrøringsventilasjon og fortreningsventilasjon.

Sommer:

Beregningene for luftmengder sommerstid gjøres på bakgrunn av kjølebehovet til ventilasjonsluften. Beregningene gjort i forprosjektrapporten viser et kjølebehov på 5 kW for ventilasjonsluften.

For å finne nødvendig luftmengde brukes formelen;

$$P_v = \rho C_p q \Delta T ,$$

hvor P_v er kjølebehovet(W), ρ er tettheten til luft(kg/m³), C_p er spesifikk varmekapasitet for luften(1,005 kJ/kgK), q er luftmengde(m³/h) og ΔT er temperatur(K) gitt ved ($T_{ut} - T_{inn}$) for systemet. For sommerforhold er $\rho=1,2$ kg/m³ for havnivå.

Normalt vil temperaturdifferansen i tilfellene med fortreningsventilasjon være større enn for omrøringsventilasjon. Derfor er det gjort beregninger separat for luftmengder til de to totalvolum-ventilasjonssystemene.

Omrøringsventilasjon:

Temperaturforskjellen mellom tilluft og avtrekksluft er gitt til å være $\Delta T=5K$, slik det er prosjektert med i forprosjektsrapporten til Multiconsult.

$$q = \frac{P_v}{C_p \rho \Delta T} = \frac{5kW}{1,005 \frac{kJ}{kgK} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 8K} = 2985 \frac{m^3}{h} = \boxed{42 \frac{m^3}{hm^2}}$$

Som vi her kan se, ligger behovet for luftmengde omtrent 100% høyere sommerstid enn vinterstid for omrøringsventilasjon. Dette betyr at ventilasjonsanlegget må dimensjoneres ut fra sommerforholdene. Luftmengden blir dermed satt til å være $42 \frac{m^3}{hm^2}$ for simuleringer gjort med omrøringsventilasjon i SIMIEN.

Fortreningsventilasjon:

Her settes temperaturforskjellen til å være noe større, da innluften pleier å ha noe lavere temperatur på tilluften enn for omrøringsventilasjon. Temperaturforskjellen ΔT blir satt til å være 8K, altså 3K kaldere enn for omrøring. Egentlig kommer fortreningsventilasjonen til å omhandle bare øvre platå hvor flygeleddene sitter, slik at arealet blir en tanke mindre uten det tekniske mellomgulvet. Dette blir dessverre vanskelig å få med i beregningene i SIMIEN, så vi ser bort fra det i denne oppgaven.

$$q = \frac{P_v}{C_p \rho \Delta T} = \frac{5kW}{1,005 \frac{kJ}{kgK} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 8K} = 1865 \frac{m^3}{h} = \boxed{26 \frac{m^3}{hm^2}}$$

Dette er en reduksjon i nødvendig luftmengde på nesten 40 % i forhold til omrøring, noe som gir en stor nedgang i energibehovet. Også for fortreningsventilasjon blir kjølebehovet for sommeren verdien som det må dimensjoneres for.

Personlig ventilasjon:

Personlig ventilasjon vil gi muligheten til å styre luftmengden for det lokale klimaet, og vil da ut fra tidligere studier (se avsnitt om PV) ligge på mellom 0-25 l/s. For å regne ut maksimal luftmengden krevd til personlig ventilasjon med 25 l/s:

$$2 \text{ person} \cdot 25 \frac{l}{s \cdot \text{person}} = 50 \frac{l}{s} = 180 \frac{m^3}{h} = \boxed{2,51 \frac{m^3}{hm^2}}$$

Den lille luftmengden betyr at rommet må få tilført ekstra ventilasjon for å oppnå kravet om luftmengde for områdene utenfor pustesonen. Dette er også fordi PV ikke alltid vil være benyttet, og luftmengden i perioder vil være lav, ned mot 0 l/s.

A.2 Generell inndata for tårnkabinen i SIMIEN

A-tab 1: Inndata for klima i Honningsvåg:

Inndata klima	
Beskrivelse	Verdi
Klimasted	Hammerfest
Breddegrad	70° 24'
Lengdegrad	23° 22'
Tidssone	GMT + 1
Årsmiddeltemperatur	1.9 °C
Midlere solstråling horisontal flate	81 W/m ²
Midlere vindhastighet	4.3 m/s

A-tab 2: Inndata for energiforsyning til tårnkabinen:

Inndata energiforsyning	
Beskrivelse	Verdi
1 a Direkte elektrisitet	Systemvirkningsgrad: 0.88 Kjølefaktor: 2.50 Energipris: 0.80 kr/kWh CO2-utslipp: 355 g/kWh Andel romoppvarming: 50.0% Andel oppv. tappevann: 50.0% Andel varmebatteri: 50.0 % Andel kjølebatteri: 50.0 % Andel romkjøling: 100.0 % Andel el. spesifikt: 100.0 %
1 b El. til varmepumpesystemer	Systemvirkningsgrad: 3.00 Kjølefaktor: 2.50 Energipris: 0.80 kr/kWh CO2-utslipp: 355 g/kWh Andel romoppvarming: 50.0% Andel oppv. tappevann: 50.0% Andel varmebatteri: 50.0 % Andel kjølebatteri: 50.0 % Andel romkjøling: 0.0 % Andel el. spesifikt: 0.0 %

A-tab 3: Inndata for ekspertverdier for tårnkabinen:

Inndata ekspertverdier	
Beskrivelse	Verdi
Konvektiv andel varmetilskudd belysning	0.30
Konvektiv andel varmetilsk. teknisk utstyr	0.50
Konvektiv andel varmetilskudd personer	0.50
Konvektiv andel varmetilskudd sol	0.50
Konvektiv varmoverføringskoeff. vegger	2.50
Konvektiv varmoverføringskoeff. himling	2.00
Konvektiv varmoverføringskoeff. gulv	3.00
Bypassfaktor kjølebatteri	0.25
Innv. varmemotstand på vinduruter	0.13
Midlere lufthastighet romluft	0.15
Turbulensintensitet romluft	25.00
Avstand fra vindu	0.60
Termisk konduktivitet akk. sjikt [W/m ² K]:	20.00

Bygningsfasader:

A-tab 4: Inndata for yttertak i tårnkabinen:

Inndata yttertak	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Tak Tårnkabin (yttertak)
Totalt areal	78.5 m ²
Retning (0=Nord, 180=Sør)	180°
Takvinkel	36.0°
Innv. akkumulerende sjikt	Lett himling Varmekapasitet 3.0 Wh/m ² K
Konstruksjon	Kompakttak m. korrugert stålplate, 350 mm isolasjon Uverdi: 0.13 W/m ² K

A-tab 5: Inndata for fasade/yttervegg i tårnkabinen(identisk for alle yttervegger):

Inndata fasade/yttervegg	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Vegg 1 (fasade)
Totalt areal	10.1 m ²
Retning (0=Nord, 180=Sør)	350°
Innv. akkumulerende sjikt	Lett vegg Varmekapasitet 3.0 Wh/m ² K
Konstruksjon	36mm bindingsverk, 250mm isolasjon Uverdi: 0.17 W/m ² K

A-tab 6: Inndata for vinduselement i tårnkabinen(identisk for alle vinduene):

Inndata vinduselement	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Vindu 1 (Vindu(er) på Vegg 1)
Antall vinduer	1
Høyde vindu(er)	2.80 m
Bredde vindu(er)	3.51 m
Karm-/ramme faktor	0.10
Karm/rammekonstruksjon	U-verdi: 1.30 W/m ² K Kuldebroverdi: 0.08 W/mK
Vindustype	Egendefinert Uverdi: 1.00 W/m ² K
Konstant (fast) solskjerming	Tolags solreflekterende glass, (50 % lystransmisjon) Total solfaktor: 0.24

A-tab 7: Inndata for gulv i tårnkabinen:

Inndata skillekonstruksjon	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Gulv Tårnkabin Øverste Nivå (skillekonstruksjon)
Totalt areal	52.2 m ²
Konstruksjonstype	Gulv
Innv. akkumulerende sjikt	Tungt gulv Varmekapasitet 63.0 Wh/m ² K
Vendt mot annen sone	Sone med lik temperatur

Internlast:

A-tab 8: Inndata for belysning i tårnkabinen:

Inndata belysning	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Internlast (internlaster, belysning)
Effekt/Varmetilskudd belysning I driftstiden; Effekt: 15.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
Utenfor driftstiden; Effekt: 5.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
På helg/feriedager; Effekt: 5.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
Antall timer drift pr døgn: 13:00	

A-tab 9: Inndata for teknisk utstyr i tårnkabinen:

Inndata teknisk utstyr (internlast)	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Internlast (internlaster, teknisk utstyr)
Effekt/Varmetilskudd teknisk utstyr I driftstiden; Effekt: 30.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
Utenfor driftstiden; Effekt: 15.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
På helg/feriedager; Effekt: 15.0 W/m ² ; Varmetilskudd: 100 %	
Antall timer drift pr døgn: 13:00	

A-tab 10: Inndata for varmetilskudd fra personene i tårnkabinen:

Inndata varmetilskudd personer (internlast)	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Internlast (internlaster, varmetilskudd personer)
Varmetilskudd personer	I arbeidstiden: 2.0 W/m ² Utenfor arbeidstiden: 0.0 W/m ² Ferie/helgedager: 0.0 W/m ² Antall arbeidstimer: 11:00

Oppvarming og kjøling:

A-tab 11: Inndata for lokal kjøling i tårnkabinen:

Inndata lokal kjøling	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Kjølebafler (lokal kjøling)
Settpunkttemperatur	22.0 °C
Maks, kapasitet	4075 W/m ²
Konvektiv andel kjøling	0.50
Driftstid	13:00 timer drift pr døgn
Kjøling på helge/feriedager	Ja
Kjøling via vannbårent anlegg	Ja
Turtemperatur	14.0 °C
Returtemperatur	16.0 °C
Spesifikk pumpeeffekt	0.60 kW/(l/s)

A-tab 12: Inndata for ventilasjon i tårnkabinen:

Inndata CAV	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Omrøringsventilasjon (CAV ventilasjon)
Ventilasjonsstype	Balansert ventilasjon
Driftstid	13:00 timer drift pr døgn
Luftmengde	I driftstiden: tilluft = 42.0 m ³ /hm ² , avtrekk = 42.0 m ³ /hm ² Utenfor driftstiden: tilluft = 0.0 m ³ /hm ² , avtrekk = 0.0 m ³ /hm ² Helg/feridag: tilluft = 0.0 m ³ /hm ² , avtrekk = 0.0 m ³ /hm ²
Tilluftstemperatur	Min. tillufttemp: 16.0 °C Maks. tillufttemp: 30.0 °C Høy utetemp: 23.0 °C Lav utetemp: 21.0 °C
Varmebatteri	Ja Maks. kapasitet: 30 W/m ²
Vannbåren distribusjon til varmebatteri	Delta-T: 10.0 °C SPP: 0.5 kW/(l/s)
Kjølebatteri	Maks. kapasitet: 30 W/m ²
Vannbåren distribusjon til kjølebatteri	Delta-T: 5.0 °C SPP: 0.6 kW/(l/s)
Varmegjenvinner	Ja, temperaturvirkningsgrad: 0.80
Vifter	Plassering tilluftsvifte: Etter gjenvinner Plassering avtrekksvifte: Etter gjenvinner
SFP-faktor vifter	1.9 kW/m ³ /s

A-tab 13: Inndata for oppvarming i tårnkabinen:

Inndata oppvarming	
Beskrivelse	Verdi
Navn:	Radiator (oppvarming)
Settpunkttemperatur i driftstid	22.0 °C
Settpunkttemperatur utenfor driftstiden	19.0 °C
Maks. kapasitet	100 W/m ²
Konvektiv andel oppvarming	0.50
Driftstid	13:00 timer drift pr døgn
Vannbårent oppvarmingsanlegg	Ja
Turtemperatur	60.0 °C
Returtemperatur	50.0 °C
Spesifikk pumpeeffekt	0.50 kW/(l/s)

B) Resultater fra simuleringer i SIMIEN

B.1) Resultater for Multiconsults foreslåtte klimatiseringsløsning:

B.1.1) Resultater av årssimulering:

B-tab 1: Kostnad kjøpt energi

Kostnad kjøpt energi		
Energivare	Energikostnad	Spesifikk energikostnad
1a Direkte elektrisitet	34738 kr	484.8 kr/m ²
1b El. til varmepumpesystemer	1957 kr	27.3 kr/m ²
1c El. til solenergisystemer	0 kr	0.0 kr/m ²
2 Olje	0 kr	0.0 kr/m ²
3 Gass	0 kr	0.0 kr/m ²
4 Fjernvarme	0 kr	0.0 kr/m ²
5 Biobrensel	0 kr	0.0 kr/m ²
6 Annen energivare ()	0 kr	0.0 kr/m ²
Årlige energikostnader, sum 1-6	36695 kr	512.1 kr/m ²

B-tab 2: Levert energi

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte elektrisitet	43422 kWh	605.9 kWh/m ²
1b El. til varmepumpesystemer	2446 kWh	34.1 kWh/m ²
1c El. til solenergisystemer	0 kWh	0.0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0.0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	0 kWh	0.0 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0.0 kWh/m ²
6 Annen energivare ()	0 kWh	0.0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-6	45868 kWh	640.1 kWh/m ²

B.1.2) Resultater av evaluering:

B-tab 3: Energiltak (§8-21 a)

Energiltak (§8-21 a)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Samlet glass-, vindus og dørareal delt på bruksarealet [%]	96.0	20.0
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0.17	0.18
U-verdi tak [W/m ² K]	0.13	0.13
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	1.12	1.20
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0.03	0.06
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1.50	1.50
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	80	70
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1.90	2.00
Lokal kjøling er ikke tillatt i tiltaksmodellen	-	-

B-tab 4: Omfordeling energiltak (§8-21 a)

Omfordeling energiltak (§8-21 a, varmetapstall)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Varmetapstall yttervegger	0.01	0.14
Varmetapstall tak	0.14	0.14
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0.00	0.00
Varmetapstall glass/vinduer/dører	1.08	0.24
Varmetapstall kuldebroer	0.03	0.06
Varmetapstall infiltrasjon	0.10	0.10
Varmetapstall ventilasjon	0.74	1.12
Totalt varmetapstall	2.09	1.80
Lokal kjøling er ikke tillatt i tiltaksmodellen	-	-

B-tab 5: Energiramme (§8-21 b, samlet netto energibehov)

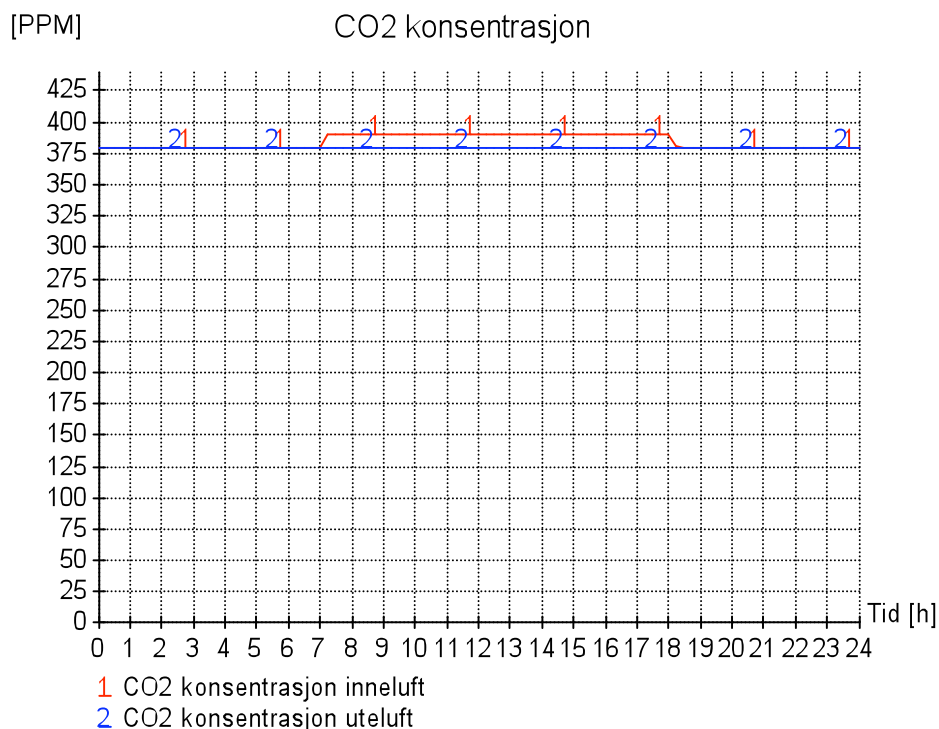
Energiramme (§8-21 b, samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	114.4 kWh/m ²
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	57.7 kWh/m ²
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	10.0 kWh/m ²
3a Beregnet energibehov vifter	52.1 kWh/m ²
3b Beregnet energibehov pumper	55.4 kWh/m ²
4 Beregnet energibehov belysning	18.8 kWh/m ²
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	23.5 kWh/m ²
6a Beregnet energibehov romkjøling	114.8 kWh/m ²
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	3.5 kWh/m ²
Totalt beregnet netto energibehov, sum 1-6	450.2 kWh/m ²
Forskriftskrav netto energibehov	185.0 kWh/m ²

B-tab 6: Minstekrav (§8-21 c)

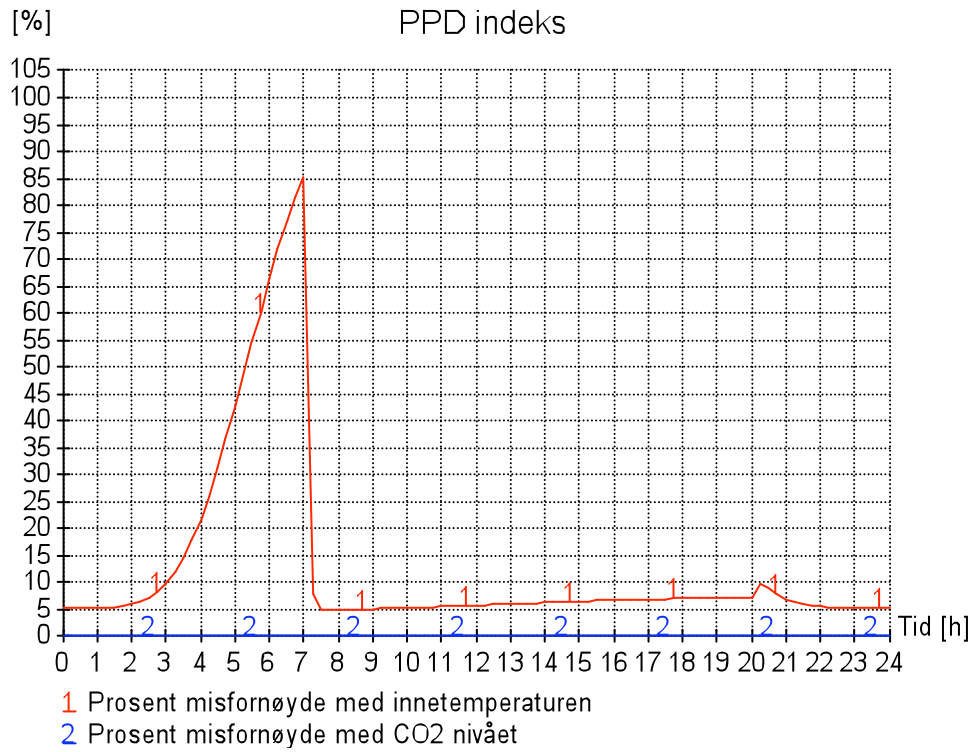
Minstekrav (§8-21 c)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0.17	0.22
U-verdi tak [W/m ² K]	0.13	0.18
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	1.12	1.60
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1.50	3.00

B.1.3) Resultater fra sommersimulering

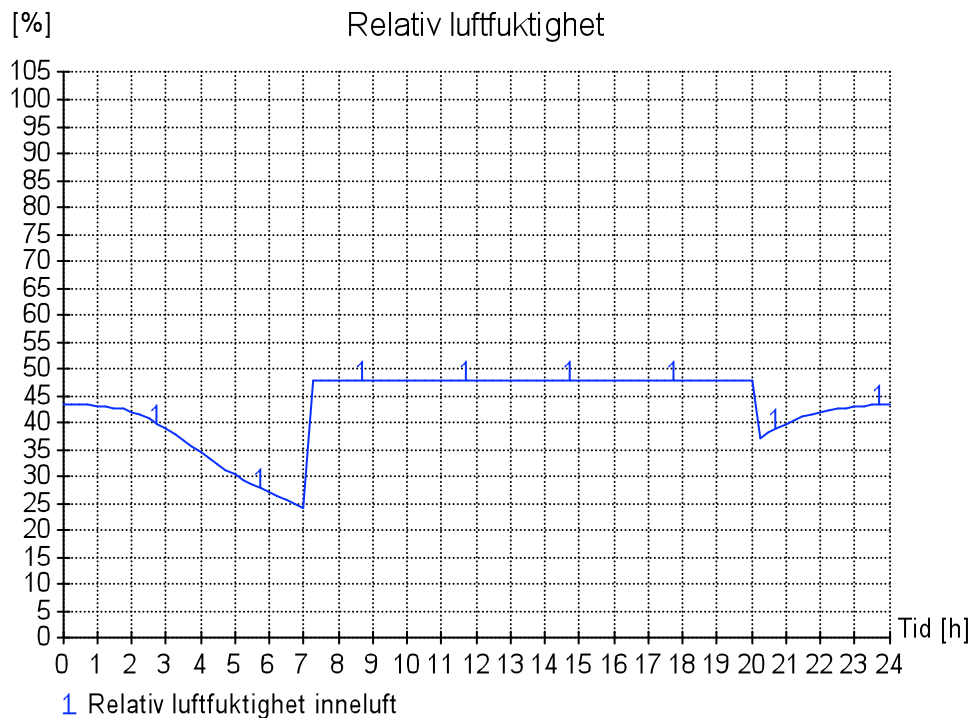
B-tab 7: CO₂-konsentrasjon i tårnkabinen



B-tab 8: Antall misfornøyde i tårnkabinen



B-tab 9: Relativ fuktighet i tårnkabinen

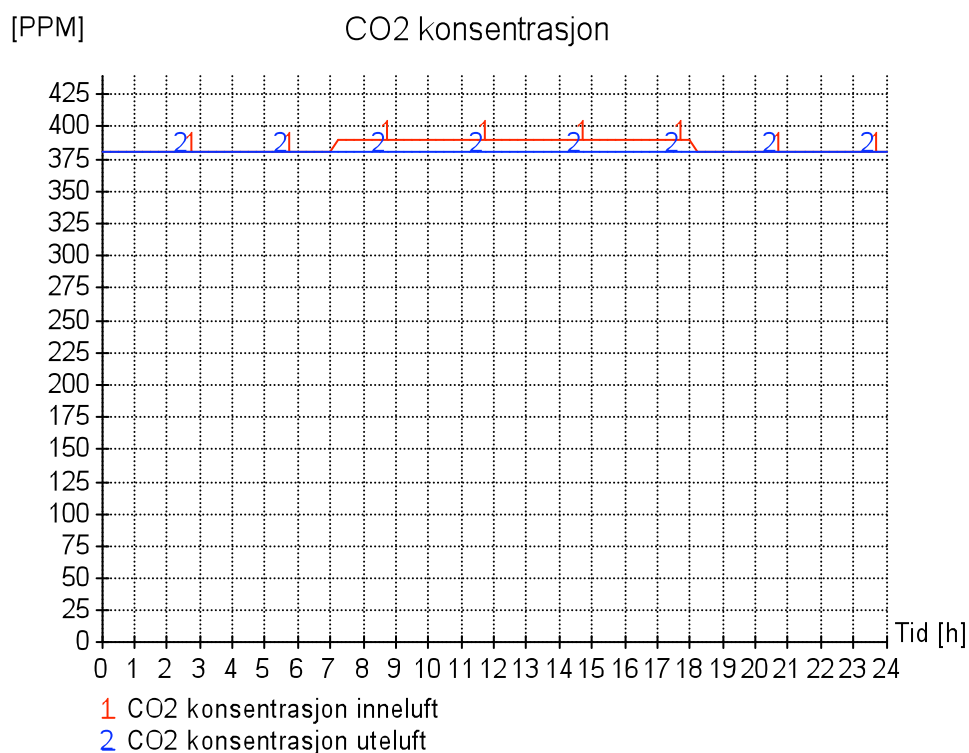


B.1.4) Resultater fra vintersimulering

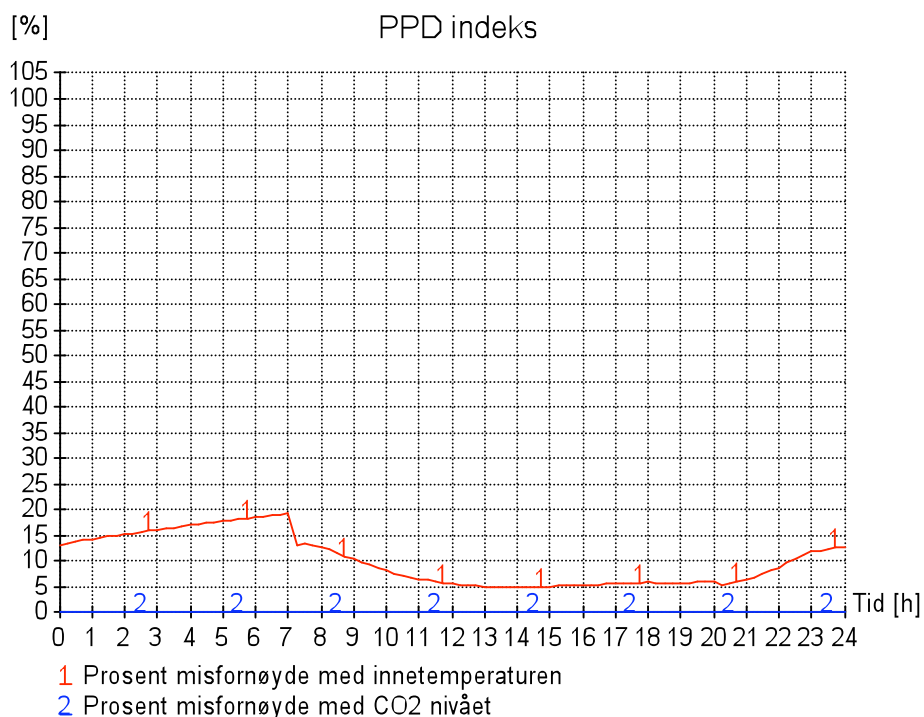
B-tab 10: Sammendrag av nøkkelverdier for vintersimulering

Sammendrag av nøkkelverdier for Tårnkabin		
Beskrivelse	Verdi	Tidspunkt
Min. innelufttemperatur	18.5 °C	07:45
Min. operativ temperatur	22.0 °C	07:00
Maks. CO2 konsentrasjon	390 PPM	18:00
Maksimal effekt varmebatterier:	2150 W / 30.0 W/m ²	07:15
Installert effekt varmebatterier	2150 W / 30.0 W/m ²	07:15
Maksimal effekt oppvarmingsanlegg:	7166 W / 100.0 W/m ²	07:00
Installert effekt romoppvarming	7166 W / 100.0 W/m ²	07:00

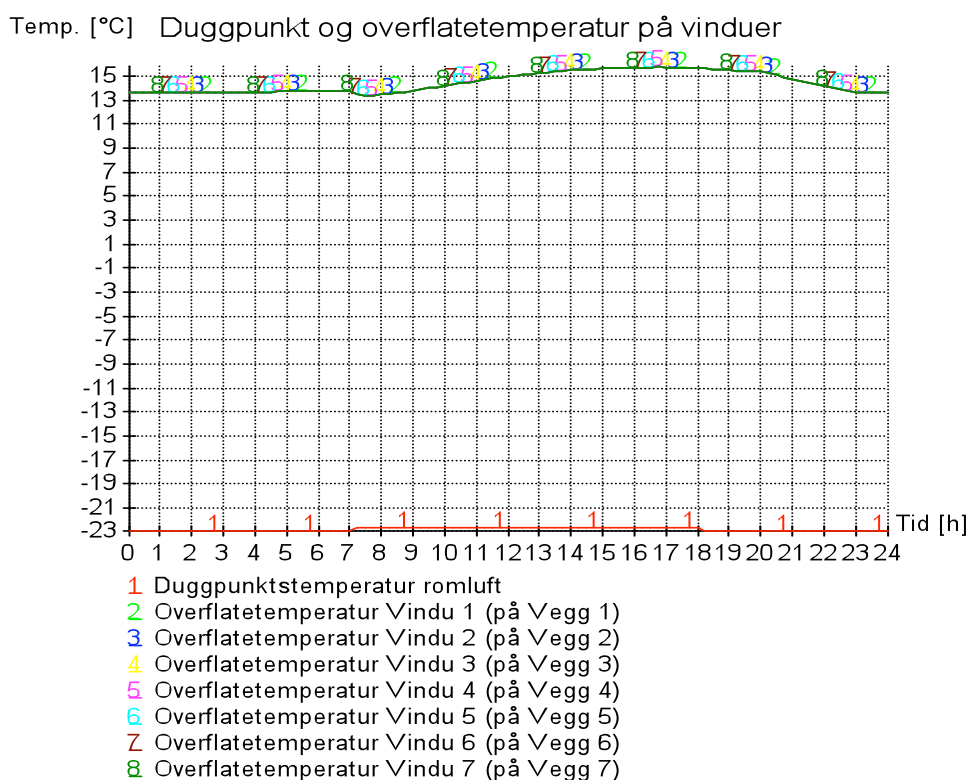
B-tab 11: CO₂-konsentrasjon i tårnkabinen



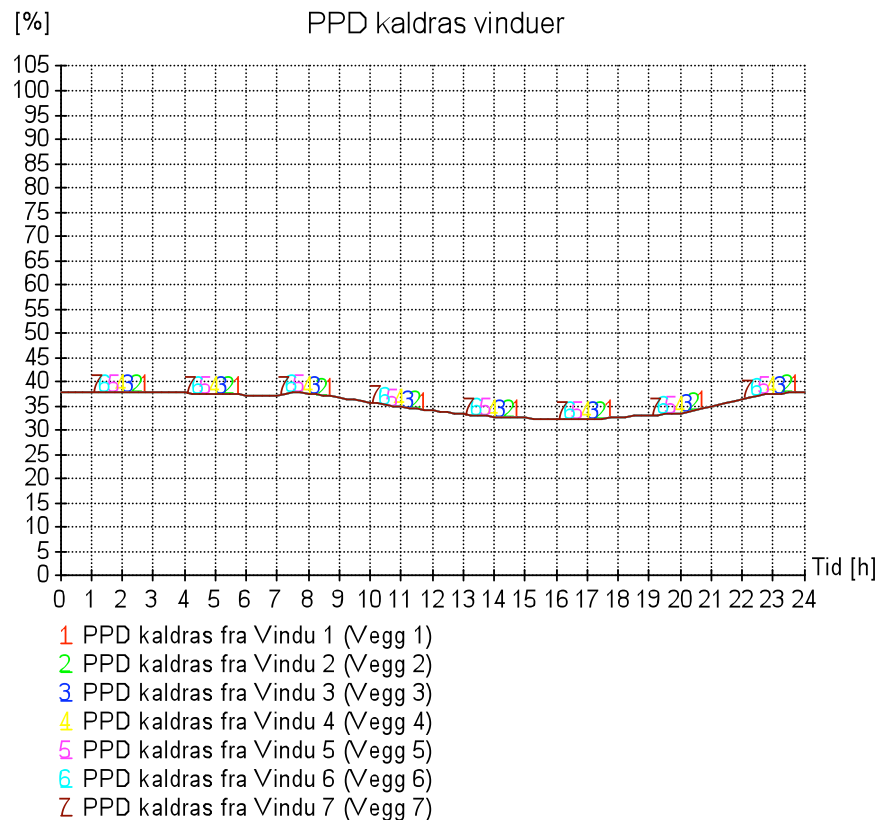
B-tab 12: PPD-indeks for innetemperatur og CO₂



B-tab 13: Duggpunkt og overflatetemperatur på vinduer



B-tab 14: PPD for kaldras fra vinduene



B.2) Resultater for ny foreslått klimatiseringsløsning:

B.2.1) Resultater fra årssimulering:

B-tab 15: Årlig energibudsjett

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	4500 kWh	62.8 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	11069 kWh	154.5 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3a Vifter	7989 kWh	111.5 kWh/m ²
3b Pumper	2187 kWh	30.5 kWh/m ²
4 Belysning	6537 kWh	91.2 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	14514 kWh	202.5 kWh/m ²
6a Romkjøling	11265 kWh	157.2 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	83 kWh	1.2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	58143 kWh	811.4 kWh/m ²

B-tab 16: Kostnad for kjøpt energi i året

Energivare	Kostnad kjøpt energi	
	Energikostnad	Spesifikk energikostnad
1a Direkte elektrisitet	35690 kr	498.0 kr/m ²
1b El. til varmepumpesystemer	2076 kr	29.0 kr/m ²
1c El. til solenergisystemer	0 kr	0.0 kr/m ²
2 Olje	0 kr	0.0 kr/m ²
3 Gass	0 kr	0.0 kr/m ²
4 Fjernvarme	0 kr	0.0 kr/m ²
5 Biobrensel	0 kr	0.0 kr/m ²
6 Annen energivare ()	0 kr	0.0 kr/m ²
Årlige energikostnader, sum 1-6	37765 kr	527.0 kr/m ²

B-tab 17: Levert energi til bygningen

Energivare	Levert energi til bygningen (beregnet)	
	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte elektrisitet	44612 kWh	622.5 kWh/m ²
1b El. til varmepumpesystemer	2595 kWh	36.2 kWh/m ²
1c El. til solenergisystemer	0 kWh	0.0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0.0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	0 kWh	0.0 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0.0 kWh/m ²
6 Annen energivare ()	0 kWh	0.0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-6	47207 kWh	658.8 kWh/m ²

B.2.2) Resultater fra evaluering

B-tab 18: Resultater av evaluering

Resultater av evalueringen	
Evaluering av	Beskrivelse
Energiltak	Bygningen tilfredsstillter ikke kravene til energiltak i paragraf §8-21 a
Varmetapsramme	Bygningen tilfredsstillter ikke omfordeling energiltak (varmetapstall) ihht. §8-21 a
Energiramme	Bygningen tilfredsstillter ikke energirammen ihht. §8-21 b
Minstekrav	Bygningen tilfredsstillter minstekravene i §8-21 c
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstillter ikke minstekrav gitt i NS3031:2007 (tabell A.6)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstillter ikke byggeforskriftenes energikrav

B-tab 19: Energiltak

Energiltak (§8-21 a)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Samlet glass-, vindus og dørareal delt på bruksarealet [%]	96.0	20.0
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0.17	0.18
U-verdi tak [W/m ² K]	0.13	0.13
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	1.12	1.20
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0.03	0.06
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1.50	1.50
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	80	70
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1.90	2.00
Lokal kjøling er ikke tillatt i tiltaksmodellen	-	-

B-tab 20: Omfordeling energiltak

Omfordeling energiltak (§8-21 a, varmetapstall)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Varmetapstall yttervegger	0.01	0.14
Varmetapstall tak	0.14	0.14
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0.00	0.00
Varmetapstall glass/vinduer/dører	1.08	0.24
Varmetapstall kuldebroer	0.03	0.06
Varmetapstall infiltrasjon	0.10	0.10
Varmetapstall ventilasjon	0.79	1.18
Totalt varmetapstall	2.14	1.86
Lokal kjøling er ikke tillatt i tiltaksmodellen	-	-

B-tab 21: Energiramme

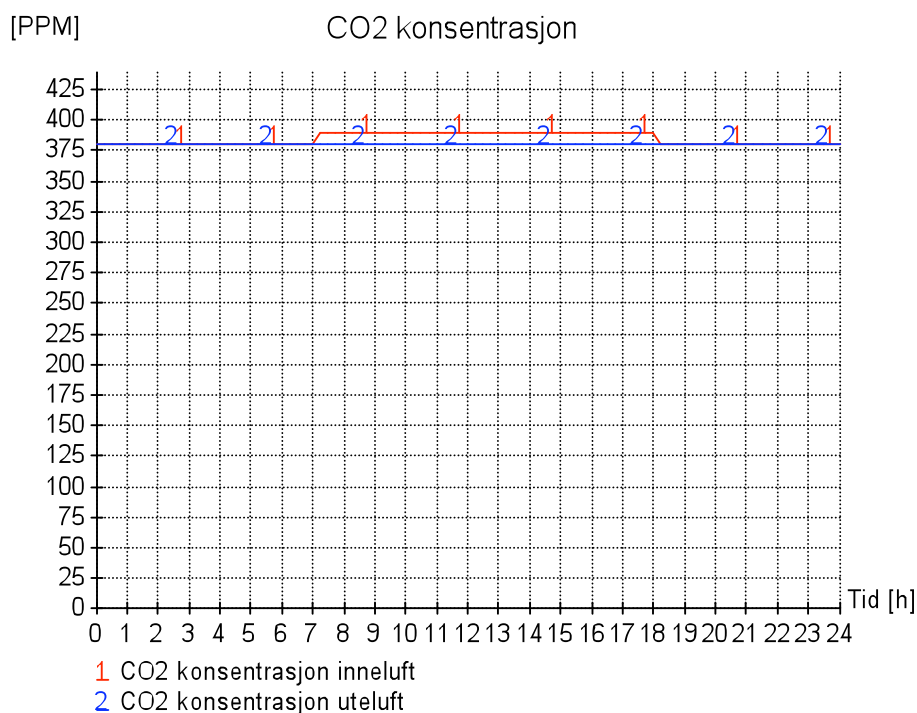
Energiramme (§8-21 b, samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	110.8 kWh/m ²
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	67.4 kWh/m ²
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	10.0 kWh/m ²
3a Beregnet energibehov vifter	55.2 kWh/m ²
3b Beregnet energibehov pumper	56.4 kWh/m ²
4 Beregnet energibehov belysning	18.8 kWh/m ²
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	23.5 kWh/m ²
6a Beregnet energibehov romkjøling	116.7 kWh/m ²
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	3.8 kWh/m ²
Totalt beregnet netto energibehov, sum 1-6	462.6 kWh/m ²
Forskriftskrav netto energibehov	185.0 kWh/m ²

B-tab 22: Minstekrav

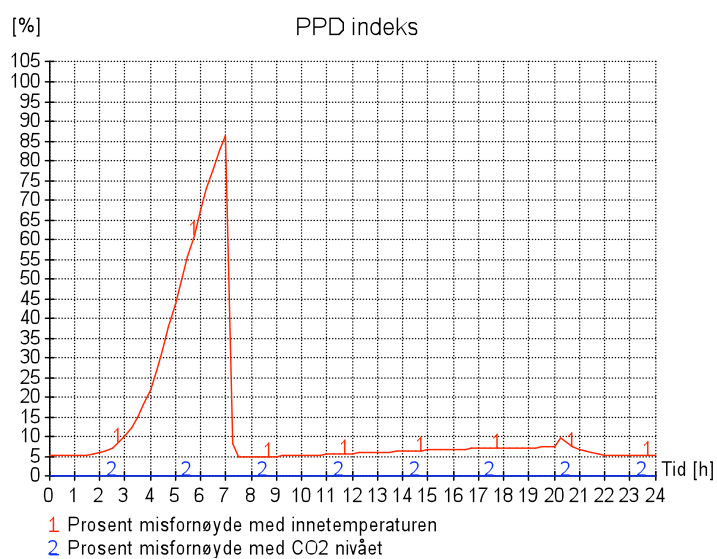
Minstekrav (§8-21 c)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0.17	0.22
U-verdi tak [W/m ² K]	0.13	0.18
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	1.12	1.60
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1.50	3.00

B.2.3) Resultater fra sommersimulering

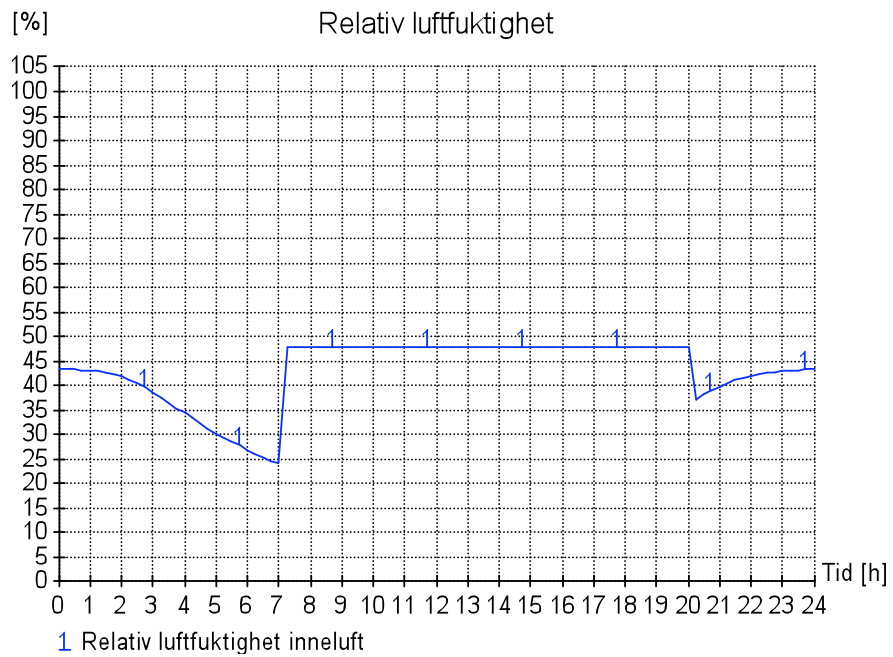
B-tab 23: CO2-konsentrasjon



B-tab 24: PPD indeks

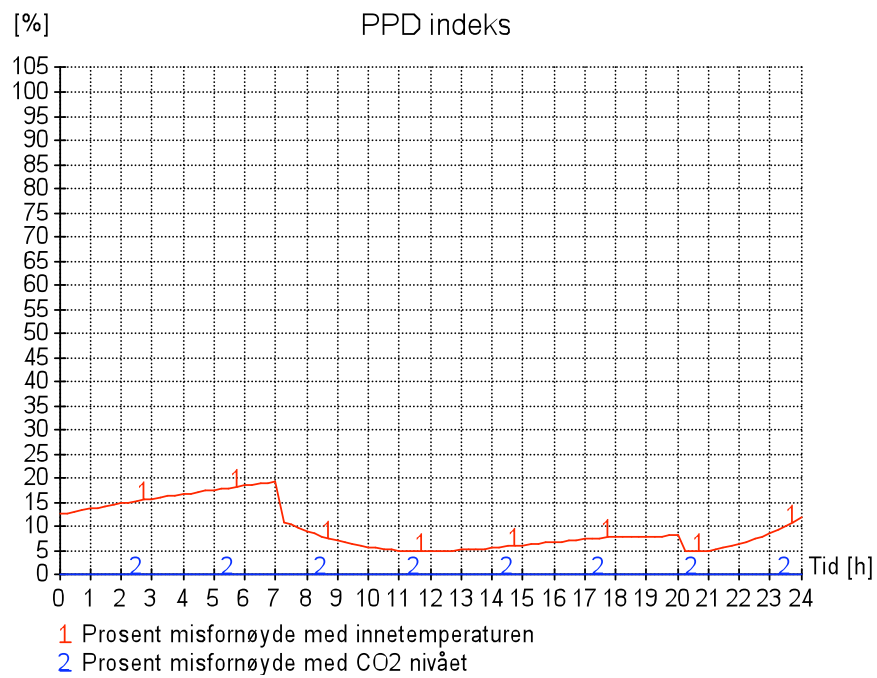


B-tab 25: RH



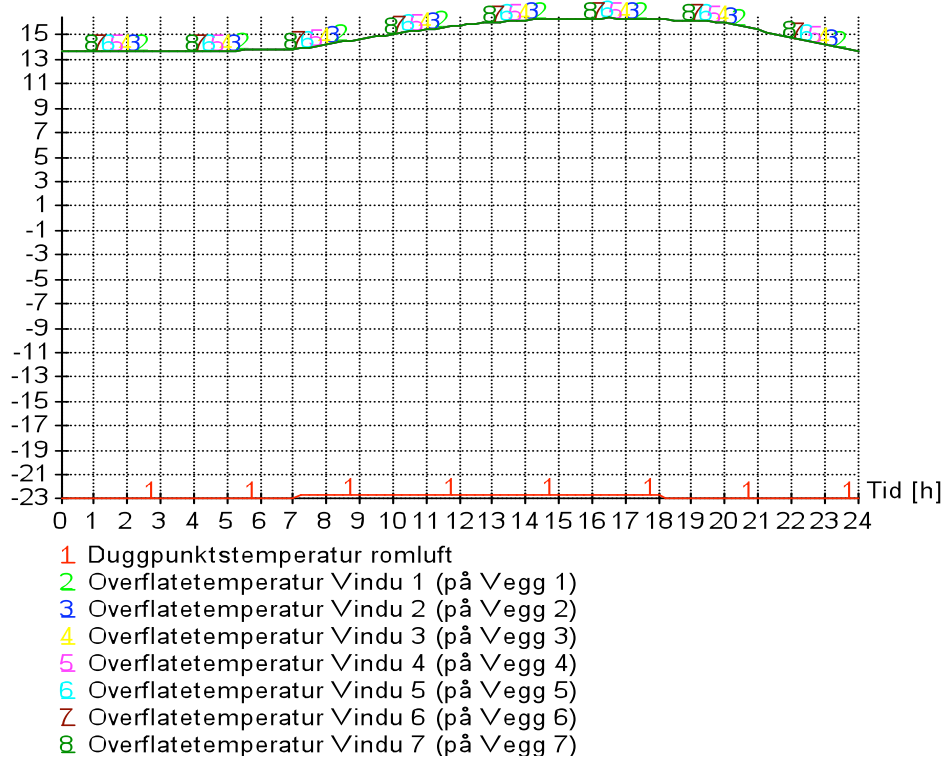
B.2.4) Resultater fra vintersimulering

B-tab 26: PPD indeks



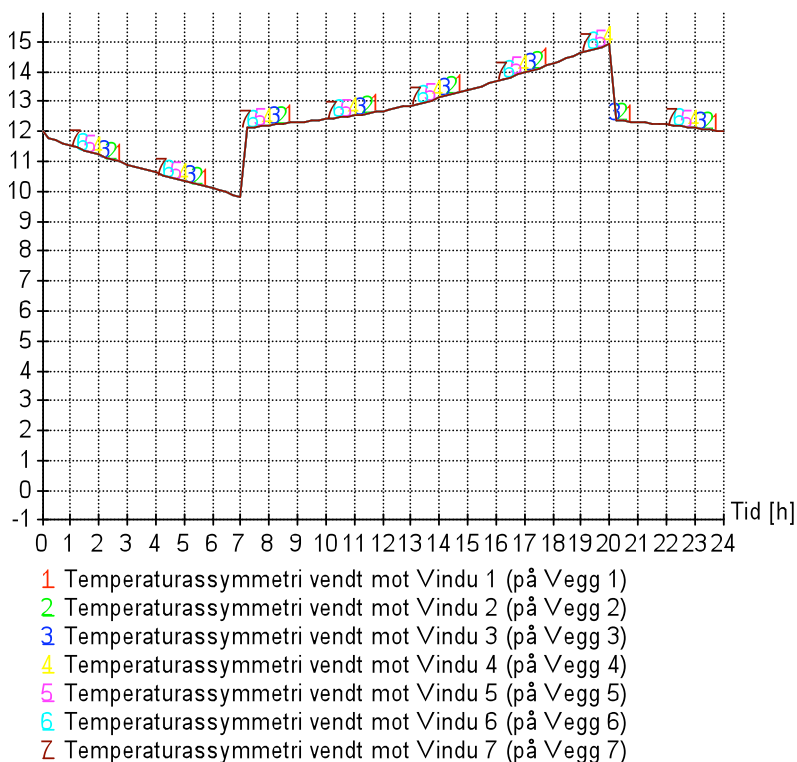
B-tab 27: Duggpunkt

Temp. [°C] Duggpunkt og overflatetemperatur på vinduer

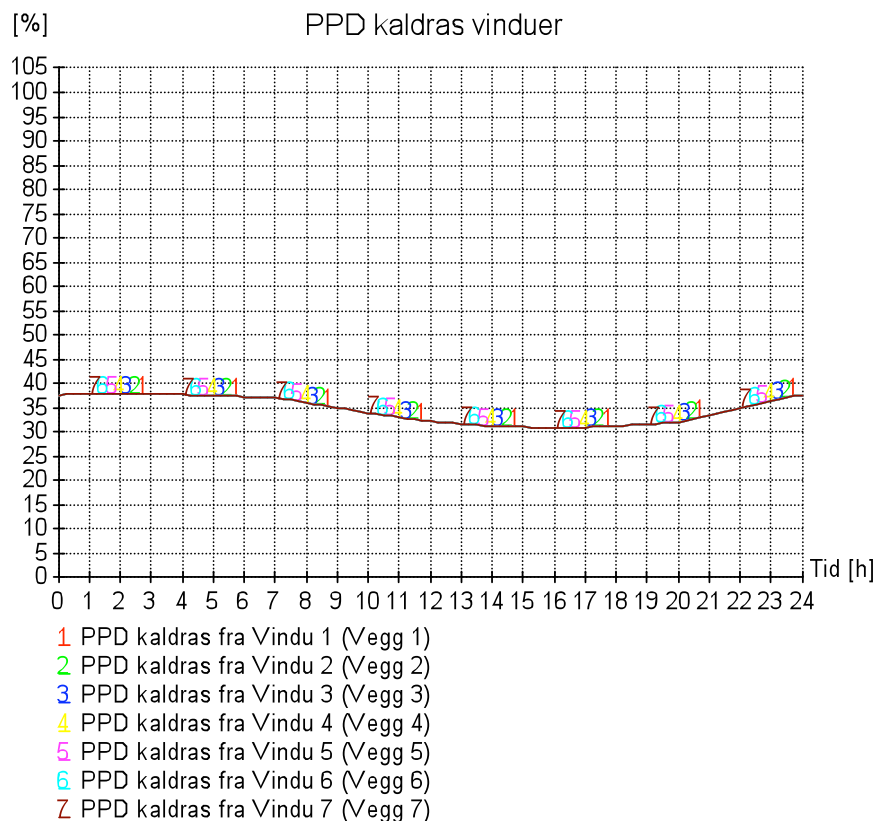


B-tab 28: Temperaturasymmetri

Temp. [°C] Temperaturasymmetri vendt mot kalde vinduflater



B-tab 29: PPD kaldras



B.2.5) Simulering for varmegjenvinner

B-tab 30: Kostnad kjøpt energi

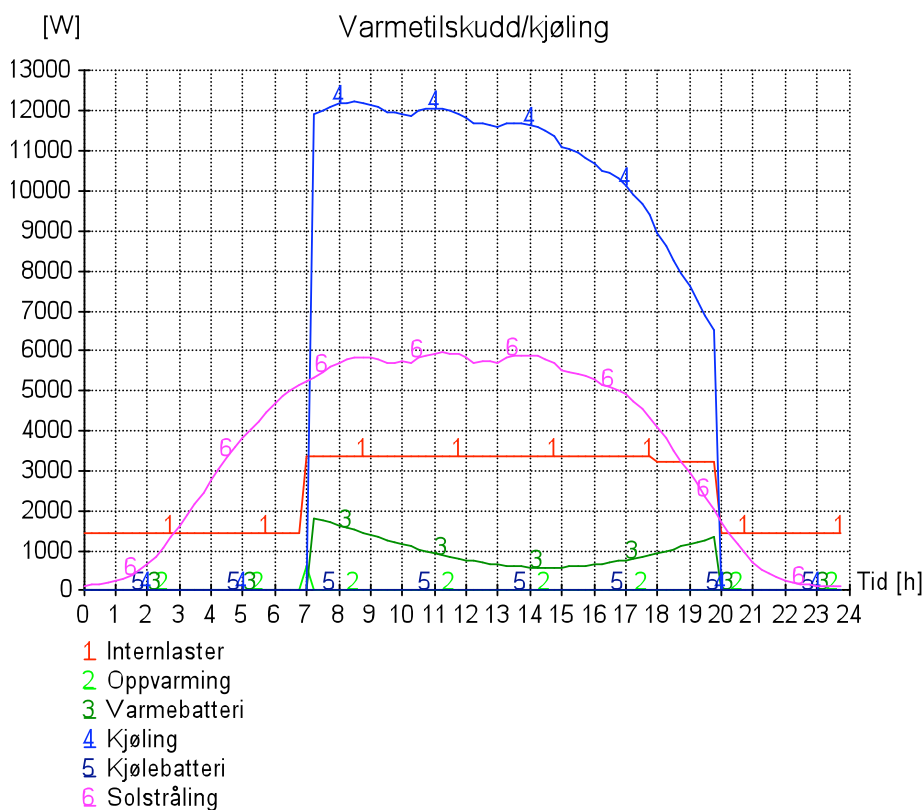
Energivare	Kostnad kjøpt energi	
	Energikostnad	Spesifikk energikostnad
1a Direkte elektrisitet	40213 kr	561.2 kr/m ²
1b El. til varmepumpesystemer	3867 kr	54.0 kr/m ²
1c El. til solenergisystemer	0 kr	0.0 kr/m ²
2 Olje	0 kr	0.0 kr/m ²
3 Gass	0 kr	0.0 kr/m ²
4 Fjernvarme	0 kr	0.0 kr/m ²
5 Biobrensel	0 kr	0.0 kr/m ²
6 Annen energivare ()	0 kr	0.0 kr/m ²
Årlige energikostnader, sum 1-6	44081 kr	615.1 kr/m ²

B.2.6) Simulering for solfaktor

B-tab 31: Energibudsjett

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	4410 kWh	61.5 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	11064 kWh	154.4 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3a Vifter	7989 kWh	111.5 kWh/m ²
3b Pumper	2446 kWh	34.1 kWh/m ²
4 Belysning	6537 kWh	91.2 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	14514 kWh	202.5 kWh/m ²
6a Romkjøling	13009 kWh	181.5 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	84 kWh	1.2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	60052 kWh	838.0 kWh/m ²

B-tab 32: Varmetilskudd



B-tab 33: Energibudsjett

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	4350 kWh	60.7 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	11058 kWh	154.3 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0.0 kWh/m ²
3a Vifter	7989 kWh	111.5 kWh/m ²
3b Pumper	2658 kWh	37.1 kWh/m ²
4 Belysning	6537 kWh	91.2 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	14514 kWh	202.5 kWh/m ²
6a Romkjøling	14477 kWh	202.0 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	84 kWh	1.2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	61668 kWh	860.6 kWh/m ²

B-tab 34: Varmetilskudd

