



SINTEF Bygg og miljø
Arkitektur og byggteknikk

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse: Alfred Getz vei 3
Telefon: 73 59 26 20
Telefaks: 73 59 82 85

Foretaksregisteret: NO 948 007
029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Hybrid ventilasjon

Muligheter og barrierer – Eksempler – Kontrollstrategier – Prosjekteringsverktøy

FORFATTER(E)

Tor Helge Dokka, Tor Arvid Vik

OPPDRAGSGIVER(E)

ØkoBygg, Norsk Hydro

RAPPORTNR. STF A01015	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Ole Gunnar Søgner	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-0102-5	PROSJEKTNR. 22H09375	ANTALL SIDER OG BILAG 32
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Marit Thyholt	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Marit Thyholt
ARKIVKODE STF A01015	DATO 2001-09-05	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Dag Kittang, Forskningsjef	

SAMMENDRAG

Den primære funksjonen til ventilasjon er å opprettholde tilfredsstillende luftkvalitet og termisk komfort. Tilførsel av frisk luft og fjerning av brukt luft kan enten skje ved bruk av mekaniske eller naturlige drivkrefter, eller ved en kombinasjon av disse. Ventilasjonsanlegg der både naturlige og mekaniske drivkrefter brukes bevisst kalles gjerne hybrid ventilasjon.

Konvensjonell mekanisk balansert ventilasjon er ofte komplekse anlegg som er kostbare å installere og drifte. Såkalt "Sick Building Syndrom" (SBS) har også ofte blitt assosiert med mekanisk ventilerte bygg, og særlig de med luftkondisjonering (mekanisk kjøling). Som en motreaksjon på dette, har det de siste årene blitt prosjektert og bygget en rekke skole- og kontorbygg med naturlig ventilasjon. Fordelene med naturlig ventilasjon er at de er enklere og mer robuste enn konvensjonelle mekaniske anlegg, men de har problemer med liten kontroll over luftmengdene, noe som ofte fører til over- eller underventilasjon. Dette fører periodevis til dårlig luftkvalitet, dårlig termisk komfort og høyt energiforbruk til oppvarming.

Hybrid ventilasjon er et kompromiss mellom naturlig ventilasjon og mekanisk ventilasjon, der man forsøker å utnytte de positive sidene ved begge systemer. Målet med hybrid ventilasjon er å minimere energibruken, men allikevel opprettholde akseptabel luftkvalitet og termisk komfort.

Denne rapporten er basert på fire artikler publisert i NORSK VVS, som omhandler fordeler og ulemper med hybrid ventilasjon (artikkel 1), eksempler på bygg med hybrid ventilasjon (artikkkel 2), kontrollstrategier for hybrid ventilerte bygg (artikkel 3) og prosjekteringsverktøy for hybrid ventilasjon (artikkel 4).

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	VVS	HVAC
GRUPPE 2	Ventilasjon	Ventilation
EGENVALGTE	Hybrid ventilasjon	Hybrid ventilation
	Inneklima	Indoor climate
	Energibruk	Energy use

INNHALDSFORTEGNELSE

1. Innledning	3
2. Artikkel 1: Hybrid ventilasjon; muligheter og barrierer	3
2.1 Bakgrunn	3
2.2 Forventninger og muligheter for hybrid ventilasjon	5
2.3 Kritiske barrierer for hybrid ventilasjon	6
2.4 Referanser	7
3. Artikkel 2: Eksempler på hybrid ventilasjon	8
3.1 Bakgrunn	8
3.2 Bang&Olufsens hovedkvarter (Struer, Danmark)	8
3.3 Berthol-Brecht-Gymnasium (Dresden, Tyskland)	10
3.4 Høkegård skole (Gøteborg, Sverige)	11
3.5 Jaer skole (Nesodden, Norge)	12
3.6 BREs miljøvennlige kontorbygg (Watford, England)	14
3.7 Sluttkommentarer	15
3.8 Referanser	15
4. Artikkel 3: Kontrollstrategier for hybrid ventilasjon; konsekvenser for luftkvalitet, termisk komfort og energibruk	16
4.1 Behov for styringssystemer	16
4.2 Aktuelle parametre for styring av luftmengder	17
4.3 Styring av komponenter i hybrid ventilerte bygg	22
4.4 Konklusjoner	23
4.5 Referanser	24
5. Artikkel 4: Prosjekteringsverktøy for hybrid ventilasjon	25
5.1 Behov for analyseverktøy og modeller	25
5.2 Aktuelle modeller	25
5.3 Konklusjoner og anbefalinger	31
5.4 Referanser	31

1 Innledning

Denne rapporten er basert på fire artikler om hybrid ventilasjon, publisert i tidsskriftet NORSK VVS. Disse artiklene er igjen basert på ”State of the art” rapporten utarbeidet i IEA¹ Annex 35 ”Hybridventilasjon i nye og rehabiliterte kontor- og undervisningsbygg ”. Tredve forskningsinstitutter, universiteter og private foretak fra femten land deltar i prosjektet, som ble initiert i 1998 og avsluttes i 2002. Norske deltagere i prosjektet er SINTEF, NTNU og Byggforsk.

Den første artikkelen omhandler hvilke muligheter, men også hvilke kritiske barrierer, som finnes for at hybrid ventilasjon skal bli en utbredt og akseptert ventilasjonsløsning. Artikkel 2 tar for seg fem pilotbygninger med hybrid ventilasjon, hvor aktuelle hybride løsninger og erfaringene så langt er presentert. Den tredje artikkelen omhandler styringssystemer og kontrollstrategier for hybrid ventilasjon, med fokus på hvilken innvirkning disse har på inn klima og energibruk. Den siste artikkelen omhandler aktuelle prosjekteringsverktøy for hybrid ventilasjon.

2 Artikkel 1: Hybrid ventilasjon; muligheter og barrierer

Denne artikkelen beskriver fordeler og ulemper med mekanisk balansert- og naturlig ventilasjon. Den summerer forventninger og mulighetene til hybrid ventilasjon samt hvilke barrierer hybrid ventilasjon støter på.

2.1 Bakgrunn

Den primære funksjonen til ventilasjon er å opprettholde tilfredsstillende luftkvalitet og termisk komfort. Tilførsel av frisk luft og fjerning av brukt luft kan enten skje ved bruk av mekanisk eller naturlige drivkrefter, eller ved en kombinasjon av disse. Ventilasjonsanlegg der både naturlige og mekaniske drivkrefter brukes bevisst kalles gjerne hybrid ventilasjon.

Mekanisk ventilasjon

Den mest vanlige måten å ventilere yrkesbygninger (inkl. skoler) på i dag er bruk av mekanisk balansert ventilasjon (MBV). MBV består av et kanalsystem og vifter, og vanligvis også komponenter som : luftfilter, varmegjenvinner , varme- og kjølebatteri, spjeld, lydfeller, etc. Den opplagte fordelene med MBV er at den kan tilføre en stabil mengde med filtrert og temperert luft, relativt uavhengig av de klimatiske forholdene ute (temperatur, vind, luftkvalitet). Slike anlegg gir også gode muligheter for varmegjenvinning.

En av ulempene ved MBV er at de er relativt komplekse og dyre å installere og drifte. Det har også vært en klar trend de siste årene å sette krav til stadig økte luftmengder (særlig i Norge), noe som har ført til at ventilasjonsanleggene står for en stor andel av de totale byggekostnadene. De står også for en relativt stor andel av drifts- og energikostnadene i skole- og kontorbygg.

¹ IEA : International Energy Agency.

Det såkalte "Sick Building Syndrom" (SBS) har bl.a. vært assosiert med mekanisk ventilerte bygg, og særlig de med luftkondisjonering (mekanisk kjøling). Mange forklaringer på dette har blitt framsatt: utilstrekkelig frisklufttilførsel, lite brukerpåvirkning, utilstrekkelig vedlikehold, støy fra ventilasjonsanlegget, feilplassert luftinntak, forurensning fra luftfiltre, varmegjenvinnere, varme- og kjølebatterier og kanalsystem, med mer. Mange ventilasjonsanlegg har også blitt designet slik at de er meget vanskelig å rengjøre når kanalsystem og komponenter med tiden blir nedsmusset. Nødvendig renhold blir derfor ikke utført.

Naturlig ventilasjon

Som en motreaksjon mot kompliserte konvensjonelle ventilasjonsanlegg, har det de siste årene blitt prosjektert og bygget en rekke skole- og kontorbygg med naturlig ventilasjon. Fordelene med naturlig ventilasjon er at de er enklere og mer robuste enn konvensjonelle mekaniske anlegg. Drifts- og vedlikeholdskostnadene er også vanligvis lavere. På grunn av korte luftføringsveier og større tverrsnitt vil det være enklere å inspisere og rengjøre slike anlegg. Brukerpåvirkningen er i de fleste tilfeller bedre enn med konvensjonelle anlegg, blant annet fordi åpning av vinduer eller ventiler i fasaden ofte er en viktig del av ventilasjonssystemet.

En ulempe med naturlig ventilasjon er at man har liten kontroll over luftmengdene, noe som ofte fører til over- eller underventilasjon. Dette kan føre til periodevis dårlig luftkvalitet og dårlig termisk komfort (temperatur og trekk). Det er i et kaldt klima som det norske også nødvendig å tilføre store mengder energi til forvarming av tilluften. Naturlig ventilasjon utføres med korte føringsveier og enkle komponenter for å holde luftmotstanden nede. Det er således også vanskelig å hindre spredning av lyd, brann og røyk mellom rom og gjennom fasaden.

Hybrid ventilasjon

Ulempene med både konvensjonelle mekaniske anlegg og naturlig ventilasjon har ført til at man har foreslått et kompromiss mellom de to typene, ved å utnytte fordelene fra de to prinsippene (mekanisk og naturlig). Ved å bruke hjelpevifter når naturlige drivkrefter ikke strekker til, kan man bedre kontrollere luftmengder. Dette gjør det enklere å tilfredsstille kravene til termisk komfort og luftkvalitet.

Hybrid ventilasjon er i IEA Annex 35 Hybvent \1\, definert som:

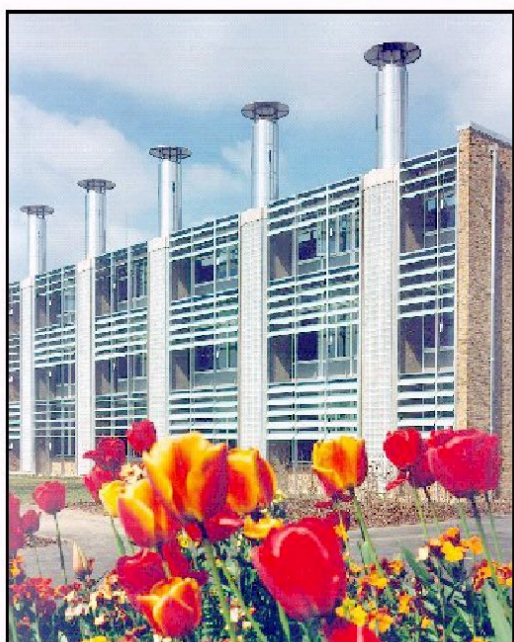
"Hybrid ventilasjon er et system som bruker både naturlige og mekaniske krefter for å minimere energibruken, men som allikevel opprettholder akseptabel luftkvalitet og termisk komfort."

Hybrid ventilasjon vil føre til langt mindre konvensjonelle ventilasjonsinstallasjoner, siden bygningskroppen i seg selv utgjør mye av luftføringsveiene. Investeringen vil også i større grad bli overført fra mekaniske installasjoner til større investeringer i bygningskroppen.

Typiske forandringer i bygningskroppen vil være: større romvolum per person, en bygningsform tilpasset luftbevegelser, mer avanserte fasade- og vindusløsninger, inntakskulverter i grunnen, avtrekkstårn, solskorsteiner, etc. Dette fører til at ventilasjonssystemet vil ha betydelig innflytelse på den arkitektoniske utformingen av bygningen (se figur 1 og 2). Dette betyr også at arkitektene må tilrettelegge og ta større ansvar for klimatisering av bygningen enn de gjør i dag.



Figur 1 : Avtrekkstårn fra den hybridventilerte IVEG-bygningen i Belgia (kontorbygg).



Figur 2 : Det nye bygget til BRE (det britiske byggforskningsinstituttet) i Watford. Viser hvordan avtrekkstårnene og glasstein i fasaden for å øke skorsteinsvirkningen påvirker den arkitektoniske utformingen av bygget.

2.2 Forventninger og muligheter for hybrid ventilasjon

Deltakere fra de femten deltakerlandene i IEA Annex 35 har i en enkel undersøkelse uttalt seg om hvilke forventninger de har til hybrid ventilasjon. Svarene er sammenfattet i følgende punkter:

- Redusert behov for elektrisk energi
- Eliminert eller redusert behov for mekanisk kjøling
- Redusert totalt energibehov for bygget
- Redusert utslipp av drivhusgasser og annen forurensing fra energiproduksjon
- Enklere renhold og vedlikehold av luftføringsveier og komponenter
- Lengre levetid en konvensjonelle anlegg
- Gi enklere og mer robuste systemer

- Redusert støy fra vifter, kanalsystem og tilluftsventiler
- Reduserte SBS-problemer (SBS : Sick Building Syndrom)
- Økt antall fornøyde brukere pga. mer brukerpåvirkning
- Økt følelse av frisk luft

Det er også en del forhold i regler og standarder som kan fremme bruk av hybrid ventilasjon. Eksempler på dette er :

- Støy generert av installasjoner
- Tilgang til kanaler og luftveier for inspeksjon og rengjøring
- Restriksjoner på bruk av elektrisitet til viftedrift, for eksempel krav til SFP
- Mindre forurensning fra komponenter i ventilasjonsanlegget

2.3 Kritiske barrierer for hybrid ventilasjon

Det har i de tidligere felleseuropeiske prosjektene Aiolos\2\ og Natvent \3\, samt i det nåværende Hybvent-prosjektet \1\ blitt gjort undersøkelser om hva de viktigste barrierene for introduksjon av naturlig og hybrid ventilasjon er. Det er undersøkt hvilke holdningsmessige, kompetansemessige, tekniske og regulative (standarder og forskrifter) hindringer som eksisterer for at slike løsninger skal bli brukt i større grad. Kritiske barrierer for hybrid/naturlig ventilasjon er funnet å være:

- Honorarer til arkitekt og rådgiver: Design av mer ukonvensjonelle klimatiserings-løsninger vil føre til mer arbeide og dermed høyere kostnader for rådgivere og arkitekter. Å få aksept for dette hos byggherrer kan være et problem.
- Økt investeringsbehov: Det er en viss fare for at dyre kulvertløsninger, mer avanserte fasade- og vindusløsninger, og avtrekkstårn kan føre til høyere investeringskostnader enn for konvensjonelle løsninger. Behov for avanserte styringssystemer kan også drive investeringskostnadene i været.
- Større behov for tid til planlegging og bygging enn med konvensjonelle løsninger. Dette vil av mange byggherrer være ugunstig pga. oppbinding av kapital og tapte leieinntekter.
- Usikkerhet med hensyn til informasjon, kunnskap og erfaring med hybrid ventilasjon. Hybrid ventilasjon er et relativt nytt konsept og det er derfor ennå lite kompetanse på slike løsninger hos rådgivere og arkitekter.
- Usikkerhet hos rådgivere og arkitekter fordi det ikke finnes egnede designverktøy for hybrid ventilasjon. Dette gjelder både enkle designregler(tommelfingerregler) og brukervennlige dataprogrammer.
- Usikkerhet om hvordan avtrekksskorsteiner/tårn, fasadeforandringer, etc. påvirker den arkitektoniske utformingen av bygget.
- Frykt for at bruk av smarte styringssystemer for å overkomme andre barrierer, fører til komplekse og dyre løsninger.
- Liten lufthastighet og små trykkfall gir en viss fare for at luftstrømmene kan gå andre veier enn intensjonen er, for eksempel kortslutningsstrømning i rom eller tilbakestrømning i avtrekk.
- Fare for dårlig luftkvalitet pga. lave eller ustabile luftmengder.
- Fare for dårlig termisk komfort pga. trekkrisiko om vinteren og for høy temperatur om sommeren.
- Fare for at brukerne ikke aksepterer fluktuasjonene i luftkvalitet og temperatur som mer naturlige ventilasjonsløsninger ofte medfører.
- Fare for at brukerne ikke har kjennskap til hvordan ventilasjonssystemet skal styres, noe som kan føre til dårlig luftkvalitet og termisk komfort. Dette gjelder særlig løsninger hvor

brukerne styrer åpning av vinduer og luker manuelt, som i de naturlig ventilerte svenske skolene tidligere omtalt i VVS-bladet.

- Risiko for å få inn forurenset luft pga. nærliggende trafikk, industri eller pollenkilder hvis ikke filtrering benyttes.
- Økt fare for innbrudd eller inntrenging av uønskede elementer (insekter, fugler, nedbør, etc.) gjennom åpninger
- Fare for støyoverføring gjennom fasadeåpninger (ekstern støy) og mellom rom i bygningen (intern støy)
- Fare for spredning av røyk og ild mellom rom gjennom luftstrømningsveiene.
- Fare for høyere energibehov til oppvarming av tilluft, pga. manglende eller dårligere varmegjenvinning.

De fleste av disse barrierene er mulig å løse på en god måte. Eksempler på bygg hvor disse barrierene har blitt løst vil bli presentert i neste nummer av VVS-bladet (artikkel 2).

2.4 Referanser

1. HYBRID VENTILATION, "State of the art report", IEA Annex 35 Hybvent, Editors : A. Delsante & T.A.Vik, 1999. (Distribuert som CD-rom, fås kjøpt gjennom Byggforsk)
2. Aggerholm, S. (1998a). "Perceived Barriers to Natural Ventilation Design of Office Buildings". NatVent TM European Report, Danish Building Research Institute (SBI).
3. Aggerholm, S. (1998b). "Perceived Barriers to Natural Ventilation in Offices". Proceedings of 19th Annual AIVC Conference, Oslo, Norway, 28-30 September 1998, pp. 398-406.
4. Allard, F. (ed.) (1998). "Natural Ventilation in Buildings – A Design Handbook". James & James, London.

3 Artikkel 2: Eksempler på hybrid ventilasjon

3.1 Bakgrunn

I "State of the Art" rapporten /1/, utarbeidet i prosjektet IEA Annex 35 Hybvent, presenteres 22 pilotbygninger med hybrid ventilasjon. Ti av de femten deltagerlandene i Annex 35 har bidratt med pilotbygg, og broorparten av byggene ligger i de nordiske landene, i Storbritannia og Benelux-landene. Disse landene har klimatiske forhold som på kan sammenlignes med det norske klimaet, muligens bortsett fra ekstreme vinterforhold. Følgende observasjoner er foretatt på de 22 byggene:

- Av de 22 byggene er 13 kontorbygg, 7 undervisningsbygg og 1 laboratoriebygg. Det siste er NBIs Natvent pilotanlegg, som NBI har bygget opp i sine laboratorier. Alle byggene er ferdigstilt etter 1994.
- Mange bygg utnytter termiske drivkrefter for dagventilasjon, men blir ofte supplert med vifter for nattkjøling sommerstid
- Kontrollstrategien er basert på temperatur- og CO₂-kontroll i 5 av undervisningsbyggene og 2 av kontorbyggene, 12 bygg styres kun etter temperatur, 2 bygninger styres etter infrarød tilstedeværelsessensorer, og i 1 bygg holdes luftmengdene konstant (NBIs laboratoriebygg).
- Brukerpåvirkning (vindusåpning, individuell termisk kontroll, styring av vifter) er "tillatt" i 12 av byggene.
- Fem av byggene har blitt rehabilitert, noe som viser at det også i eksisterende bygg er mulig å introdusere hybrid ventilasjon. Dette er viktig siden mye av byggemarkedet i fremtiden vil omhandle ombygging og rehabilitering av eksisterende bygg.

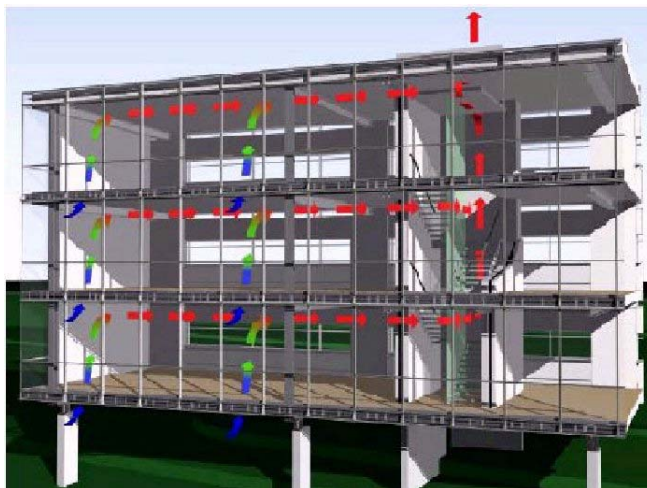
I denne artikkelen er det valgt ut fem bygg for nærmere beskrivelse. Disse er vurdert som de mest aktuelle med hensyn til nordiske forhold. Mediå skole i Grong er også et av pilotbyggene i Annex 35, men er ikke omtalt her siden det har vært presentert (og debattert) i Norsk VVS tidligere. For informasjon om de andre byggene vises det til CD-rom med State-of-the-Art rapporten som selges av Byggforsk, eller på hjemmesidene til Annex 35: <http://hybvent.civil.auc.dk>. En oversikt over norske bygninger med hybrid ventilasjon, både de som er bygget og de som er under planlegging, kan finnes på : http://www.byggforsk.no/hybvent/Norske_bygninger.htm

3.2 Bang & Olufsens hovedkvarter (Struer, Danmark)

Byggherren, Bang & Olufsen, satte følgende krav til dette bygget: det skulle være av høy kvalitet, ha et minimum av tekniske installasjoner, og de tekniske installasjonene skulle være enkle og lite fremtredene. Innredningen av bygget er basert åpne kontorlandskap. Bygget har et oppvarmet gulvareal på 1520 m², og det ble ferdigstilt i 1998.



Figur 2 : Bang & Olufsens nye hovedkvarter i Danmark



Figur 3: Ventilasjonsprinsippet i B&O hovedkvarter.

Ventilasjonsprinsipp

- Ventilasjonsprinsippet går på bruk av skorsteinseffekt og vindkrefter, med noe assistanse av vifter når nødvendig.
- Det tilføres luft tilsvarende 3 luftomsetninger i timen om sommeren og 1.5 luftomsetninger i timen om vinteren.
- Friskluft blir tilført gjennom lavtliggende ventilasjonsvinduer (lav brystningshøyde) i hvert kontor, og forvarmet med enkle varmebatterier (varmerør med ribber).
- Tilførsel av luft ved gulvnivå fører til en fortrenningsventilasjonseffekt med god luftkvalitet i oppholdssonen.
- Brukt luft blir avtrekt gjennom trappeoppganger som har takluker i toppen. I toppen av trappeoppgangene er det også plassert avtrekksvifter som assisterer når naturlige drivkrefter er for små.

Spesielle komponenter

- Et smalt band av lavt plasserte og automatisk kontrollerte vinduer på nordfasaden tilfører luft.
- Ved vinterdrift er enkle varmebatterier brukt for å forvarme luften som tas inn på nordfasaden.

- På sydfasaden er det høyt plasserte dagslysvinduer, som også kan brukes som tilluftsåpninger ved behov.
- To frekvensstyrte aksialvifter plassert i toppen av trappeoppgangene. Disse er styrt av lufthastighets-sensorer.
- For å redusere støy fra viftene er det montert baffler med lydabsorberende materiale i toppen av trappehusene.

Kontrollstrategi

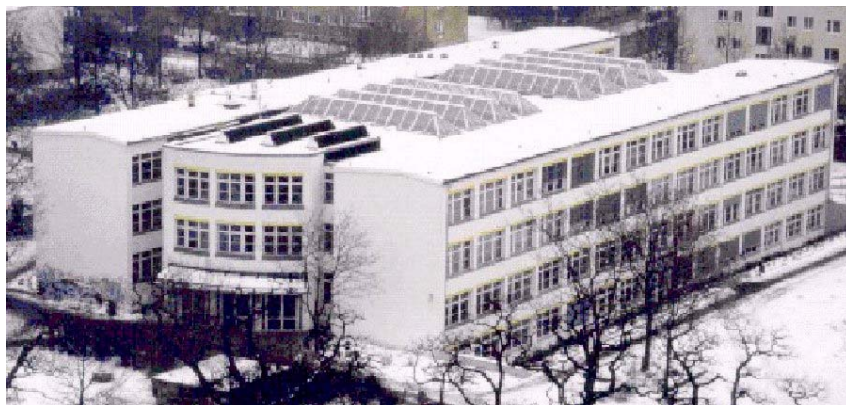
Det hybride ventilasjonssystemet er styrt etter tilstedeværelse og CO₂ for kontroll av luftkvaliteten, og etter romtemperaturen for termisk komfort (ved nattkjøling). Varmebatteriene i tilluftsåpningene er styrt etter tilluftstemperatur-sensorer. Når utetemperaturen kommer under 0 °C, stenges det hybride ventilasjonsanlegget, og brukerne må bruke vinduslufting for å opprettholde akseptabel luftkvalitet.

Erfaringer

Resultater/erfaringer fra dette bygget er ennå ikke tilgjengelige. Det er satt i gang et detaljert måleprogram som inngår i Annex 35 Hybvent (1998-2002).

3.3 Berthol-Brecht-Gymnasium (Dresden, Tyskland)

Dette var en typisk skolebygning slik de ble bygget i tidligere Vest Tyskland på 70- og 80-tallet. De ble opprinnelig designet for maksimal utnyttelse av dagslys, ved at alle klasserom fikk dagslys fra to sider. Under renoveringen på midten av 90-tallet ble det åpne atriet lukket, samt tak og fasade etterisolert. Glasstaket i atriet ble beholdt for god dagslys tilgang. Bygget ble ferdigstilt i 1995.



Figur 3 : Bertol-Brecht-Gymnasium i Dresden.

Ventilasjonsprinsipp

- Atriet mellom de to fløyene i bygget (se figur 3) brukes aktivt i klimatiseringen av undervisningsfløyene. Om vinteren tilføres forvarmet luft fra atriet mekanisk (med vifter) til undervisningsfløyene. Om sommeren brukes skorsteinseffekten i atriet til naturlig ventilasjon av klasserommene. Det samme prinsippet brukes også til nattkjøling av bygget.
- Hvert klasserom har sitt eget ventilasjonsanlegg (kanalsystem med vifter), og viftene styres av brukerne selv.

Spesielle komponenter

- Termostatventiler på alle radiatorer, for nattsenkning av temperatur.
- Temperaturkontroll av nattkjølings-strategien.
- Det er brukt vinduer med lav U-verdi ($1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- For å kontrollere luftmengdene sommerstid (naturlig ventilasjon) er åpningsarealet i taket i atriet justerbart.

Kontrollstrategi

Det sentrale styringssystemet er programmert etter vanlig oppholdstid i bygget. Utenfor vanlig oppholdstid kontrolleres oppvarmings- og ventilasjonssystemet automatisk (for nattkjøling og nattsenkning av temperatur). I arbeidstiden er brukerne ansvarlig for individuell og manuell kontroll av systemene.

Erfaringer

Generelt rapporteres bygningen å fungere tilfredsstillende, men optimale forhold er ennå ikke oppnådd. Det er registrert enkelte problemer med støy fra vifter, og med støyoverføring mellom atriet og klasserommene. Temperaturer, energibruk og driftstider for vifter skal måles i forbindelse med Hybvent-prosjektet.

3.4 Hökegård skole, (Göteborg, Sverige)

Dette er også et renoveringsprosjekt, hvor en skole med mekanisk ventilasjon fra 1964 skulle rehabiliteres. Det ble valgt å bytte ut det eksisterende mekaniske ventilasjonsanlegget med et hybrid ventilasjonskonsept. Bygget ble ferdigstilt i 1997.



Figur 4 : Hökegård skole i Göteborg.

Ventilasjonsprinsipp

- Ventilasjonsprinsippet innebærer bruk av skorsteinseffekt, med noe assistanse av vifter ved behov.
- Friskluft tas inn gjennom en kanal i kryprommet under skolen.
- Brukt luft trekkes ut gjennom lanterniner på taket (se bildet). Der er det også plassert avtrekksvifter som starter når oppdriftskreftene er for små.
- Når det er behov for forsert ventilasjon, brukes lufting via vinduene i fasaden (i pausene).

- Ved vanlig drift tilstrebes det fortrengningsventilasjon (høy ventilasjonseffektivitet) i rommene. Ved vinduslufting vil det vanligvis bli omrøringsventilasjon i rommene.
- Luftmengdene behovsstyres for å spare energi.

Spesielle komponenter

- Kontroll av hjelpevifter for å tilfredstille krav til luftkvaliteten, gjøres utfra signaler fra CO₂-senser. CO₂-nivået skal ikke overstige 1000 ppm. Systemet tillater manuell overstyring.
- Følgende løsninger er valgt for å spare energi: variabelt luftvolum (behovsstyrt), økt dagslystilgang ved bruk av reflektorer og takvinduer, varmetap redusert ved hjelp av god takisolasjon og bruk av superisolerende vinduer ($U = 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Store kanaler og store åpninger er brukt for å redusere trykktapene i ventilasjonsanlegget.

Kontrollstrategi

Kontrollstrategien er utviklet for å opprettholde god luftkvalitet i klasserommene. Hjelpevifte er enten automatisk styrt eller kan overstyres manuelt fra hvert klasserom. Den automatiske kontrollen styres etter forhåndsinnstilte CO₂- og temperaturnivåer.

Erfaringer

Høkegård skole vil bli evaluert med hensyn til ventilasjon og energibruk, og resultater vil bli presentert i senere Annex 35 publikasjoner. Simuleringer indikerer at hjelpevifta går ca. 90 % av året. Energibruken til oppvarming er beregnet redusert fra 200 kWh/m² (gammel skole med mekanisk ventilasjon) til 135 kWh/m². Den elektriske energibruken er beregnet redusert fra 25 kWh/m² til 13 kWh/m².

3.5 Jaer skole, (Nesodden, Norge)

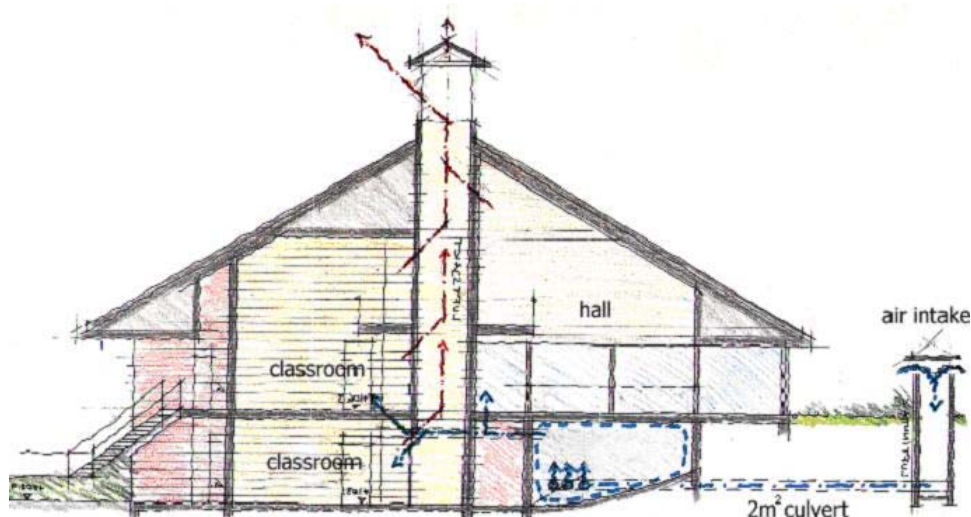
Ved prosjektering av Jaer skole ble det lagt vekt på kostnadseffektive og bærekraftige løsninger for å oppnå god luftkvalitet og god termisk komfort, samtidig med et lavt energiforbruk. Andre forhold det ble lagt vekt på var enkelt vedlikehold, et minimum av tekniske installasjoner og lavt støynivå. Bygget er på 800 m² BTA og sto ferdig i 1999.



Figur 5 : Jaer skole på Nesodden

Ventilasjonsprinsipp

- Anlegget utnytter hovedsakelig oppdriftskrefter, med noe assistanse av vifte ved behov. Ved bruk av aerodynamisk utformet avtrekkstårn, utnyttes også vindkrefter når de er tilgjengelige.
- Luft tilføres via betongkulvert og nedgravde plastrør i grunnen. Luften forvarmes med varmebatteri ved behov.
- Fortrengningsventilasjon benyttes for å oppnå god luftkvalitet i oppholdssonene, samt for å redusere luftmengdebehovet. Videre er det brukt lavemiterende materialer for å ytterligere redusere luftmengdebehovet.



Figur 6 : Prinsippskisse luftbevegelser i Jaer skole.

Spesielle komponenter

- *Kontroll av luftkvalitet* : Luftmengdene er kontrollert med motorstyrte spjeld i avtrekkstårnene. CO₂-sensorene i hvert klasserom er plassert rett over pustesonen for de sittende skolebarna (ca. 1 m høyde). Den lange kulverten fungerer som ”sedimenteringsfilter” for tilluften. Det er ikke installert noen annen konvensjonell filtrering enn dette.
- *Temperaturkontroll*: Temperatursensorer er plassert ute og i hvert klasserom. Brukerne kan øke luftskiftet ved vinduslufting etter behov, noe som antas gjort om sommeren for å unngå overoppvarming. Året rundt tilfører kulvertsystemet minimum tilluftsmengde. Et lavtemperatur radiatorsystem står for oppvarmingen i klasserommene. Et varmebatteri i kulverten forvarmer luften til 15 °C ved behov.
- *Energisparetiltak*: Fortrengningsventilasjon brukes for å oppnå høy ventilasjonseffektivitet. Behovsstyrt ventilasjon hvor CO₂- settpunktet er utetemperaturkompensert. Det tillates 1500 ppm når temperaturen er -15 °C eller lavere, og 1000 ppm når temperaturen er over 10 °C. Det er brukt vinduer med lavemisjonsbelegg og tung gass, og vegger og tak er godt isolerte. Den lange kulverten på 60 meter (overflateareal på 300 m²) utgjør en stor termisk masse, som kan lagre betydelig med varme. Dette reduserer de daglige temperatursvingninger, noe som reduserer behovet for forvarming, samt reduserer (eliminere) behovet for mekanisk kjøling. Den sesongmessige varmelagringssevnen til kulverten er estimert til 3000-4000 kWh. Romhøyde og romvolum per elev er større enn konvensjonelle skoler, og virker som en ventilasjonsbuffer. Lavtemperatur-oppvarming med energitilførsel fra oljebrenner eller elektrisk kolbe, er lagt opp for fremtidig tilkobling til et varmepumpesystem (grunnvannspumpe).
- *Lave trykktap*: Det er brukt store tverrsnitt for luftføringsveiene og store luftbehandlingskomponenter med lavt trykfall.

Kontrollstrategi

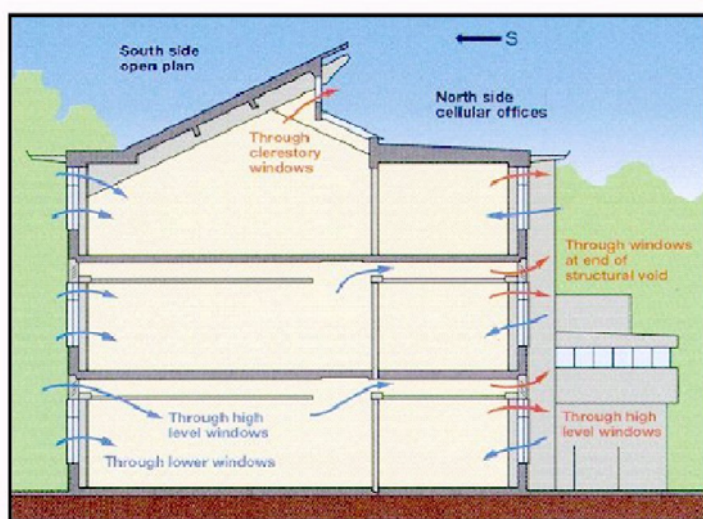
Styringssystemet styres fra en sentral enhet, og kan også fjernstyres via modem. Systemet har fire operasjonsmoduser, styrt av to parametre: 1. Behov for forvarming, 2. Ikke behov for forvarming, og A. Dagdrift, B. Nattdrift. Det kjøres også nattkjøling (nattventilasjon) om sommeren. Når CO₂ settpunktet overskrides åpnes spjeldene i avtrekkstårnet gradvis. Hvis CO₂-nivået fortsatt er over settpunktet startes de frekvensstyrte viftene.

Erfaringer

Bygningen ble ferdigstilt etter tids- og kostnadsplanen. Den totale kostnaden for bygningen er ca. 19 000 kr/m², som er noe over gjennomsnittet for konvensjonelle skoler (12 000 – 15 000 kr/m²). Dette skyldes hovedsakelig bruk av tunge konstruksjoner i tegl, som er brukt i stedet for tre. Kostnader til ventilasjonssystemet på 1600 kr/m² er under gjennomsnittet. Et måleprogram for skolen pågår, og resultater vil bli publisert senere. Lærere og elever er rapportert meget godt fornøyd med innemiljøet i skolen. Man kan merke litt trafikkstøy fra avtrekkstårnene når spjeldene er helt åpne.

3.6 BREs miljøvennlige kontorbygg (Watford, England)

Det nye kontorbygget til det Britiske byggforskningsinstituttet, skulle være et pilotbygg for ulike bærekraftige teknologier, deriblant naturlig/hybrid ventilasjon. Bygget har et bruttoareal på 2000 m² fordelt på tre etasjer, og det ble ferdigstilt i 1997.



Figur 7 : Prinsipp for luftbevegelser i BREs bygg i Watford, Storbritannia.

Ventilasjonsprinsipp

Det brukes en rekke ulike løsninger for å ventilere dette bygget: kryssventilering (gjennomstrømming gjennom hele bygget), ensidig vinduslufting, tilførsel og forvarming av luft gjennom en hul himling i betong (vinter), solskorsteiner for å øke termisk oppdrift, og avtrekk gjennom høytstående vinduer i øverste etasje. Det er også plassert hjelpevifter i avtrekkstårnene som assisterer naturlige drivkrefter når nødvendig, og ved behov for nattkjøling.

Spesielle komponenter

- Et automatisk styringssystem styrer åpningen av vinduer, ventilasjonsåpninger og vifter i avtrekkstårnene.

- En sinusformet himling i betong er benyttet for å øke den utnyttbare termiske massen i bygget (overflatearealet av himlingen øker). Hulrommene over denne himlingen benyttes også for tilførsel og forvarming av luft om vinteren.
- Det er benyttet vindusløsninger og dagslyshyller som maksimerer dagslysutnyttelsen og kontrollerer solvarmetilskuddene.
- Det er benyttet vannbåren gulvvarme som også kan brukes som kjølesystem i sommerhalvåret. Dette systemet er koblet til et 70 meter dypt borrehull for uttak av ”gratis” varme og kjøling.

Kontrollstrategi

Et automatisk styringssystem kontrollerer bygningen, og styrer vinduer og ventilasjonsåpninger utfra behovet for ventilasjon og nattkjøling. Brukerne har stor kontroll over bruken av vinduene, og kan åpne og lukke disse etter behov.

Erfaringer

Om vinteren er luftskiftet i snitt 0.75 luftomsetninger pr. time, noe som svarer til en CO₂-konsentrasjon på ca. 1000 ppm . Om sommeren er luftskiftet i snitt 2-3 luftomsetninger pr. time, og over 10 luftskifter i timen har blitt registrert. Dette fører til god luftkvalitet (600-800 ppm CO₂) om sommeren. Temperaturen har aldri vært oppe i beregnet max temperatur på 28 °C, og kun ved tre anledninger har temperaturen oversteget 25 °C.

3.7 Sluttkommentarer

Følgende er verdt å legge merke til på byggene som er presentert her :

- Det er ennå lite tall på energibruken til disse byggene (sett bort fra de simulerte resultatene for den svenske skolen). Det vil komme flere resultater på dette i løpet av Hybvent prosjektet (1998-2002).
- Ingen av byggene har mekanisk kjøling, og de fleste utnytter en eller annen form for passiv kjøling (vanligvis nattventilering). BREs bygg har mulighet for kjøling med det vannbårne gulvvarmesystemet som er koblet til grunnvann i et borehull.
- I det danske og det britiske bygget er luftskiftet om vinteren betydelig lavere enn det som er vanlig i Norge.
- Ingen av byggene har filtrering på inntaksluften. Det er ikke gitt noen begrunnelse i State-of-the-Art rapporten for at dette er valgt vekk, bortsett fra at man generelt ønsker enkle systemer med små trykkfall. De fleste av byggene ligger imidlertid i områder med normal til god uteluftkvalitet. På Jaer skole regner man også med at den lange kulverten på 60 meter har en betydelig filtreringsvirkning via sedimentering av partikler.
- Ingen av byggene har varmegjenvinning. Dette er i de fleste av byggene kompensert ved at det er relativt moderate luftmengder om vinteren, og luftmengdene er kraftig behovsstyrt. Flere har også passiv forvarming av tilluften via kulverter/kanaler i grunnen eller i atrier. Valg av løsning med hensyn til forvarming/varmegjenvinning er selvsagt meget avhengig av de klimatiske forholdene på stedet.

3.8 Referanser

1. HYBRID VENTILATION, ”State-of-the-Art report”, IEA Annex 35 Hybvent, Editors : A. Delsante & T.A.Vik, 1999. (Distribuert som CD-rom, fås kjøpt gjennom Byggforsk).

4 Artikkel 3: Kontrollstrategier for hybridventilasjon; konsekvenser for luftkvalitet, termisk komfort og energibruk

Denne artikkelen vil ta for seg behovet for kontrollstrategier og styringssystemer i bygg med hybrid ventilasjon. Med kontrollstrategier menes her metoder for å styre visse parametere som for eksempel temperatur, luftkvalitet og luftmengder innenfor et spesifisert område. Dette kan gjøres enten manuelt ved eksempelvis vinduslufting, eller automatisk. Med styringssystem menes et automatisert styringssystem, med sensorer, motorer, spjeld, bussystem, etc.. Konsekvenser med hensyn på termisk komfort, luftkvalitet og energibruk ved valg av kontrollparametere for styring av luftmengder blir også diskutert i denne artikkelen. Artikkelen baserer seg i begrenset grad på innholdet i 'State-of-the-Art' rapporten \1, og er mer tilpasset norske problemstillinger på dette området.

4.1 Behov for styringssystemer

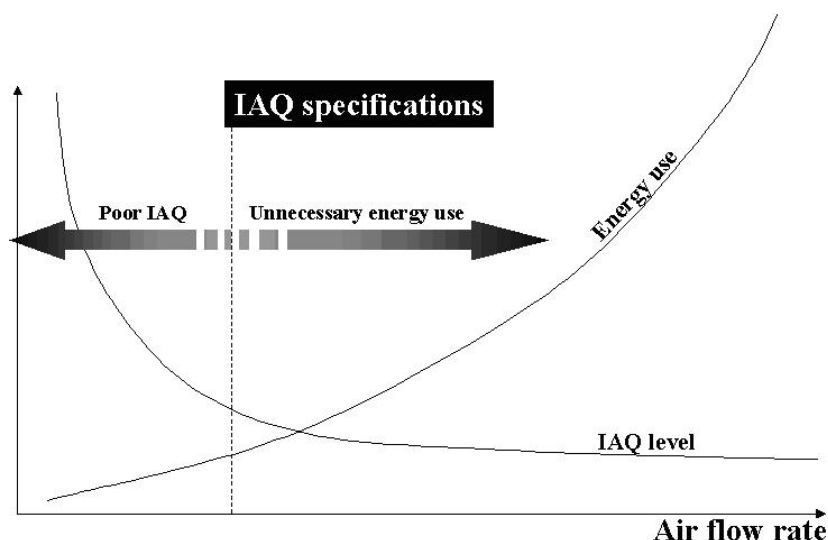
I et hybrid ventilasjonsanlegg vil man typisk (minst) ha to forskjellige årstidsavhengige driftsstrategier:

1. En vinterstrategi i oppvarmingsseasonen der luft tilføres for å opprettholde tilfredsstillende luftkvalitet. Ved for lave luftmengder vil luftkvaliteten bli for dårlig², mens ved for høye luftmengder vil energibruken bli høy. Det er derfor nødvendig å styre luftmengdene relativt strikt for å optimere mellom disse to kravene. Dette tilsier at det er behov for avanserte styringssystemer.
2. En sommerstrategi i kjølesesongen der luft tilføres for å opprettholde akseptabel termisk komfort. I dette tilfellet er optimering mot energibruk ikke så kritisk på grunn av høyere utetemperatur, og et mindre avansert styringssystem er mulig. Man kan også her i større grad la brukerne stå for kontrollen (manuell kontroll), siden de kan anslå de termiske forholdene relativt godt. En ulempe ved dette er den trege responsen på termiske forhold (avhengig av byggets termiske treghet) brukerinngrep har. Det kan derfor også her være en fordel med automatisk styring. Ved ulike nattkjølingsstrategier for å unngå overoppvarming i sommerhalvåret vil det også kunne være behov for avansert automatisk styring.

Overgangssesongene vår og høst vil også kunne by på problemer da det en og samme dag kan være både oppvarmings- og kjølebehov. Dette kan også stille krav til avansert styring.

Selv om det er eksempler på naturlig- og hybrid ventilerte bygg med enkle styringssystemer, er mange moderne hybrid ventilerte bygninger utstyrt med avanserte automatiske styringssystemer. Kritiske aspekter ved valg av styringssystem for kontroll av luftkvalitet og termisk komfort er sammenfattet i tabell 1.

² Hva som er nødvendig luftmengde for å oppnå tilfredsstillende luftkvalitet er et omstridt tema, men vil ikke bli diskutert videre her.



Figur 1 Kvalitativ sammenheng mellom luftmengder, luftkvalitet og energibruk

Tabell 1 Kritiske aspekter ved kontroll av luftkvalitet og termisk komfort.

Forhold	Kontroll av luftkvalitet	Kontroll av termisk komfort
Mål for inneklimate	Det settes i de fleste byggeprosjekter klare krav til inneluftkvaliteten (eks. CO ₂) eller til friskluftmengder	Krav i standarder og byggeforskrifter relativt strenge, selv om forskningsresultater indikerer at mer fleksible kriterier kan aksepteres ³
Kan brukere bedømme inneklimate forholdene	Generelt nei. Kun hvis luftkvaliteten er veldig dårlig.	Ja, brukerne merker fort om de termiske forholdene er dårlig
Responstid mellom endring av ventilasjon og virkning på inneklimate	Rask respons.	Avhengig av termisk tyngde på bygningen. Vil i mange tilfeller være treg.
Behov for automatiske og avanserte styringssystemer	Stort behov hvis optimering mellom luftkvalitet og energibruk er ansett som viktig.	I de fleste tilfeller ikke nødvendig med avansert kontroll, men automatisk kontroll kan være gunstig.

4.2 Aktuelle parametere for styring av luftmengder

Det finnes en rekke parametere man kan styre luftmengden etter i et hybrid ventilert bygg. I mange tilfeller styres også luftmengden etter flere variable som for eksempel utetemperatur og CO₂, fordi både akseptabel luftkvalitet og termisk komfort skal oppnås. Tilført luftmengde vil også påvirke styringen av varmesystemet i bygget, og da særlig i bygg som er mer naturlig ventilert. I bygg med naturlig ventilasjon vil luftmengden ofte fluktuere betydelig, noe som påvirker og stiller store krav til styring av oppvarmingssystemet. Nedenfor er ulike styringsparametere diskutert, også med konsekvenser for luftkvalitet, termisk komfort og energibruk.

CO₂

CO₂ nivået brukes ofte som et mål på luftkvaliteten i lokaler med høy persontetthet som klasserom, auditorier og lignende. Relativt mange hybrid ventilerte skoler styrer luftmengder etter CO₂ nivået. For eksempel bruker både Mediå skole i Grong og Jaer skole CO₂ styring av luftmengdene. Et vanlig krav, blant annet i veiledningen til byggeforskriftene, er at CO₂ nivået ikke skal overstige 1000 ppm. Dette kravet har imidlertid blitt mye kritisert fordi CO₂ i seg selv

³ Forskning på det som kalles adaptiv termisk komfort viser at den temperaturen som oppfattes som mest komfortabel inne, er en funksjon av utetemperaturen. Dvs. at ved høye utetemperaturer aksepteres og foretrekkes det en høyere innetemperatur, enn ved lavere utetemperaturer.

ikke har helseeffekter før ved langt høyere konsentrasjoner (over 5000 ppm). Mange mener at kontroll med temperatur og relativ fuktighet er viktigere enn å holde CO₂ nivået lavt. Dette har også gitt seg utslag i at flere naturlig og hybrid ventilerte skoler i Sverige og Norge har blitt gitt dispensasjon til å ha CO₂ nivå opp til 1500 – 2000 ppm. Jaer skole tillater f.eks. 1500 ppm i kalde perioder. Erfaringer med å tillate så høye CO₂ nivåer i kalde perioder i naturlig- og hybrid ventilerte skoler er foreløpig gode.

Fordelen med CO₂ styring er at det er relativt enkelt å måle CO₂ og at det er en brukbar indikator på forurensning fra personer. En annen fordel med CO₂ styring er at den ofte også kan brukes ved brannventilasjon. Ved røykutvikling vil da åpningsarealer åpnes maksimalt og vifter gå for fullt, noe som er gunstig for å sikre evakuering av bygget. Ulemper er at CO₂ sensorer kan være ustabile og trenger hyppig kalibrering. CO₂ er heller ikke alltid en god indikator på luftkvaliteten i lokaler der persontettheten er liten, som for eksempel i kontorbygg.

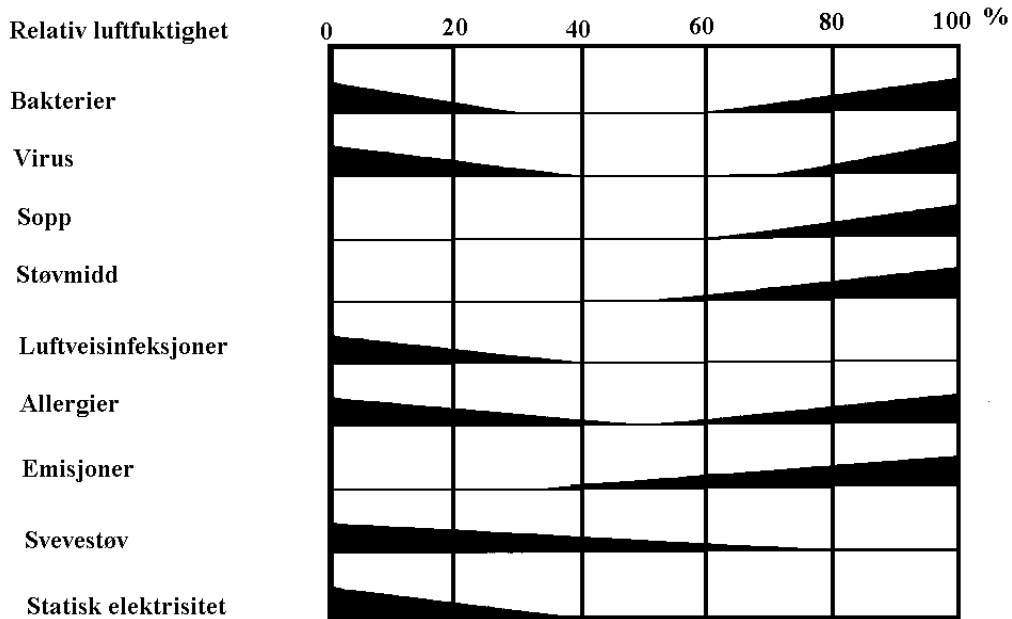
Relativ fuktighet

I og med at den dominerende fuktproduksjonen i mange bygg (kontorer, skoler, og lignende) kommer fra personer, har også relativ fuktighet blitt brukt som en indikator på forurensning fra personer. I motsetning til CO₂, absorberes derimot fuktighet i bygningskonstruksjoner og innredning, og er derfor mindre egnet som indikator på personskapt forurensning. Det som imidlertid har blitt debattert de siste årene er om det skal settes krav til relativ fuktighet, og da særlig en nedre grenseverdi. Selv om relativ fuktighet i seg selv har liten innvirkning på termisk komfort ved normale temperaturforhold (20-25 °C), er den en modifikator for en rekke andre forhold, se figur 2. Ved lav relativ fuktighet (under 20 – 30 %) vil statisk elektrisitet øke, binding av støv og partikler i luften vil bli redusert og slimhinnes filtreringsevne for forurensninger reduseres \2\ . I yrkesbygg og skoler ventilert med dagens krav til luftmengder (~8 – 20 m³/h), vil relativ fuktighet i lange perioder om vinteren ligge godt under 20 %. Som vist på figur 2 vil en så lav relativ fuktighet kunne føre til en rekke problemer. For å unngå lav relativ fuktighet er det hovedsakelig tre muligheter :

1. Senke romtemperaturen. En senking av innnetemperaturen vil heve relativ luftfuktighet. Men det er selvsagt begrenset hvor lavt innnetemperaturen kan senkes.
2. Redusere luftmengdene kraftig i kalde perioder. Dette fører til at fuktighet produsert i rommet i mindre grad fjernes med ventilasjonsluften, og relativ fuktighet vil bli høyere.
3. Tilføre fukt kunstig (befuktere). Dette kan enten gjøres i sentralt i ventilasjonsanlegget, eller lokalt i hvert rom.

De svenske naturlig ventilerte skolene \3\, som også har blitt brukt som mal for mange av de norske hybrid og naturlig ventilerte skolene, har en relativt ekstrem tilnærming til denne problematikken. Disse skolene har lav innnetemperatur i vinterhalvåret, ca. 19-20 °C, og har kraftig reduserte luftmengder om vinteren. De som står bak disse skolene mener at relativ fuktighet ikke skal underskride 30 %, noe som fører til at ventilasjonen i klasserom reduseres ned til ca. 1.5 luftskifter i timen ved lave utetemperaturer. Dette er langt under den luftmengden som tilføres i norske skoler med konvensjonell balansert ventilasjon, som typisk ligger på 7-8 luftskifter i timen. Så lave luftmengder som 1.5 omsetninger fører til at CO₂ nivået i perioder kommer over 2000 ppm.

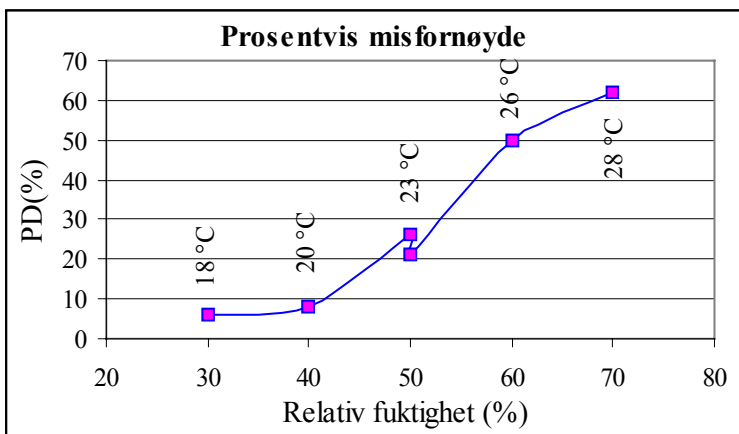
Befuktning av luften er også omstridt, i og med at befuktere kan føre til helseskadelig mikrobiologisk vekst. Dette gjelder særlig befuktning sentralt i ventilasjonsanlegget, hvor rengjøring og kontroll er mer problematisk enn med lokale befuktere.



Figur 2: Sammenheng mellom relativ fuktighet og graden av ulike problemer, \2\.

Det er i fremtiden nødvendig med en klargjøring om hvorvidt reduserte luftmengder om vinteren er akseptabelt mht. luftkvalitet. Det er også nødvendig med en klargjøring om det bør settes krav til en nedre relativ fuktighet.

Med hensyn til luftfuktighet er det også nødvendig med en kommentar til Prof. Fanger's "ordtak" \4\ : "Luften skal serveres som champagne, i riktige mengder, kald og tørr". Figur 3 viser forsøk som er utført ved Danmarks Tekniske Universitet på sammenhengen mellom opplevd luftkvalitet (antall misfornøyde) og relativ fuktighet og temperatur. Som man ser av figuren oppleves luftkvaliteten som bedre ved lavere relativ fuktighet, men det er ikke gjort forsøk for lavere relativ fuktighet enn 30 %. Man kan ikke utfra disse forsøkene dra den konklusjonen at luftkvaliteten blir bedre med ennå lavere relativ fuktighet (lavere enn 30 %). Figuren viser dessuten at reduksjonen i antall misfornøyde flater ut, og det er liten forskjell mellom 40 % og 30 % relativ fuktighet. Et problem med disse forsøkene er at man har endret både relativ fuktighet og temperatur samtidig, se figur 3. Man vet derfor ikke om dårligere opplevd luftkvalitet er forårsaket av høyere temperatur eller høyere luftfuktighet (eller en kombinasjon).



Figur 3 Sammenheng mellom temperatur, relativ fuktighet og opplevd luftkvalitet: Basert på forsøk utført av Fang et. al. \5, 6\.

Innetemperatur

Innetemperaturen er en av de viktigste parametrene for inneklimate i et lokale. Den er derfor også mye brukt for styring av luftmengdene i hybrid ventilerte bygg. Ren styring av luftmengder etter innetemperaturen er dog uvanlig, da dette ville føre til lave (eller ingen) luftmengder i perioder med lite kjølebehov, med tilhørende dårlig luftkvalitet. En mulig løsning på dette er å sette en minimumsluftmengde når det ikke er behov for kjøling i lokalet. En annen mye brukt løsning, som også brukes i mekaniske VAV-anlegg, er å styre anlegget etter både CO₂ og romtemperaturen. Dette gjør at både akseptabel termisk komfort og luftkvalitet kan opprettholdes til ethvert tidspunkt. Ved styring av luftmengder etter romtemperaturen er det viktig at dette samkjøres med styringen av oppvarmingssystemet. Det bør være flere grader dødband mellom settpunktet for oppvarmingssystemet (eks. 20 °C) og settpunktet for ventilasjonssystemet (eks. 24 °C). Slik unngår man at oppvarmingssystemet og ventilasjonssystemet (her som kjøleanlegg) ikke kjører mot hverandre, med tilhørende sløsing av energi. Et dødband på 3-5 K fører også til at man får utnyttet byggets varmelagringsevne mye bedre. Romtemperaturen brukes i tillegg ofte ved styring av nattkjølingsstrategier (nattventilering). En mulighet er at nattkjølingsstrategien startes når en viss romtemperatur overskrides dagtid. En annen mulighet (kanskje bedre) er at nattkjøling startes hvis midlere romtemperatur i arbeidstiden overskrider en viss grense (eks. 25 °C). Nattkjølingsstrategier kan også styres etter andre variable som utetemperatur, veggtemperaturer i kombinasjon med innetemperaturen.

Overflate-/veggtemperatur

Overflatetemperaturer (også kalt strålingstemperaturer) blir ofte brukt indirekte til styring av luftmengder, ved at operativ temperatur⁴ blir målt isteden for romlufttemperaturen.

Veggtemperaturen, dvs. temperaturen noen centimeter inn i veggen, kan være en aktuell parameter for å styre både luftmengder og oppvarmingssystemer. Veggtemperaturen vil respondere tregere (avhengig av termisk tyngde) enn romlufttemperaturen på termiske forandringer i et rom. Veggtemperaturen kan derfor være gunstig å styre etter i tilfeller der man ønsker å utnytte varmelagringsevnen i bygget, eller lagringsevnen til spesielle bygningselementer (for eksempel dekkelementer). Veggtemperaturen kan følgelig være aktuell ved styring av gulvvarmesystemer eller styring av luftmengder ved nattkjølingsstrategier.

Utetemperatur

Utetemperaturen er en vanlig variabel å styre både luftmengder og oppvarmingssystem etter i hybrid ventilerte bygg. I tillegg er det blitt vanlig å styre tilluftstemperaturen etter utetemperaturen, såkalt utekompensert tilluftstemperatur, noe som også vanlig i konvensjonelle ventilasjonsanlegg.

I de byggene hvor man etterstreber å holde relativ fuktighet over 20-30 % (den "svenske modellen"), blir ofte luftmengdene styrt etter utetemperaturen. Dette gjøres siden absolutt fuktighet i uteluften er en tilnærmet funksjon av utetemperaturen, og at relativ fuktighet inne er en tilnærmet funksjon av absolutt fuktighet ute.

Et eksempel på en hybrid ventilert skole hvor luftmengdene skal styres etter utetemperaturen er pilotprosjektet Kvernhuset ungdomsskole i Fredrikstad (under planlegging).

En annen måte å styre luftmengdene indirekte etter utetemperaturen på, er ved å ha CO₂ settpunktet (ved styring etter CO₂) utetemperaturkompensert. Dette betyr at man tillater høyere CO₂ verdier ved lave utetemperaturen enn ved høyere utetemperaturen. Dette kan for eksempel

⁴ Operativ temperatur kan ved normale innetemperaturer og lufthastigheter beregnes til midlet av romlufttemperaturen og strålingstemperaturen.

gjøres som ved Jaer skole (se art. 2) der man tillater 1500 ppm ved temperaturer under $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, men holder 1000 ppm for utetemperaturer over $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tilstedeværelse

Tilstedeværelsessensorer som tidligere i større grad har blitt brukt til styring av belysning, kan også brukes til styring av luftmengder i hybrid ventilerte bygg. Det er også til en viss grad mulig å styre oppvarmingssystemet etter tilstedeværelse, men dette kan være mer problematisk på grunn av termisk treghet.

Ved styring av luftmengder etter tilstedeværelse vil man ofte ha en minste luftmengde bestemt utfra emisjoner fra materialer når det ikke er personer i rommet, og en maksimal luftmengde bestemt etter emisjoner + personforurensing når personer er tilstede. En ren tilstedeværelsesstyring av luftmengder vil være egnet der man har relativt god kontroll på hvor mange som oppholder seg i rommet, eksempelvis kontorer. I rom der antallet personer er variabelt, eksempelvis klasserom og auditorier, vil tilstedeværelseskontroll være mindre egnet fordi den maksimale tilførte luftmengden ikke vil være tilpasset den variable personforurensningen. En mulig løsning på dette problemet er å styre både etter tilstedeværelse og CO_2 , selv om dette fører til en dyrere løsning. Styring etter både CO_2 og tilstedeværelse ble vurdert på Mediå barneskole (Grong), men ble funnet for kostbart.

Tidsstyring

Tidsstyring er en enkel og lite kostbar metode for styring av luftmengder, og kan være et alternativ til tilstedeværelseskontroll der man kjenner brukstiden til bygget relativt godt. Det er mindre egnet i rom/bygg der man har fleksible arbeidstider, eller der man har annen aktivitet utenfor vanlig oppholdstid (eks. fritidsaktiviteter på skoler). Tidsstyring blir også ofte kombinert med andre styringsvariable i driftstiden, eks. CO_2 , innetemperatur- eller utetemperaturstyring.

Et vanlig spørsmål som kommer opp ved tidsstyring av ventilasjonsanlegg er hvorvidt ventilasjonsanlegget skal slås helt av utenfor normal driftstid, eller om man skal kjøre på reduserte luftmengder (vanligvis halvparten eller $1/3$ av normale luftmengder). Generelt anbefaler de fleste innemiljøeksperter i dag at konvensjonelle balanserte ventilasjonsanlegg ikke slås av, men kjøres på reduserte luftmengder utenfor normal driftstid. Hovedargumentet for å ikke slå av anlegget utenfor normal driftstid, er at lufthastigheter over en viss grense (ca. 0.3 m/s) i kanalene forhindrer mikrobiologisk vekst i ventilasjonsanlegget.

I hybride og naturlige ventilasjonsanlegg hvor det brukes få komponenter, og hvor luftføringsveiene er lett tilgjengelig for inspeksjon, vil det antagelig være mindre (eller eliminert) behov for å kjøre luftmengder utenfor normal driftstid.

I naturlige og hybride ventilasjonsløsninger med ingen eller lav virkningsgrad på varmegjenvinner, vil behovsstyring og tidsstyring av luftmengdene være av stor betydning for energibruken til bygget.

Konstant luftmengde

I motsetning til konvensjonelle mekaniske ventilasjonsanlegg hvor konstant luftmengde er "standard", er dette ennå ikke så vanlig på hybridventilerte bygg. Grunnen til dette er blant annet variable drivkrefter og at det anses som viktigere å behovsstyre luftmengdene i hybride anlegg. I anlegg med konstant luftmengde vil man vanligvis måle lufthastigheten på strategiske steder i luftføringsveiene, og styre åpningsarealer (spjeld, vinduer, ventiler) og eventuelt frekvensstyrte vifter etter dette.

Vindhastighet og vindretning

Vindhastighet og vindretning blir ofte brukt til å styre åpningsarealer i lanterniner og avtrekkstårn, slik at vindkrefter samvirker med termiske oppdriftskrefter. Vindmålinger blir da brukt slik at åpninger på le-side åpnes for å samvirke med termisk oppdrift for å maksimere naturlige drivkrefter. Vindmålinger kan også brukes til å stenge vinduer og andre åpninger ved uvær (store vindhastigheter og slagregn), for å unngå materielle skader og overventilering. Vindhastighetsmålinger blir ofte også brukt for å hindre skader på utvendig solavskjermingsutstyr ved uvær.

4.3 Styring av komponenter i hybrid ventilerte bygg

Et hybrid ventilasjonsanlegg inneholder både komponenter som er vanlige i konvensjonelle mekaniske ventilasjonsanlegg og i naturlige ventilasjonsanlegg. Disse mekaniske komponentene og de passive komponentene (f.eks. vinduer) må samstemmes mot hverandre slik at de ikke motvirker hverandre. Dette kan i praksis være en stor utfordring, og krever en god fysisk forståelse av de komponenter og prosesser (strømningsteknisk og varmetransport) som skal styres.

Typiske passive komponenter som inngår i et hybrid ventilasjonsanlegg er:

- Vinduer inngår vanligvis som en viktig del i hybride ventilasjonsanlegg. De blir ofte manuelt styrt for forsert ventilasjon i perioder med stor belastning (termisk og forurensning). Men kan også være automatisk styrt med åpning og lukking ved hjelp av motorstyring.
- Ventiler/sjalusier/luker; disse fasadekomponentene kan brukes som et alternativ til vindusåpninger. De kan også enten styres manuelt eller ved automatisk motorstyring.
- Dobbelfasader kan brukes til forvarming og distribusjonssystem for tilluft. Åpningsarealer i dobbelfasaden er da vanligvis automatisk mototstyrt (vanskelig tilgjengelig for manuell styring). Lufttilførsel til de enkelte rom fra dobbelfasaden kan enten være manuell eller automatisk motorstyrt.
- Atrier kan som dobbelfasader brukes til forvarming og distribusjon av tilluft, men også for evakuering av brukt luft. Tilluftsåpninger og avtrekksåpninger (f.eks. takluker) i atriet er da vanligvis automatisk motorstyrte, mens åpninger inn til de enkelte rom kan enten være manuelt eller automatisk styrt. .
- Avtrekksåpninger; avtrekksinnretninger som lanterniner, avtrekkstårn, takluker og lignende vil vanligvis være automatisk styrt da de i de fleste tilfeller er vanskelig tilgjengelig for manuell kontroll. Disse kan også inneholde ulike former for spjeld som er automatisk styrte. Styring av avtrekksåpninger må samkjøres med vifter (vanligvis frekvensstyrte) for å utnytte naturlige drivkrefter maksimalt. Det er også eksempler på manuell styring av avtrekksåpninger, slik det gjøres i noen av de naturlig ventilerte skolene i Sverige \3\. Det er også mulig å ha manuell motorstyring av avtrekksåpninger.

Typiske mekaniske komponenter i et hybrid anlegg kan være:

- Vifter; vifter i hybride ventiasjonsanlegg vil ofte være store saktegående aksialvifter. For å utnytte naturlige drivkrefter vil de ofte være frekvensstyrte.
- Varmebatterier; i kaldt klima som det norske vil det ofte være behov for forvarming av luften. Varmebatterier styres vanligvis etter tilluftstemperatur. Denne tillutstemperaturen kan ofte være utetemperaturkompensert som nevnt ovenfor. Hvis det også er

varmegjenvinner i ventilasjonssystemet må denne sekvensstyres med varmebatteriet, for å utnytte hele kapasiteten til gjenvinneren.

- Varmegjenvinnere; der det ikke er brukt stram behovsstyring av luftmengdene vil det vanligvis være behov for varmegjenvinning for at ikke energibehovet til oppvarming av ventilasjonsluften skal bli for høyt. Den mest aktuelle gjenvinner-typen i hybride anlegg er batterigjenvinner, som ikke krever at tillufts- og avtrekks luft føres sammen, noe som vanligvis er problematisk i hybride anlegg. Varmegjenvinnere vil vanligvis være styrt etter tilluftstemperaturen.
- Kjølebatterier; bruk av kjølebatteri(er) er aktuelt i tilfeller man ikke greier å redusere varmelastene eller hvor passive teknikker (kulverter, nattkjøling) ikke er tilstrekkelige eller aktuelle for å unngå overoppvarming. Kjølebatterier styres vanligvis etter tilluftstemperaturen, som kan være utetemperaturkompensert.

4.4 Konklusjoner

Det er rimelig sikkert at vi i fremtiden vil se ventilasjons- og klimatiseringsanlegg med mer avanserte styringssystemer. Disse anleggene vil i større grad bli optimert med hensyn på luftkvalitet, termisk komfort og lavt energiforbruk. Mer naturlige og passive løsninger som blant annet tar hensyn til byggets varmelagringssevne og stram behovsstyring vil også kreve mer avanserte styringssystemer.

Foreløpige erfaringer fra hybrid ventilerte bygg i Norge viser at styringssystemene (SD-anleggene) sjelden virker helt etter intensjonen, og at de har en lang innkjøringstid. Siden hybrid ventilerte bygg ofte er avhengig av avanserte styringssystemer for å bli et alternativ til konvensjonell klimatisering, vil styringssystemene måtte bli både mer robuste og stabile enn de er i dag. Med den raske utviklingen det er på byggautomasjon området, vil dette antagelig kunne skje i nær fremtid.

Med hensyn til styring og kontroll av inneklimate er det behov for klargjøring på en del sentrale områder :

- Skal det tillates høyere CO₂ nivåer i naturlige og hybrid ventilerte bygg?
- Skal det settes krav til en nedre grense for relativ fuktighet, eksempelvis 20 %?
- Relatert til de to punktene over, skal det i vinterhalvåret tillates lavere luftmengder i naturlige og hybride ventilasjonsanlegg, for å unngå lav relativ fuktighet, trekkproblemer og høyt energiforbruk?
- Skal man tillate at ventilasjonsanlegget blir slått helt av utenfor normal driftstid, eller bør man kreve at det går en redusert luftmengde slik man anbefaler for konvensjonelle ventilasjonsanlegg?

Dette er meget sentrale spørsmål vedrørende hvor kostnadseffektive, energieffektive og miljøvennlige hybrid ventilerte bygg kan bli i fremtiden.

4.5 Referanser

1. HYBRID VENTILATION, "State-of-the-Art report", IEA Annex 35 Hybvent, Editors : A. Delsante & T.A.Vik, 1999.
2. S.O.Hanssen, Kap. 4 i boken; "Enøk i Bygninger", Universitetsforlaget, 1996.
3. T. Andersson, H.Gillbro; "Naturlig ventilasjon i svenske skoler", Norsk VVS nr. 2/97.
4. Fanger P.O.; "Indeklima i det 21. århundrede – Stræben efter det optimale", Norsk VVS nr. 8/2000.
5. Fang L., Clausen G., Fanger P.O., "Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality", Indoor Air, 8, pp.80-90, 1998.
6. Fang L., Wargoeki P, Witterseh T., Clausen G., Fanger P.O., "Field study on the impact of temperature, humidity and ventilation on perceived air quality", Proceedings of Indoor Air 99', Vol. 2, pp.107-112, 1999.

5 Artikkel 4: Prosjekteringsverktøy for hybrid ventilasjon

Design av hybrid ventilerte bygg som skal tilfredsstillende både termisk komfort, god luftkvalitet og lavt energiforbruk, forutsetter at man har tilgjengelig analyse- og simuleringsverktøy som kan predikere ytelsen til ulike løsninger. I denne artikkelen vil det bli sett på hvilke analyse- og simuleringsverktøy som finnes for prosjektering av hybrid ventilasjon. Sammenlignet med rent mekaniske ventilasjonssystemer er hybrid ventilasjon generelt mer følsom for ulike klimatiske forhold og brukeratferd. Det er derfor et større behov for avanserte simuleringer ved design av hybrid ventilasjon.

5.1 Behov for analyseverktøy og modeller

Et prosjekterings- eller analyseverktøy for hybrid ventilasjon bør kunne bidra til følgende:

- Dimensjonere ventilasjonssystemet, både naturlige ventilasjonsåpninger som vinduer, ventiler, o.l. og mekaniske komponenter som vifter, kanaler, spjeld, etc.
- Simulere luftstrømning for hele sonen og gjennom ulike åpninger til ulike tider og for ulike klimatiske forhold (vind, temperatur, sol)
- Simulere termiske forhold som operativ temperatur og PPD-indeks og luftkvalitet som CO₂-nivå og relativ fuktighet.
- Simulere aktuelle styringssystemer og kontrollstrategier
- Simulere energi- og effektbehov for hver sone og for hele bygget

Andre forhold som også er ønskelig å gi svar på er utslipp til luft pga. energiproduksjon, økonomiske lønnsomhetsberegninger, og livssyklus analyser. Dette kan imidlertid utføres med separate beregningsverktøyer uten nevneverdig ulemper.

For å kunne utføre dimensjonering og simuleringer som nevnt over, må vi ha fysiske modeller for en rekke strømningstekniske og termiske prosesser, hvor viktige forhold er:

- Luftstrømning gjennom store åpninger i fasaden utsatt for både vind- og temperaturkrefter
- Modeller for beregning av trykkfordeling over bygningens klimaskjerm induisert av vind og temperatur.
- Luftstrømning gjennom utettheter og mindre åpninger
- Luftstrømning mellom rom/soner (dører, åpninger)
- Luftstrømning i kanaler og andre luftføringsveier
- Strømningstekniske og termiske modeller for luftbehandlingskomponenter (vifter, spjeld, kjøle- varmebatterier, varmegjenvinnere, etc.)
- Luftstrømningsmønster og temperaturfordeling i rom/soner
- Interaksjon mellom luftstrømning og termiske forhold

Det finnes en hel rekke metoder av ulik detaljeringsgrad som innehar modeller for dette i større eller mindre grad. I det etterfølgende er ulike metoder og modeller omhandlet med hensyn til hvor brukbare de er i en praktisk prosjektering av en hybrid ventilert bygning.

5.2 Aktuelle modeller

Metoder for å beregne luftstrømning i bygninger varierer mye i kompleksitet fra enkle analytiske metoder som fint kan gjøres ved håndregning, til meget avanserte og komplekse CFD-simuleringer som krever betydelig datakraft for å kunne gjennomføres.

Forenklede analytiske metoder

Forenklede analytiske modeller er ofte basert på Bernoullies ligning, som på sin enkleste form sier at summen av det statiske trykket og det dynamiske trykket er konstant:

$$\overbrace{P_{stat}}^{\text{Statisk trykk}} + \overbrace{\rho \frac{U^2}{2}}^{\text{Dynamisk trykk}} = \text{konstant} \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

U er lufthastigheten og ρ er tettheten til lufta. Ved å kjenne trykkforskjellen over en åpning kan vi ved hjelp av ligning (1) beregne hastigheten gjennom åpningen, og dermed også luftmengden eller massestrømmen gjennom åpningen⁵. I et helt naturlig tilfelle uten vifter vil trykkforskjeller over åpninger være forårsaket av vind og temperaturforskjeller. Siden vindkrefter de fleste steder er meget ustabile, blir naturlig ventilerte bygg i mange tilfeller dimensjonert kun for termisk oppdrift. Vindpåvirkningen blir løst ved at inntak- og avkaståpninger blir utført slik at påvirkningen er liten, eller slik at vindkreftene samvirker med de termiske oppdriftskreftene (for eksempel ved bruk av værhaner). Trykkforskjellen dannet av at den varme luften inne i bygget er lettere enn den kalde luften ute ($\rho_e > \rho_i$), kan beregnes av:

$$\Delta P = g \cdot h (\rho_{ext} - \rho_i) \approx 9.81 \cdot h \left(\frac{353}{T_{ext}} - \frac{353}{T_i} \right) \quad (\text{Pa}) \quad (2)$$

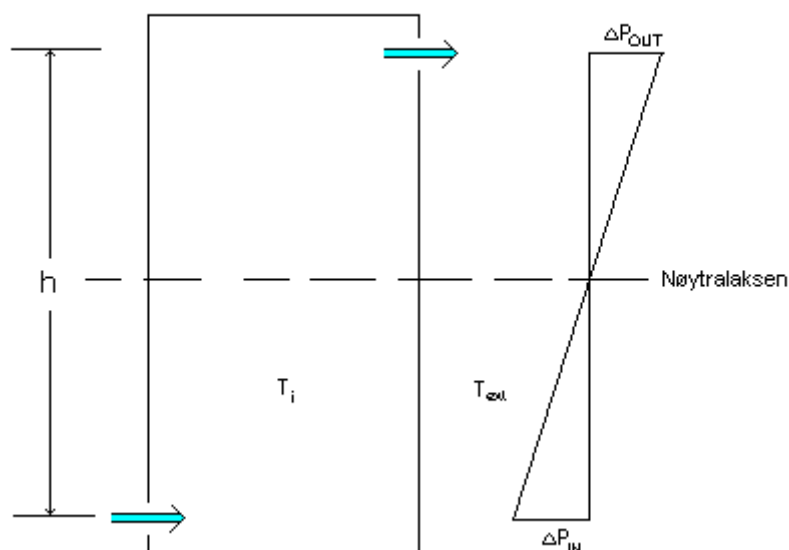
Der temperaturene (T_i og T_{ext}) må angis i absolutt temperatur (Kelvin). Denne trykkforskjellen vil føre til at det strømmer kald luft inn i den nederste åpningen og varm luft ut i den øvre åpningen, se figur 1. Hvis det er like store åpninger oppe og nede, vil nøytralaksen, dvs. høyden der trykket ute og inne er null, være midt mellom åpningene, og trykkforskjellen over begge åpninger vil være lik halvparten av (2). Lufthastighet (U_{inn}) og luftmengde (V_{inn}) inn gjennom den nederste åpningen kan da beregnes ved å kombinere ligning (1) og (2):

$$U_{inn} = \sqrt{g \cdot h \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_i} \right)} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

$$\dot{V}_{inn} = \alpha \cdot A \cdot U_{inn} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4)$$

A er åpningsarealet og α kontraksjonskoeffisienten. Perfekt avrundede åpninger har $\alpha = 1.0$, mens skarpkantede åpninger har $\alpha \approx 0.6$.

⁵ Ligning (1) gjelder egentlig bare for større åpninger hvor det er fullt utviklet turbulent strømming, og gjelder ikke for sprekker og mindre åpninger i bygningskroppen.



Figur 1 Modell for en enkel sone med uniform temperatur og like store åpninger oppe og nede.

En slik enkel modell av et naturlig ventilert bygg kan brukes til å grovdimensjonere nødvendige åpningsarealer for å få en ønsket luftmengde ved en gitt inne- og utetemperatur. En slik modell kan også enkelt modifiseres til å ta hensyn til ulike åpningsarealer oppe og nede, og den kan modifiseres til å ta hensyn til lineære temperaturograder i bygget/rommet, og for noen enkle tilfeller også vindpåvirkning \1\ . Forenklete analytiske modeller finnes også for andre enkle tilfeller:

- Balansert luftstrømning i store åpninger (f.eks. vinduer eller dører), der både temperaturkrefter og vindpåvirkning tas hensyn til \2\ . Med balansert luftstrømning menes at luftstrømmen inn av åpningen er like stor som luftstrømmen ut av åpningen.
- En-sone bygninger med to åpninger, hvor både termikk og vind påvirker og innnetemperaturen er ukjent. Solbelastning og varmetap gjennom bygningskroppen kan også tas hensyn til (stasjonær betraktning) \3, 4\ .
- Analytiske løsninger finnes også for noen enkle multisone bygninger \5, 6\ .

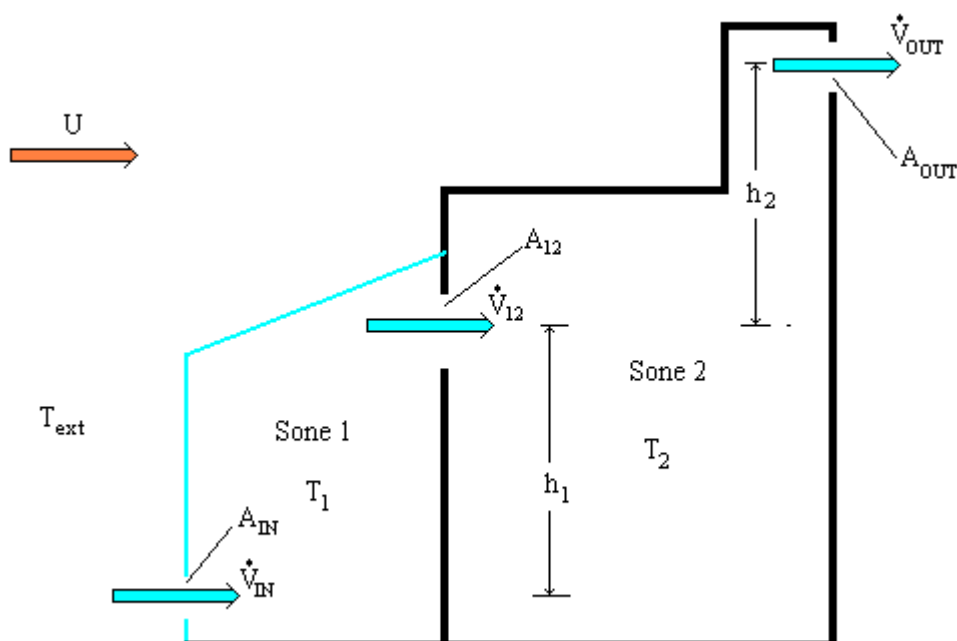
Lufthastighet og temperaturfordeling i luftstråler, varmluftstrømmer over varmekilder (plumer) og grensesjiktstrømning (for eksempel kaldras langs vinduer) kan også beregnes med enkle analytiske uttrykk. Et sammendrag av slike modeller er gitt i \1\ .

Nettverksmodeller

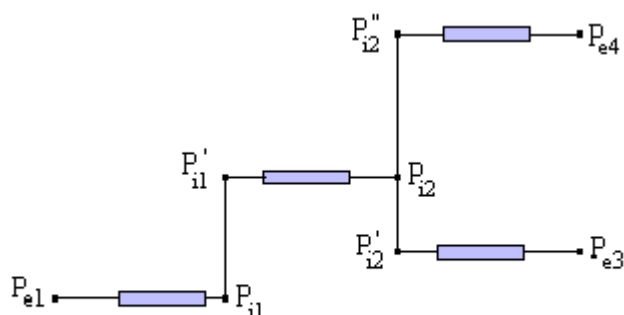
Steget videre fra enkle analytiske metoder er å gå over til mer generelle modeller for komplekse multisonebygg, der man tar hensyn til både vind og temperaturkrefter, og eventuelt også vifter. Figur 2 er et eksempel på et slikt naturlig ventilert multisonebygg. I figur 3 er det vist hvordan et slikt bygg kan representeres ved en nettverksmodell. Ut fra figur 3 kan det enkelt settes opp et ligningssystem (ikke lineært), på grunnlag av samme teori som vist i forrige avsnitt (analytiske metoder)⁶ . I ligningssystemet blir det her to ukjente trykk, trykket i sone 1 nede ved åpning 1, og trykket i sone 2 ved åpning 2. Alle de utvendige trykkene er kjent, og de andre innvendige trykkene kan utledes av P_{i1} og P_{i2} . Dette ligningssystemet er relativt enkelt å legge inn i et regneark, og iterere manuelt (trykkene P_{i1} og P_{i2}) til luftmassebalansen for begge

⁶ Ligningssystemet for dette bygget er utledet og presentert i ref. \1\ .

soner er oppfylt. For større nettverksmodeller/komplekse bygg, med mange ukjente trykk og mange ligninger må man bruke mer sofistikerte numeriske løsningsmetoder. Den mest brukte måten numeriske metoden for å løse slike ikke lineære ligningssystemer er Newton-Raphson. Det finnes en rekke programmer som løser slike nettverksproblemer. Eksempler er BREEZE \7), COMIS \8), CONTAM \9, 10) og AIOLOS \11). Programmet COMIS er antagelig det mest utbredte programmet for simulering og design av naturlig og hybrid ventilerte bygg pr. i dag. Dette programmet inneholder også modeller for å regne på luftstrømning i kanaler, og trykkøkninger over vifter (mulig å legge inn viftekarakteristikker). Det har imidlertid en noe høy brukerterskel, og kan derfor være vanskelig tungt å bruke for praktiserende rådgivere og arkitekter.



Figur 2 Enkel multisonemodell for et naturlig ventilert bygg.

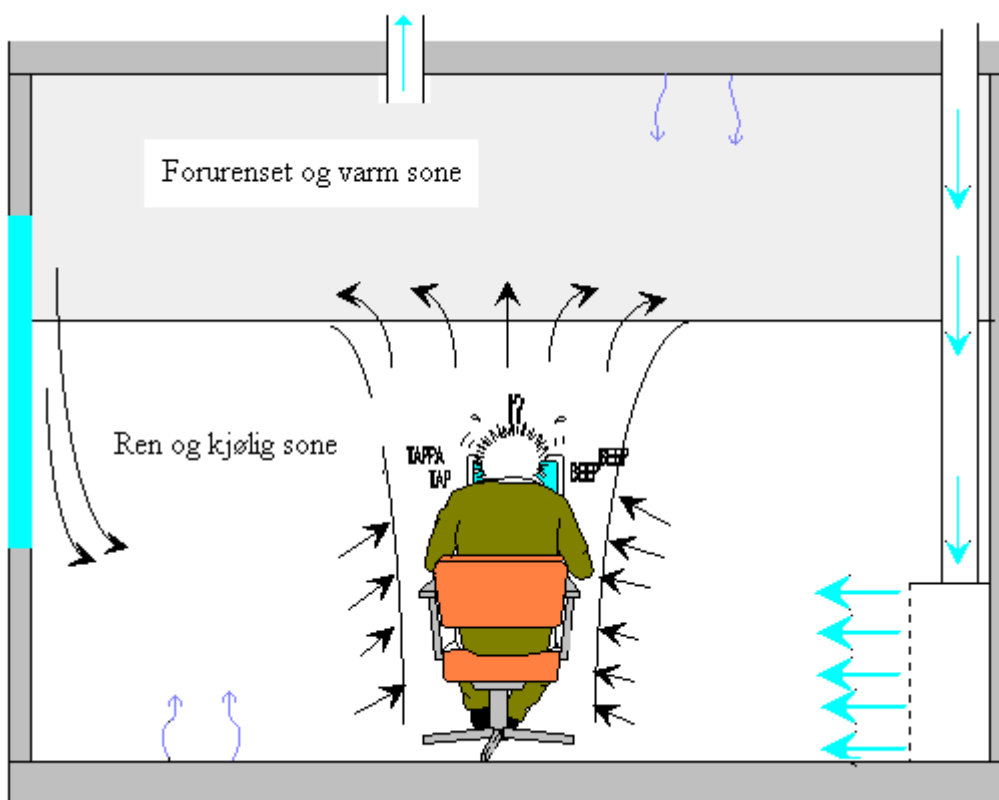


Figur 3 Nettverksmodell av bygget i figur 2.

Sjiktungs- og sonemodeller

I tilfeller der det er store gradienter i temperatur og forurensing i et rom, vil programmer og modeller som antar full omrøring (uniform fordeling) gi tvilsomme resultater. De fleste multisoneluftstrømningsmodeller og energisimuleringsprogrammer antar full omrøring.

Tilfeller der betydelige gradienter kan oppstå er fortreningsventilerte rom, lokaler med stor takhøyde og rom med naturlig ventilasjon (lufttilførsel nede og avtrekk oppe). Slike problemer kan behandles av CFD-modeller (omtales i neste avsnitt), men kan også forenklet modelleres med såkalte sjiktungs- eller romsonemodeller. Den enkleste romsone-modellen er to-sone modellen utviklet for fortreningsventilerte rom, hvor man antar en nedre ren og kjøling sone og en øvre forurenset og varm sone. En slik modell er skjematisk vist i figur 4. Grunnen til at varm og forurenset luft samler seg ved himlingen er at varme kilder i rommet som personer, PCer, panelovner, etc., inducerer varmluftstrømmer (plumer) som fører varme og forurensning mot himlingen. Hvis det i tillegg er et ventilasjonssystem som tilfører ren og kjølig luft i den nedre sonen, og trekker luft av i den øvre sonen, får du en forurensings- og temperaturfordeling som indikert i figur 4. Utfra masse- og varmebalanse for de to sonene er det mulig å sette opp uttrykk for temperatur- og forurensingsdistribusjon i rommet [12]. I slike modeller inngår undermodeller for varmluftstrømmer over varmekilder i rommet (plumer), grensesjiktmodeller (kaldras), strålingsutveksling mellom øvre og nedre sone og varmetap gjennom vegger, tak og gulv.



Figur 4 Sjiktungsmodell for fortreningsventilerte rom

Det er også utviklet mer avanserte romsone-modeller som deler opp rommet i mange soner (både vertikal og horisontal oppdeling) hvor det antas full omrøring i hver sone [13, 14]. Disse modellene er selvsagt mer kompliserte enn to-sone modellen, men har vært brukt med godt resultat for å forutsi vertikale temperaturgradienter i glassgårder [13].

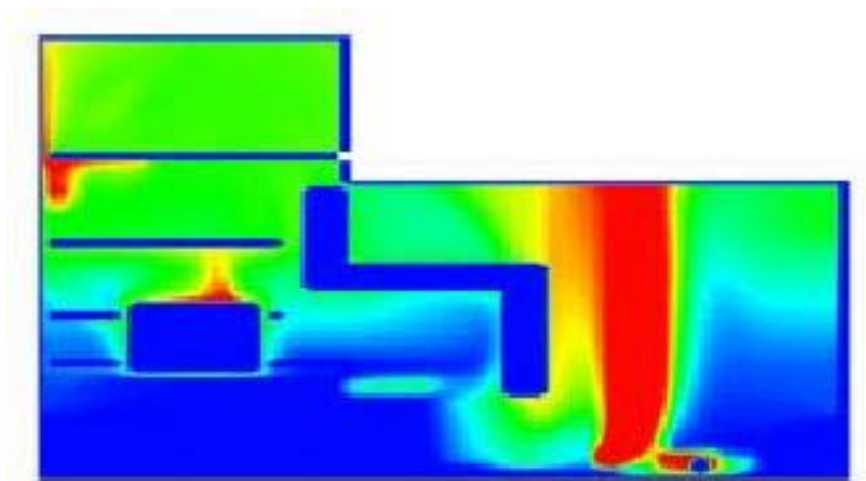
CFD-modeller

CFD står for Computational Fluid Dynamics, og er det mest avanserte verktøyet for analyse av strømningstekniske- og varmetekniske problemer. CFD-modeller kan brukes til å forutsi temperatur-, forurensings- og lufthastighets mønsteret i et rom med valgbar oppløsning. Dette kan gjøres i både to- og tre dimensjoner, og det kan også regnes transient (endringer over tid). CFD-modeller er en numeriske metode som deler det valgte domene (for eksempel et rom) opp

i små volumer (endelig differens metoder) eller elementer (element metoden). De generelle lovene for transport og bevaring av impuls, varme(energi), masse og turbulens settes opp for hvert kontrollvolum eller element. For en tre-dimensjonal simulering av et rom blir volumet typisk delt opp i 30 000 til 50 000 kontrollvolumer \6\ . For å løse et så stort sett av ligninger (flere hundre tusen) er det behov for stor datakraft og stor lagringskapasitet. Nødvendige inndata for en CFD-beregning vil være: lokalisering av åpninger, masse strømmer inn og ut av åpninger (må vanligvis spesifiseres), turbulensnivå i tilluftsventiler og diffusorer, termiske grensebetingelser (temperatur, varmefluks), varmekilder (plassering, geometri og styrke), forurensingskilder (plassering, geometri og styrke), størrelse og plassering av møblering/innredning, med mer. Dette betyr at det er relativt mye inndata som må angis av brukeren. Det er også nødvendig med god forståelse av fysikken i problemet for å få realistiske resultater fra CFD-koder(programmer). Andre ulemper med CFD er \6\:

1. Pga. av stort behov for datakraft og stor lagringskapasitet er CFD-analyser ofte begrenset til stasjonære forhold, to-dimensjonale tilfeller, og enkelt-soner analyse. Det er også meget problematisk å presentere det enorme antallet resultater fra en tredimensjonal og transient analyse.
2. Problemer med å regne på hastighetsfelter generert av naturlig ventilasjon og infiltrasjon.
3. Problemer med å spesifisere og behandle varmetransport betingelser på grensesjiktene (stråling, konveksjon og varmeledning).
4. Noen CFD-koder(programmer) har problemer med å løse problemer hvor naturlig konveksjon er dominerende(eks. fortrenningsventilerte rom)

CFD-koder eller programmer blir i dag stort sett brukt av spesialiserte konsulenter og forskningsinstitusjoner, og virker for komplekst og dyrt til at den gjennomsnittlige rådgiver eller arkitekt skal kunne bruke det. CFD kan imidlertid være et meget kraftig verktøy for design av store rom som glassgårder, kjøpesenter, flyterminaler, konsertsaler, og lignende. Eksempler på kommersielle CFD-programmer som er spesialtilpasset bygningsproblemer er FLOVENT \15\ and VORTEX-2 \16\.



Figur 5 CFD-simulering av temperaturfordelingen i ett naturlig ventilert bygg.

Integrasjon mellom termiske modeller og luftstrømningsmodeller

Oppdriftskrefter i hybrid ventilerte bygg er drevet av lufttemperaturer i bygget, som igjen er avhengig av ventilasjonsluftmengdene. På bakgrunn av dette ville det være naturlig å integrere modeller for luftstrømning og termiske modeller (vanligvis kalt energisimuleringsprogrammer). De som passer best til integrasjon i så måte er multisoner luftstrømningsmodeller og termiske multisoner simuleringsprogrammer (eks. TRNSYS, ESP-r, DOE 2, SCIAQ, etc.). De fleste termiske modeller og luftstrømningsmodeller er basert på full

omrøring, noe som sjelden er tilfelle i naturlig og hybrid ventilerte bygg, eller i fortrenningsventilerte rom. Et naturlig neste utviklingstrinn for en integrert modell er derfor også å implementere en modell for temperaturstratifisering, f.eks. en to-sone modell som beskrevet ovenfor.

En slik integrert modell som inneholder en multisone luftstrømningsmodell, en termisk multisonemodell, og en enkel romsone modell, ville kunne bli et meget kraftig verktøy for simulering og design av hybrid ventilerte bygg. Faren ved en slik integrert modell er at den blir for komplisert og at det er nødvendig å sette så mange inndata, at praktiserende rådgivere og arkitekter ville funnet det for tungvint og kostbart. Bruk av moderne programmeringsverktøyer og vektlegging av brukergrensesnitt vil kunne avhjelpe dette noe. Pr. i dag finnes det ingen verktøy som integrerer alle disse tre typene modeller, selv om det er arbeid på gang for å koble sammen TRNSYS (termisk) og COMIS (luftstrømning).

5.3 Konklusjoner og anbefalinger

- For dimensjonering og simulering av hybride ventilasjonsløsninger virker en kombinasjon av en multisone luftstrømningsmodell (eks. COMIS) og en termisk simuleringsmodell (eks. TRNSYS) som det mest aktuelle. Pr. i dag finnes det ikke noen integrert modell eller program som gjør dette, og man må derfor mate resultater fra den termiske modellen inn i luftstrømningsmodellen og visa versa.
- I tilfeller der det oppstår vertikale temperatur- og forurensingsgradienter, for eksempel i fortrenningsventilerte rom, kan det være fornuftige å koble en enkel sjiktningmodell (eks. to-sonemodell) til luftstrømningsmodeller og termiske modeller. Pr. i dag er de fleste luftstrømningsmodeller og termiske modeller basert på full omrøring (uniform temperatur).
- Problemet med verktøy som COMIS og TRNSYS er at brukerterskelen er høy, og det kreves en viss spesialisering for å bruke slike verktøy med sikkerhet.
- Ved spesielle prosjekter som glassgårder, svømmehaller med store glassflater, kjøpesenter, og lignende kan bruk av CFD-programmer være aktuelt. Bruk av CFD-verktøyer krever også betydelig kompetanse og erfaring for å få fram realistiske og pålitelige resultater.
- Enkle analytiske uttrykk som kan brukes ved håndregning, eller legges inn i regneark, egner seg godt til forprosjekt/skisseprosjekt fasen. I denne fasen er det behov for enkle verktøy som kan grovdimensjonere for eksempel nødvendige åpningsarealer.

5.4 Referanser

1. Dokka TH, ” Naturlig ventilasjon; Passive løsninger for klimatisering av bygg; konsepter, beregningsmodeller og prosjekteringseksempel”, Arbeidsrapport nr. 6/99, Inst. for IØT, NTNU, 1999.
2. CIBSE: “Natural Ventilation in Non-domestic Buildings: CIBSE Applications Manual”, AM10:1997, The Chartered Institute of Building Services Engineering, London, 1997.
3. Li, Y. and Delsante, A.: “On natural ventilation of a building with two openings”, *Proc. 19th Annual AIVC Conference, “Ventilation Technologies in Urban Areas”, Oslo, Norway, 28–30 September 1998*, pp. 189–196, 1998.
4. Linden, P. F., Lane-Serff, G. F. and Smeed, D. A.: “Emptying filling boxes: the fluidmechanics of natural ventilation”, *J. Fluid Mech.*, **212**, 309–335, 1990.
5. Li, Y., Delsante, A. and Symons, J.: “Upward flows in a multi-zone building with subfloor plenums and solar chimneys”. *Proc. Roomvent '98, Sweden, June 14-17, 1998*.
6. Liddament M.; “Energy efficient ventilation”, Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), 1996

7. BRE: "BREEZE 6.0 User Manual", Building Research Establishment, Watford, UK, 1994.
8. Feustel, H. E. and Rayner-Hooson, A.: "COMIS Fundamentals", LBL-28560/UC-350, Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, May 1990.
9. Walton: "CONTAM96 : a multi-zone airflow and contaminant dispersal model with a graphical user interface", Proceedings 17th AIVC Conference, Volume 1, 1996, pp. 353-355.
10. Haghghat, F. and Megri, A. C.: "A comprehensive validation of two airflow models: COMIS and CONTAM", *Indoor Air*, 6, 278–288, 1996.
11. Dascalaki, E. and Santamouris, M.: "The AIOLOS Software: Chapter 8, Natural Ventilation of Buildings – A Design Handbook", F. Allard (ed.), James & James Ltd, London, UK, 1998.
12. Dokka TH., "Modelling of Indoor Air Quality in residential and commercial buildings", Department of Industrial Economics and Industrial Management, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral thesis, Trondheim, August 2000
13. Togari et al.: "A simplified model for predicting vertical temperature distribution in large spaces" *ASHRAE Transactions*, Vol.99, Part 1. pp. 84-99.
14. Inard et al., "Use of zonal model for prediction of air temperature distribution in large enclosures" *Proceedings ROOMVENT '96*, Yokohama, Japan, Volume 2, pp. 177
15. FLOVENT, "A commercial CFD program for modelling indoor air flow", from Flometrics Ltd, UK. <http://www.flovent.com/>
16. VORTEX-2. "A commercial CFD program for modelling indoor air flow", from Flowsolve Ltd, UK. <http://ourworld.compuserve.com/>