

Forord

Nærværende rapport afslutter EFP97-projektet ”Naturlig ventilation med varmegenvinding og solassistance – forprojekt”, journal nr. 1213/98-0025 finansieret af Energiministeriets Energi-ForskningsProgram.

Projektets formål var at foretage indledende undersøgelser af muligheden for at etablere naturlig ventilation med varmegenvinding, hvor varmegenvindingsenheden består af koblete væskebatterier med et kølemiddel som varmetransporterende medium. Desuden at undersøge muligheden for supplerende solassistance i form af forvarmning af friskluften i en luftsolfanger/solvæg og forøgelse af drivtrykket ved hjælp af en luftsolfanger/solskorsten.

Deltagere i projektet:

Trine Dalsgaard Jacobsen, civ.ing., Energi Vision
Søren Østergaard Jensen, civ.ing., Energi Vision
Claus Schøn Poulsen, civ.ing., Køle- og Varmepumpeteknik
Hans Madsbøll, cand.scient., Køle- og Varmepumpeteknik

Følgegruppe:

Nilan A/S: Alex Dam
Gilling Byøkologi: Aase Gilling
Vejle Kommune: Ole Due

Tak til:

Karl Terpager Andersen, SBI for rådgivning omkring drivtryk
Elia Zaccheddu, Sulzer Infra, CH for fremvisning af SaveHeat prototypen

Naturlig ventilation med varmegenvinding og solassistance – forundersøgelser
1. udgave, 1. oplag 1999
© Teknologisk Institut 1999
Energidivisionen

ISBN: 87-7756-537-1

Indholdsfortegnelse

Summary	3
Nomenklaturliste	4
1. Indledning	5
1.1. Tidligere danske erfaringer	5
1.1.1. Parameterundersøgelser	6
1.1.2. Prototype	7
1.1.3. Konklusion	8
1.2. Nyt koncept	8
1.3. Sideløbende internationale projekter	10
1.3.1. NatVent	10
1.3.2. SaveHeat	13
1.3.3. Naturlig ventilation på Grong Skole i Norge	16
2. Termisk drivtryk	19
2.1. Drivtryk i det undersøgte koncept	20
3. Varmevexlerkreds	23
3.1. Undersøgelse af den opnåelige varmegenvindingsgrad	24
3.1.1. Systemudformning i programmet	24
3.1.2. Modellering	25
3.1.3. Resultater	26
3.1.4. Resultatanalyse	27
4. Luftkreds	29
4.1. Indtag	29
4.2. Luftsolfanger/solvæg til forvarmning af friskluft	30
4.3. Eftervarmning af friskluft	32
4.4. Afkast	33
4.4.1. Afkast, der neutraliserer vindeffekter	33
4.4.2. Afkast, der udnytter vindkræfter til at skabe drivtryk	34
4.5. Solskorstene	38
4.6. Styring af systemet	41
5. Sammenligning med mekanisk ventilation	45
5.1. Energiforbrug ved forskellige ventilationsprincipper	45
5.2. Økonomi	46
5.3. Sammenfatning	46
6. Solvent98	47
6.1. Beregningsmodel	48
6.2. Beregningsforudsætninger	49
6.2.1. Det benyttede ligningssæt	50
6.3. Programmets opbygning	51
6.3.1. Bygning	52
6.3.2. Kanaler	53
6.3.3. Fittings	54

6.3.4.	Modstande	55
6.3.5.	Solfanger	56
6.3.6.	Vind	57
6.3.7.	Solvæg – Varmegenvinding	58
6.3.8.	Optimering	59
6.4.	Problemer og videreudvikling.....	60
7.	Sammenfatning	61
8.	Referencer	63
Bilag	EES-beregninger - beregningseksempler	65

Summary

A complete concept for natural ventilation with heat recovery and solar assistance has been investigated. The concept is based on a coupled liquid heat exchanger circuit, which have the advantage that the location of the fresh air intake and the exhaust may be independent. This allows for a larger variety of system designs and further means that the natural driving forces is utilized better.

The investigations have shown that it is possible to design the system in such a way that the necessary air exchange rate may be maintained under nearly all weather conditions. Calculations have shown that it is possible to recover 30-40% of the ventilation heat losses during most of the heating season. The concept not only allows for an arbitrary location of the evaporator and the condenser but makes it further possible to design the systems both as central and decentral systems. The system may also be utilized in buildings with traditional exhaust ventilation in order to make heat recovery possible.

The heat exchanger system uses a refrigerant as heat transporting medium. A refrigerant gives a higher heat transfer than water, and a smaller mass flow rate is necessary resulting in the need of only thin tubes. Natural refrigerants such as propane can be used. The electricity demand of the circulation pump in the system is negligible compared to the recovered energy – the system has a COP around 50.

Calculations have proven that even though the heat recovery rate of the concept is lower than in balanced mechanical ventilation systems with heat recovery, the concept has a lower consumption of primary energy. It is further estimated that the concept is economically competitive with traditional mechanical ventilation systems.

The driving forces in natural ventilation are small compared to mechanical ventilation. It is, therefore, very important to design a natural ventilation system with only a very small pressure drop. The wind may be utilized to boost the driving force created by the stack effect. The air intake and outlet should be designed in such a way that the wind does not work against the stack effect but preferably with the stack effect. During sunshine the driving force may further be enhanced by a solar chimney, which converts the solar radiation to a driving force. The sun may also be utilized to preheat the fresh air in a solar air collector and thus further decrease the heat loss by ventilation – an example shows a saving of 7-10%.

A tool has been developed for easy calculation of the obtainable ventilation flow rate and heat recovery rate in natural ventilated buildings with heat recovery and solar assistance. The tool does, however, require some further improvement before being released to the public.

Nomenklaturliste

Betegnelse	Enhed	Forklaring
A	m ²	solfangerareal
C	-	formfaktor
c _p	J/(kgK)	specifik varmekapacitet
D _h	m	hydraulisk diameter
g	m/s ²	tyngdeacceleration
G	W/m ²	global solstråling
h	m	højde
H	m	højde
k	m	sandruhed
k ₀	(W/m ²)/K	beregningskonstant til solfangereffektivitet: 1. ordens led
k ₁	(W/m ²)/K ²	beregningskonstant til solfangereffektivitet: 2. ordens led
n	h ⁻¹	luftskifte
p	Pa	tryk
pΔ	Pa/m	trykgradient i rør
p _d	Pa	dynamisk tryk
Q	W (J/s)	varmestrøm
Re	-	Reynolds tal
t	°C	temperatur
T	°C	temperatur
v	m/s	vindhastighed
V	m ³	volumen
VGv	-	varmegenvindingsgrad
Δ	-	differens
ρ	kg/m ³	densitet
η	-	effektivitet
η ₀	-	starteffektivitet
λ	-	friktionskoefficient
ζ	-	tryktabskoefficient for enkeltmodstand

Indices

c	kondensator
D	gældende for kurve D
E	gældende for kurve E
e	efter
f	før
gen	varmegenvinding
i	inde, rum
k	kold
kond	kondensator
loft	temperatur ved udsugning fra bygning
m	middel
r	resulterende
sol	solfanger (solskorsten)
ude	omgivelser
v	varm

1. Indledning

Gennem de senere år er der sket en stærk stigning i interessen for naturlig ventilation bl.a. som en reaktion på stigende problemer med dårligt indeklima, idet mekanisk ventilation ofte bliver gjort ansvarlig for det dårlige indeklima.

Traditionelt foregår naturlig ventilation ved, at frisk luft trænger ind og ud gennem de utætheder, der naturligt er i bygningernes klimaskærm eller gennem friskluftventiler. Naturlig ventilation drives dels af vinden og dels af den termiske opdrift, der naturligt opstår i en bygning, når indeluften er varmere end udeluften.

Naturlig ventilation har den fordel fremfor mekanisk ventilation, at der spares elektricitet til ventilatorer og pladskrævende kanalføringer. Mekanisk ventilation har modsat den fordel, at det er relativt enkelt at etablere varmegenvinding mellem afkast- og friskluft, hvilket reducerer bygningens opvarmningsbehov. Desuden er det lettere at styre luftskiftet i en bygning med mekanisk ventilation og dermed lettere at fastholde det nødvendige luftskifte. Luftskiftet fluktuere traditionelt meget i naturligt ventilerede bygninger.

Formålet med nærværende rapport er at undersøge mulighederne for styret naturlig ventilation med varmegenvinding. Desuden er det formålet indledende at undersøge muligheden for solassistance i form af forvarmning af friskluften i en luftsolfanger/solvæg og forøgelse af drivtrykket ved hjælp af en luftsolfanger/solskorsten.

Det var således ønsket at besvare følgende spørgsmål:

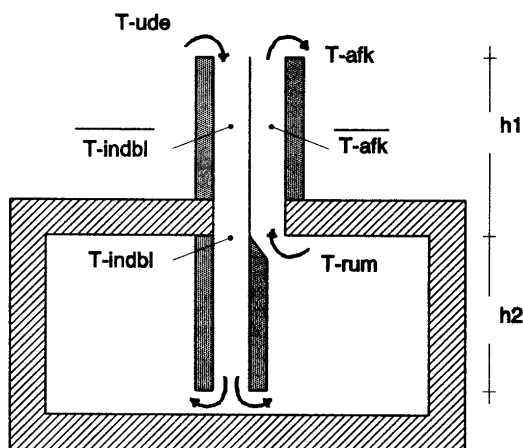
- er det muligt at opnå et tilstrækkeligt luftskifte
- hvilke varmegenvindingsgrader kan opnås
- hvor stor er elforbruget til cirkulationspumpen
- hvilken fluid kan anvendes til overførsel af varme mellem køle- og varmeblade
- er det nødvendigt med ventilatorunderstøtning
- er det muligt at opnå tilfredsstillende komfort
- hvordan bør indtaget af friskluft udformes – er f.eks. en luftsolfanger til forvarmning en god idé
- hvordan skal anlægget styres
- kan konceptet udformes både som centrale og decentrale anlæg

Der tages udgangspunkt i en eksisterende dansk undersøgelse af naturlig ventilation med varmegenvinding (Schultz, 1993). Slutrapporten fra denne undersøgelse er refereret kortfattet i det følgende afsnit.

1.1. Tidligere danske erfaringer

I 1993 blev der foretaget en indledende undersøgelse af et koncept, hvor naturlig ventilation blev koblet sammen med varmegenvinding. På Laboratoriet for Varveisolering, DTH (nu Institut for Bygninger og Energi, DTU) blev der dels udført teoretiske parameterundersøgelser ved hjælp af et til formålet udviklet edb-program, og dels opbygget en prototype til test af konceptet (Schultz, 1993).

Systemet er udformet som vist i figur 1.1. Både luftindtag og afkast er placeret over det rum, der skal ventileres. Den kolde udeluft vil bevæge sig nedad gennem friskluftskanalen og indblæses nederst i bygningen. Den varme luft fjernes øverst i bygningen og bevæger sig opad i aftrækskanalen. De to modsatrettede luftstrømme passerer undervejs en luft-til-luft varmeveksler. Denne er i figuren vist som en tyndvægget plade mellem de to luftstrømme.



Figur 1.1 Principskitse af systemet udviklet på Laboratoriet for Varmeisolering, DTH (Schultz, 1993).

1.1.1. Parameterundersøgelser

I forbindelse med projektet blev der udviklet et edb-program, således at en række af varmevekslerens egenskaber kunne undersøges vha. parameteranalyser, inden en prototype for konceptet blev opbygget i Laboratoriet for Varmeisolerings lavenergieksperimenthus. Med programmet beregnes bl.a. luftmængde og varmegenvindingsgrad for systemet. Et af formålene med parameterundersøgelserne var at opnå grundlæggende erfaringer med de forhold, der gør sig gældende for et koncept som dette. Resultaterne fra disse parametervariationer dannede basis for den endelige udformning af varmeveksleren. Varmevekslerens egenskaber blev undersøgt i forhold til følgende parametre:

- Varmevekslermateriale
- Kanaldimensioner
- Kanalplacering
- Temperaturforhold
- Eksterne trykforhold
- Enkeltmodstande i systemet

Beregningerne viste bl.a., at materialet varmeveksleren er lavet af, stort set var uden betydning for varmeovergangen fra kold til varm luft. Dette skyldes, at varmestanden i materialet er forsvindende lille i forhold til varmeovergangsmodstanden fra luft til vekslermateriale. Vekslermaterialet kan dog få betydning, hvis der er tale om flerdimensionale varmestrømme, f.eks. hvis veksleren udformes med finner.

Størrelsen af kanaltværsnittet har efter beregningerne stor betydning for både luftmængde og varmegenvinding. Generelt giver et lille tværsnit en lille luftmængde, men mulighed for en

høj genvindingsgrad. Til gengæld giver et stort areal mulighed for en stor luftstrøm, men varmegenvindingsmulighederne bliver mindre.

Hvis et større tværsnitsareal også medfører et øget varmeoverførende areal, vil genvindingsgraden derimod stige ved stigende areal og luftstrøm. Dette betyder alt i alt, at tværsnitsarealet er afgørende for luftmængden, mens det varmeoverførende areal er afgørende for genvindingsgraden.

En forøgelse af kanalhøjden giver ved det pågældende koncept en forøgelse af det varmeoverførende areal, men det påvirker også luftmængden. Dels medfører forøgelsen en stigning i systemets tryktab, og dels en stigning af det drivtryk, der er til rådighed. Samlet giver disse effekter en stigning af genvindingsgraden ved større højde. Luftmængden øges dog kun til en vis grænse, hvorefter den falder igen. Dette skyldes, at varmegenvindingen mindsker temperaturforskelle mellem indtag og afkast og dermed mindskes drivtrykket.

Det varmeoverførende areal kan også øges ved at udforme veksleren med finner, eller eventuelt med flere parallelle kanaler. Dette er i projektet beskrevet ved en arealfaktor, der angiver vekslerarealet i forhold til det fysiske kanaltværsnit. En forøgelse af vekslerarealet kan give en væsentlig forøgelse af genvindingsgraden uden særlig nedsættelse af luftmængden. Varmeveksleren skal dog udformes, så arealforøgelsen ikke medfører væsentligt større tryktab i systemet.

Temperaturforskellen mellem inde- og udetemperatur skaber det drivende tryk. Beregninger med edb-programmet har vist, at det ikke kun er den absolutte temperaturdifferens, der er afgørende. Temperaturniveauet har også betydning for både luftmængde og genvindingsgrad. Den laveste genvindingsgrad opstår ved et lavt temperaturniveau, dvs. om vinteren.

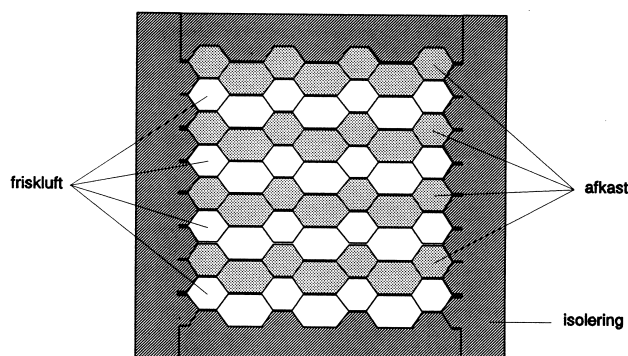
Eksterne trykforhold i form af vindpåvirkninger påvirker systemet meget. Små vindtryk kan øge luftstrømmen i systemet meget, hvilket betyder, at genvindingsgraden falder. Desuden kan vindtryk, der virker imod strømningsretningen få ventilationen til at gå i stå. Dette indikerer, at ind- og udløb skal konstrueres omhyggeligt, så vinden ikke kan modarbejde systemet.

Summen af enkeltmodstande i systemet er også undersøgt, og resultaterne har vist, at genvindingsgraden stiger med stigende trykmodstand i systemet. Dette skyldes, at lufthastigheden falder, hvorved luften bevæger sig langsommere forbi veksleren.

1.1.2. Prototype

På baggrund af erfaringerne fra edb-programmet blev en prototype af anlægget opbygget. Anlægget blev opført i et lavenergihus, der tidligere havde været anvendt til forsøg, og som bl.a. var kendetegnet ved en god lufttæthed. Ved at vælge denne bygning sikredes det, at systemet havde optimale betingelser, idet der kunne ses bort fra infiltration.

Selve varmeveksleren blev konstrueret under hensyntagen til balancen mellem størst muligt varmeoverførende areal og mindst muligt tryktab. Prototypen blev opbygget af 0,4 mm galvaniserede stål-trapez-plader. Disse blev sammensat lagvist, så der dannes rækker af parallelle kanaler. Et horisontalt tværsnit af veksleren er vist i figur 1.2. Veksleren består af 28 kanalpar og har en ydre dimension på 0,4 m x 0,35 m. Det er beregnet, at et normalt énfamiliehus på 120 m² vil kræve 100 kanalpar med en højde på 2,5 m.



Figur 1.2. Horisontalt snit af luft-til-luft varmeveksleren (Schultz, 1993).

Anlægget blev placeret i forsøgshuset, så ind- og udløb var placeret på husets uopvarmede loft. Der var således ikke luftudveksling direkte med udeklimaet. Der blev derfor kun gennemført målinger på dage, hvor lufttemperaturen var tæt på udelufttemperaturen. Friskluften blev indblæst i bygningen ca. 0,4 m over gulvniveau, mens afkastluften blev fjernet gennem en åbning 0,4 m under loftet i lokalet. Ved forsøgene blev temperaturer og lufthastigheder i systemet målt. Der var ikke i forsøgsanlægget installeret nogen form for regulering af luftmængden, hvilket betød en meget varierende ventilationsmængde.

Ved en temperaturdifferens på 10°C blev der målt en varmegenvindingsgrad på ca. 43% og en luftmængde svarende til et luftskifte på ca. 0,5 h⁻¹ (70 m³/h). Under forskellige ydre forhold varierede genvindingsgraden mellem 38-43%. Dette var væsentligt bedre end beregnet, og det blev derfor konkluderet, at varmeoverføringen i veksleren ikke kunne modelleres ved hjælp af generelt anvendte udtryk for varmeoverføring mellem en kanalvæg og forbipasserende luft.

1.1.3. Konklusion

En af de opnåede erfaringer med konceptet var, at luftstrømningen i indløbskanalen ikke var ensrettet. Langs varmevekslerens sider blev luften opvarmet, hvilket betød, at der dannedes små opadrettede hvirvler i den ellers nedadgående luftstrøm. Dette gav en større varmeovergang, fordi strømningen blev mere turbulent, men betød også en formindskelse af drivtrykket.

Udformningen af indblæsningsåbningen havde stor betydning, idet varm indeluft havde en stærk tendens til at strømme op i indblæsningskanalen og dermed bremse den naturlige ventilation. Dette problem blev løst ved at udforme indblæsningen som en én-vejs blænde, der dog introducere en strømningsmodstand for luftstrømning i den ønskede retning.

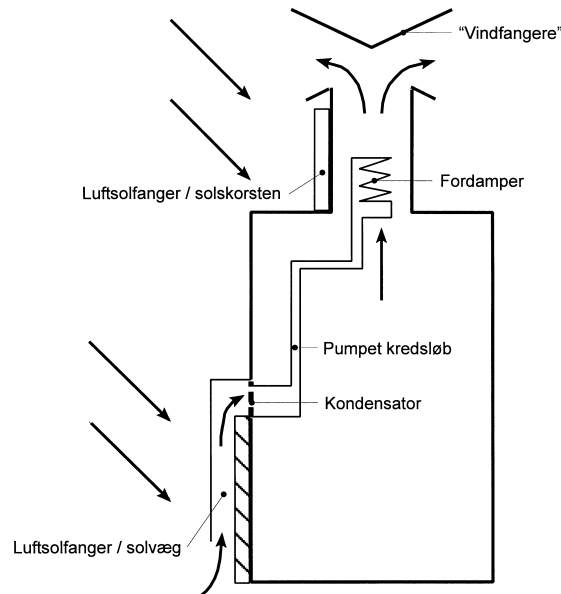
1.2. Nyt koncept

Det ovenfor beskrevne koncept viste, at det er muligt at introducere varmegenvinding i forbindelse med naturlig ventilation. Konceptet har dog nogle ulemper:

- at de to luftstrømme skal mødes, hvilket giver stærke bindinger til placeringen af afkast- og indblæsningsåbning i rummet
- at opvarmningen af friskluften ned gennem kanalen og afkølingen af afkastluften op gennem kanalen reducerer drivtrykket

- at det ikke er muligt at styre graden af varmeveksling eller helt at undgå varmeveksling f.eks. i sommermånederne, hvor der ikke er behov for varmegenvinding

I nærværende projekt er der udviklet et nyt koncept, som kort vil blive beskrevet i det følgende. Konceptet er vist skematisk i figur 1.3.



Figur 1.3. Principskitse af det undersøgte koncept.

Systemet består af:

- en unit med hedeflade (kondensator) ved frisklufttilgangen evt. i kombination med en luftsolfanger/solvæg for yderligere forvarmning af friskluften.
- en unit med køleflade (fordamper) i afkastluften. En luftsolfanger/solskorsten kan øge drivtrykket i systemet og derved maksimere varmegenvindingsgraden samt evt. øge den varmemængde, det er muligt at overføre til friskluften. Afkastet bør udformes, så vinden øger drivtrykket.
- ventilationsmængden styres ved hjælp af et spjæld i afkastkanalen samt evt. et bypass udenom varme – og kølefladen til brug i sommermånederne.

Konceptet har flere fordele i forhold til konceptet beskrevet i forrige afsnit:

- der er valgfrihed med hensyn til placeringen af vekslerkredsens køle- og varmeplade
- frisk- og afkastluften skal ikke mødes
- placeringen af varmepladen i bunden af bygningen virker her sammen med den termiske opdrift, mens kølepladens ringe udstrækning kun i ubetydelig grad reducerer det termiske drivtryk
- det er muligt at styre luftskiftet
- det er muligt yderligere at reducere opvarmningsbehovet til forvarmning af friskluften ved at anbringe en solfanger/solvæg foran indsugningen af friskluft
- det er muligt at øge drivtrykket ved hjælp af en solfanger/solskorsten og øge den overførte varmemængde, hvis solfangeren er placeret før vekslerkredsens kølekreds
- systemet kan også anvendes i forbindelse med afkastventilation – f.eks. i eksisterende bygninger, hvor det er vanskeligt/umuligt at placere ventilationskanaler

- det er muligt at eftervarme friskluften efter vekslerens varmeplade i indblæsningen til en temperatur, der ikke giver trækgener

Vekslerkredsen opbygges som koblede væskebatterier, hvor et kølemiddel anvendes som varmetransporterende medium. Anvendelse af et kølemiddel giver en større varmeoverføringsevne i vekslerne end vand. Samtidigt skal der cirkuleres en mindre massestrøm end ved brug af vand som transportmedium. Der kan derfor bruges tyndere rør.

Resultaterne af en undersøgelse af ovenstående koncept er beskrevet i de følgende kapitler. I det følgende afsnit er resultaterne fra internationale projekter, der er forløbet sideløbende og uafhængigt med nærværende projekt, beskrevet.

1.3. Sideløbende internationale projekter

Interessen for naturlig ventilation er også stor i de øvrige europæiske lande, hvor der bl.a. i Sverige, Tyskland og England er opført en del bygninger med naturlig ventilation. Indenfor de sidste par år er den naturlige ventilation blevet koblet sammen med varmegenvinding.

Denne forskning har især været koncentreret i to internationale projekter, NatVent og Save-Heat, der er forløbet sideløbende med nærværende projekt. I forbindelse med disse projekter er der opført forsøgsanlæg, hvor koncepterne er afprøvet i praksis. De endelige resultater fra projekterne er endnu ikke offentliggjort, men der vil i det følgende alligevel blive givet en kort beskrivelse af projekterne.

Her er desuden medtaget en beskrivelse af et fuldskala ventilationsanlæg opført i forbindelse med en skole i Grong, Norge. Dette anlæg minder på flere områder om nærværende koncept, bl.a. fordi der benyttes et pumpedrevet kredsløb til varmegenvindingen.

1.3.1. NatVent

NatVent-projektet er et forskningsprojekt under det europæiske JOULE program med deltagelse af Belgien (BBRI), Danmark (SBI), Holland (TNO og Universitetet i Delft), Norge (NBI), Schweiz (Sulzer Infra Lab Ltd), Storbritannien (BRE, AIVC og Willan Building Service) og Sverige (SP og AB Jacobsen & Widmark) med BRE i England som projektets hovedkoordinator.

Formålet med projektet har dels været at finde løsninger til at overvinde de barrierer, der måtte være i forbindelse med indførsel af naturlig ventilation i kontorbyggeri, og dels at øge anvendelsen af naturlig ventilation i forbindelse med nybyggeri og større renoveringer af kontorbyggeri.

Projektet har været opdelt i 3 stadier (work packages):

1. at identificere barrierer for indførsel af naturlig ventilation gennem spørgeskemaer til designere, arkitekter, bygherrer mm. samt evaluering af svar fra disse.
2. at analysere resultater fra eksisterende bygninger, der er specielt designede med henblik på energi-effektiv naturlig ventilation.

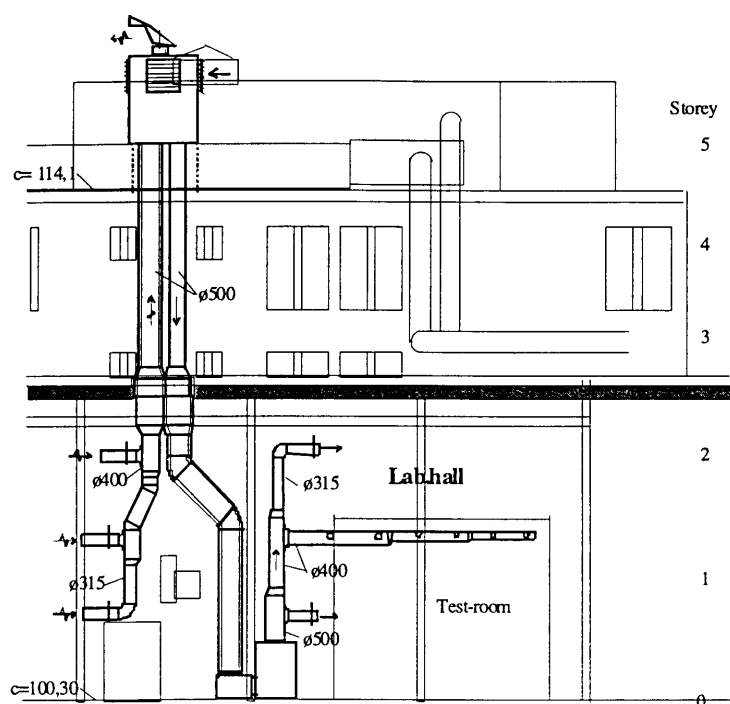
3. at udvikle teknologier til systemer med naturlig ventilation, samt at udvikle komponenter specielt designet med henblik på naturlig ventilation. Denne del af projektet har yderligere været opdelt i luftindtagskomponenter, komponenter til sikring af konstant flow, systemer med varmegenvinding, styring af natkøling, samt integration og vedligeholdelse af systemerne.

Udvikling af systemer med naturlig ventilation kombineret med varmegenvinding har været ledet af Norges Byggeforskningsinstitut (NBI) (Hestad et al, 1998). I den forbindelse er der hos NBI opstillet et forsøgsanlæg, hvor ventilering af en kontorbygning i fuld skala kan simuleres. Forsøgsanlægget var dimensioneret til at kunne dække ventilationsbehovet for kontorer til i alt ca. 40 personer fordelt på 3-4 etager med en samlet ventilationsmængde på 400 l/s. En skitse af forsøgsanlægget er vist i figur 1.4.

Systemet er opbygget i 3 sektioner:

- En tag-unit med centralt luftindtag, grovfilter og hjælpeventilator, samt et centralt afkast med varmeveksler (køleflade). Både ind- og udløb er udformet, så eventuelle vindkræfter udnyttes bedst muligt.
- En kælder-unit med elektrostatisk filter i indtaget og varmeveksler (varmeplade).
- Et kanalsystem med fordeling af friskluften i 3 niveauer og udsugning ligeledes i 3 niveauer.

De to vekslerflader er koblet sammen som væskekoblede batterier med vand som transportmedium.



Figur 1.4. Skitse af forsøgsanlæg hos NBI Norge (Hestad et al, 1998).

De samlede trykfald gennem systemet er som vist i tabel 1.1. Det totale trykfald er ca. 51 Pa, hvilket er for stort til at dækkes af naturlige drivkræfter alene. Det er derfor i dette system nødvendigt at have en assisterende ventilator til at overvinde modstanden i systemet.

Indtag		Afkast	
Komponent	Trykfald [Pa]	Komponent	Trykfald [Pa]
indtag og lodret kanal	11,3	udløb til omgivelserne	1,2
elektrostatisk filter	1	varmeveksler	3,1
varmeveksler	6,5	udløbskanaler	8,4
tilførselskanaler	19,4		
I alt	38,2		12,7

Tabel 1.1 Tryktab over komponenter i forsøgsanlæg hos NBI, Norge (Hestad et al, 1998).

De store trykfald i systemet ligger især i selve kanalsystemet, samt de steder, hvor luften skal passere store arealforandringer, dvs. indløb, udløb, mm. Dette skyldes bl.a. at der arbejdes med forholdsvis store lufthastigheder på ca. 2 m/s i de brede kanaler og 2,6 m/s i hhv. indtags- og afkaståbningerne. Et stort og forgrenet net af kanaler med et tryktab på ca. 0,15 Pa/m bliver samlet det mest betydende bidrag til det totale tryktab i systemet. Dette er især gældende for indløbsdelen. Varmervekslerne giver et beskedent bidrag til systemets samlede modstand, mens det elektrostatiske filter har et meget lille tryktab.

Der er blevet målt på systemet både før og efter installation af assisterende ventilatorer i en forårsperiode med lave udetemperaturer og kun lidt vind.

Uden ventilator lå flowet i afkastkanalen på ca. 60% af den dimensionerende værdi på 400 l/s, mens flowet i indtaget har været endnu lavere. Dette skyldes sandsynligvis, at tryktabet i indtaget har været så stort, at en del luft tages ind ved infiltration gennem ukontrollerede utætheder. Over 40% af luften i udløbet blev *ikke* tilført bygningen via indløbskanalen.

Med en ventilator i udløbet kan luftmængden her holdes konstant på den dimensionerende værdi. Dette skyldes, at ventilatoren også benyttes til styring af luftflowet ved regulering af ventilatorens hastighed. Flowet i indløbet stiger derimod næsten ikke. Luftmængden i indtaget ligger på ca. 150 l/s, hvilket betyder, at over 60% af lufttilførslen sker udenom systemet. For at få varmegenvindingssystemet til at fungere tilfredsstillende har det derfor været nødvendigt også at placere en ventilator i indløbet.

Den målte temperaturvirkningsgrad for varmevekslerne er ca. 50%. Det gennemsnitlige effektforbrug for de to ventilatorer er ca. $2 \times 28 \text{ W} = 56 \text{ W}$ eller ca. $0,14 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Dette svarer til omkring 5% af energiforbruget til en konventionelt ventilationsanlæg (Hestad et al, 1998).

Økonomiske beregninger for ventilationsanlæg opbygget som forsøgsanlægget viser, at installationsomkostningerne vil blive større, mens driftsomkostningerne falder i forhold til et konventionelt ventilationsanlæg. Med de gældende priser i Norge i dag, kan systemet dog ikke konkurrere med de konventionelle anlæg.

De generelle konklusioner fra målinger på forsøgsanlægget har været:

- Optimering af kanalsystemet og enkeltkomponenterne kan reducere tryktabet i systemet væsentligt, hvilket vil nedsætte behovet for ventilatorassistance.
- En forholdsvis utæt forsøgsbygning har givet problemer med stor infiltration. I en enkelt periode har der endda været modsatrettet flow i indtagskanalen. Dette giver dårlige-

re arbejdsbetingelser for varmegenvindingssystemet. I en tæt bygning bør én ventilator være tilstrækkelig til at styre luftmængden i hele systemet.

- Energiforbruget til ventilatorer er ca. 5% af energiforbruget til et konventionelt anlæg. Ventilatorerne virker samtidigt som effektive flow controllere.
- Varmegenvindingsgrader på 50% kan opnås med systemet. Denne kan muligvis øges ved optimering af anlægget.

1.3.2. SaveHeat

SaveHeat projektet er et samarbejde mellem Finland (Helsinki University of Technology), Portugal (University of Porto), Schweiz (Sulzer Infra Lab Ltd) og Storbritannien (University of Nottingham) også finansieret under det europæiske JOULE program.

Projektet er afsluttet, men resultaterne fra projektet er endnu ikke offentliggjort. Det har dog været muligt at besøge Sulzer Infra i Winterthur, Schweiz, som havde opsat og målt på den udviklede prototype af SaveHeat konceptet. Konceptet bygger på en kombination af naturlig ventilation og varmegenvinding ved anvendelse af heatpipes. Til forøgelse af det naturlige drivtryk er afkastkanalen forlænget med en solskorsten.

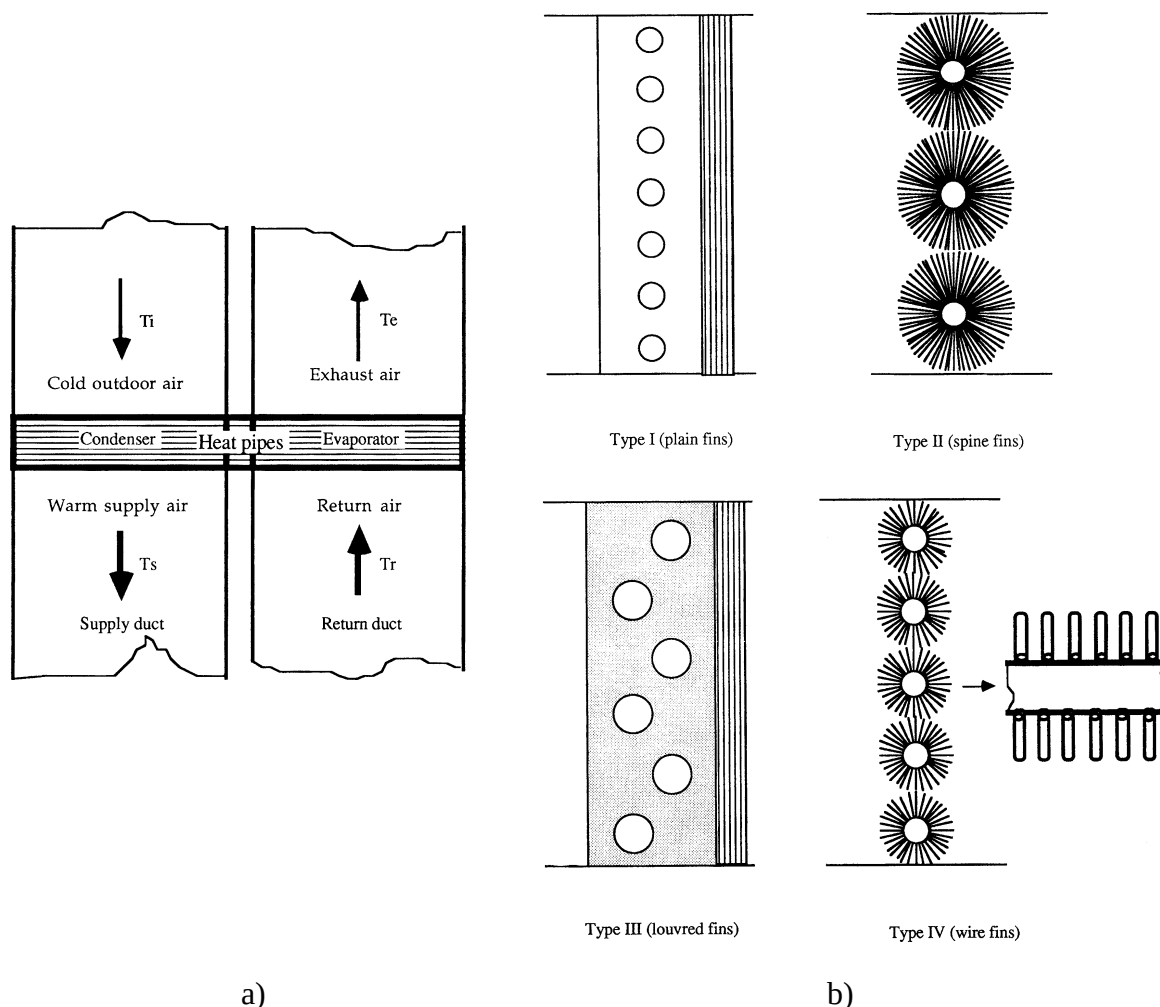
Forsøgsanlægget var opsat på en af Sulzer Infra's bygninger, hvor det skulle sørge for tilstrækkelig ventilation af et af bygningens kontorer. Systemet var opbygget, så indtag og afkast til det fri begge var samlet på taget af den pågældende bygning. Et billede af taguniten er vist i figur 1.5. I denne tagunit sidder varmeveksleren i form af en vandretliggende række heatpipes. Luften ledes til og fra tagunit og kontor gennem parallelle isolerede kanaler, der er ført ned langs ydersiden af bygningen og ind gennem et vindue i kontoret.



Figur 1.5. Billede af tag-unit med solskorsten.

Inden opstilling af prototypen blev forskellige typer heatpipe varmevekslere undersøgt med det formål af finde en udformning, der både giver en høj virkningsgrad og et lavt tryktab. Bl.a. er udformningen af finner, samt placering af heatpipes i forhold til hinanden varieret. Fordelen ved at anvende heatpipes er bl.a., at det er muligt at opbygge en varmeveksler med god virkningsgrad og lavt tryktab. Ulempen er, at det er nødvendigt at friskluft og afkastluft skal mødes. Dette stiller store krav til udformningen af anlægget.

Som et led i udviklingen af konceptet, blev flere forskellige konfigurationer af varmevekslere med heatpipes afprøvet på Universitetet i Nottingham. Figur 1.6 viser skematisk forsøgsopstillingen samt de fire undersøgte varmevekslere.



Figur 1.6. Principskitse af forsøgsopstillingen på Universitet i Nottingham (a) samt skitser af de fire afprøvede varmevekslere (b) (Riffat og Gan, 1997).

Effektiviteten og tryktabet over varmeveksleren blev målt ved forskellige lufthastigheder. Ved 0,5 m/s blev der målt effektiviteter på mellem 28 og 47%, mens de tilsvarende tal ved 1 m/s var 20 og 44% (Riffat og Gan, 1997). Trykfaldet over den bedste veksler var 1 og 4,5 Pa ved henholdsvis 0,5 og 1 m/s.

Ligeledes blev funktionen af en solskorsten undersøgt. Den anvendte solskorsten havde en højde på 2 m og et indre tværsnitsareal på 0,2 m x 1 m. I sammenligning med en skorsten med

samme mål men uden solfanger (forsøgsopstillingen er vist i figur 1.7) har laboratorieforsøg vist, at luftmængden gennem systemet kan øges med op til 47% ved anvendelse af en solskorsten (Sirén et al, 1997).



Figur 1.7. Forsøgsopstillingen på University of Porto til undersøgelse af effekten af en solskorsten.

For at opretholde et konstant luftflow i systemet er der udviklet en styrestrategi baseret på temperatursensorer samt en lufthastighedsmåler i afkastluften. Flowet reguleres af konventionelle spjæld. Styrestrategien er bl.a. baseret på, at det skal være muligt at bypasse varmevekslerne, når der ikke er behov for varmegenvinding. Desuden er der i kontrolstrategien indlagt mulighed for omvendt varmegenvinding, når udetemperaturen er højere end indtemperaturen, og der er behov for køling af bygningen. Disse tiltag var dog ikke gennemført i prototypen.

En af de væsentlige driftserfaringer fra prototypen har været, at placering af indtag med varmeblade øverst i ventilationssystemet (se figur 1.8) ikke er fordelagtigt i forbindelse med naturlig ventilation. Luften i indtaget skal bevæge sig nedad for at komme ind i bygningen. Når den kolde friskluft opvarmes af varmeveksleren, skabes en drivtryk, der vil forsøge at få luften til at bevæge sig opad. Varmebladen (i indtaget) kommer derved til at fungere som en prop i systemet, der nedsætter luftflowet.

Den resulterende ventilation af kontoret har derfor i størstedelen af måleperioden nærmest været konventionel aftræksventilation. Solskorstenen har suget luften ud af lokalet, men friskluften er ikke leveret fra indtaget. Det er i stedet kommet ind via ukontrollerede utætheder i bygningen. Dette har betydet, at varmegenvindingen ikke har fungeret tilfredsstillende.

Anlægget siges at have fungeret efter hensigten om sommeren uden varmeveksleren.

På baggrund af målingerne på prototypen er Sulzer Infra kommet frem til, at der i stedet for heatpipes bør sættes på det koncept, der undersøges i nærværende rapport (Zaccheddu, 1998).

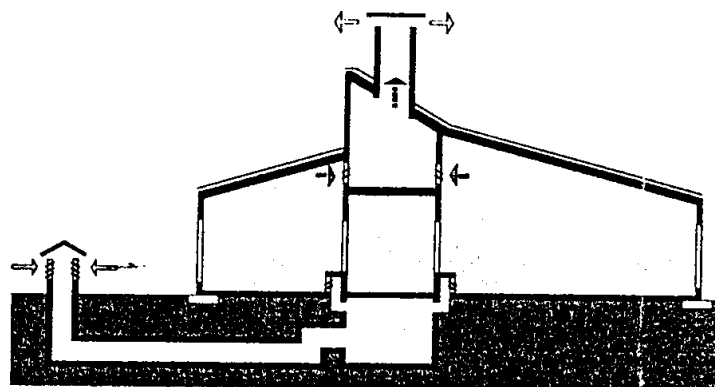


Figur 1.8. Udsnit af tag-unit. En vandret række heatpipes kan placeres mellem solskorsten (til venstre) og indtag (til højre) som vist med den hvide boks.

1.3.3. Naturlig ventilation på Grong Skole i Norge

Ventilationssystemet på Grong Skole er opført i forbindelse med den norske deltagelse i det europæiske THERMIE projekt Meduca: "Energy-effective School Buildings". Et væsentligt formål med dette projekt var udnyttelse af dagslys og naturlig ventilation.

Forskellige alternative udformninger af systemet blev analyseret med henblik på optimal udnyttelse af hhv. termiske og/eller vindskabte drivtryk (Tjelflat og Rødahl, 1997). Det valgte koncept (der er en videreudvikling af konceptet i NatVent sammen med inspiration fra ventilationskonceptet anvendt i flere nyere svenske skoler) er skitseret på figur 1.9. Friskluften tages ind gennem et centralt indtag placeret udenfor selve bygningen. Luften strømmer igennem en betonkanal under jorden ind til et fordelingsrum under bygningen. Her konditioneres luften, hvorefter den fordeles ud i bygningen. Afkastluften suges ud gennem et rum øverst i bygningen, hvor den samles i et centralt udløb.

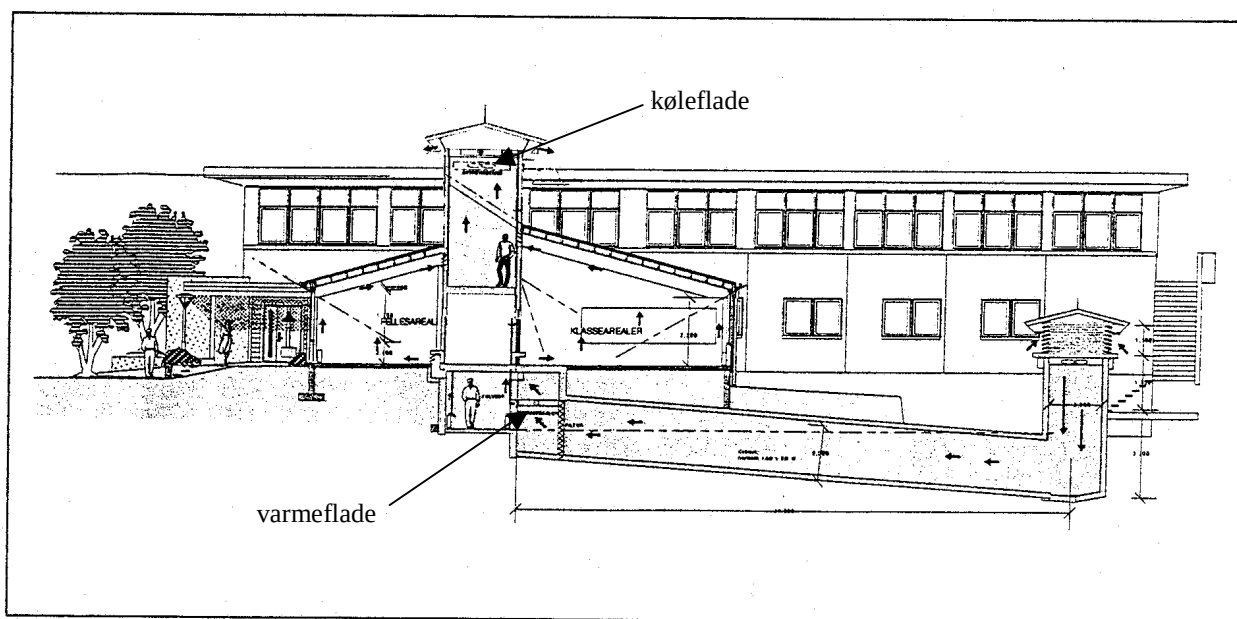


Figur 1.9. Skitse af koncept for ventilationsanlæg på Grong skole i Norge (Tjelflat og Rødahl, 1997).

Et centralt indtag placeret udenfor bygningen er valgt af flere årsager. Dels giver den lange betonkanal mulighed for, at større støvpartikler kan afsættes, inden luften når bygningen, og dels virker betonkanalen som et passivt varmelager. Om vinteren, hvor udeluften er kold, vil betonen og den omgivende jord afgive varme til luften, så behovet for eftervarme mindskes. Om sommeren vil betonkanalen afkøle luften, hvilket mindsker behovet for køling i bygningen. Desuden kan den assisterende ventilator placeres udenfor bygningen, så støjgener fra denne undgås.

Ved indgangen til fordelingsrummet passerer luften to varmevekslere, først varmegenvindingsveksleren og dernæst en eftervarmer, der sørger for, at luften får den ønskede temperatur inden indblæsning til lokalerne. Fordelingsrummet ligger under skolebygningens midtergang, hvorfra luften sendes ind i klasselokalerne gennem indblæsningsdyser i gulvhøjde. Dyserne er dimensioneret, så lufthastigheden er mindre end 0,1 m/s for at undgå træk. Varmegenvindingssystemet bygger på et pumpedrevet kredsløb med cirkulation af en vand-glykol-blanding. Det er vurderet, at en genvindingsgrad på ca. 50% kan opnås.

Udsugningen sker fra lokalerne ud til en vandret loftskanal. Loftskanalens sydlige facade er udført i glas, så sollys kan trænge gennem kanalen og ned til klasselokalerne, der på denne måde får tilført mere dagslys. Desuden opvarmes luften i aftrækskanalen yderligere. Dette øger det naturlige drivtryk og varmegenvindingsveksleren i aftrækket får tilført en større mængde varme, der kan genvindes. Denne varmeveksler er placeret øverst i et centralt afkasttårn, der er hævet ca. 7 m over jordoverfladen. Ventilationssystemet er vist i figur 1.10.



Figur 1.10. Ventilationsanlægget på Grong skole, Norge (Tjelflat og Rødahl, 1997).

Denne udformning af systemet har som i NatVent-projektet medført store tryktab, især på indtagssiden. Tryktabene skyldes især det fintmaskede filter, samt varmeveksleren i varmegenvindingssystemet. På afkastsiden giver luftstrømningen over selve varmeveksleren det største bidrag til systemets tryktab. Det skyldes bl.a., at lufthastigheden er øget her for at forhindre modsatrettet flow. Tryktabene over systemets komponenter er listet i tabel 1.2 for en vintersituation med en udetemperatur på -20°C .

Indtag		Afkast	
Komponent	Trykfald [Pa]	Komponent	Trykfald [Pa]
insektnet	0,1	udløb fra lokaler (delvist åben)	3,7
indtagskanal i beton	1,4	loftskanal	0
filter	12,9	indløb til afkastskorsten	0,1
genvindingsvarmeveksler	10,8	afkastskorsten	0,2
varmefflade	4,3	genvindingsvarmeveksler	12,0
fordelingsrum	0	180° bøjning	0,7
tilførselskanaler og diffusere	1,3	udløbstab	0,7
I alt	30,8		17,4

Tabel 1.2. Trykfald over delkomponenter i anlæg på Grong skole, Norge ved luftflow på $1,64 \text{ m}^3/\text{s}$ og en udetemperatur på -20°C (Tjelflat og Rødahl, 1997).

Det totale trykfald i systemet er ca. 48 Pa, hvilket ikke kan overvindes ved naturlige drivkræfter alene. Det er valgt at placere en ventilator i indløbet udenfor bygningen. I sommerperioder, hvor varmegenvinding ikke er nødvendig, skal luften ledes udenom varmevekslerne for at mindske ventilatorbehovet.

Der er desuden placeret en ventilator i afkasttårnet, men denne er ikke beregnet til normale ventilationsforhold. Denne ventilator har til formål at sørge for aftræksventilation i forbindelse med køling af bygningen om sommeren. I vintersituationer skal denne ventilator kunne udkobles, så den ikke virker som en ekstra trykmodstand i systemet.

Kontrolstrategien for anlægget er baseret på de aktuelle ventilationsbehov med CO_2 -sensorer i hvert lokale. CO_2 -målingen styrer et spjæld i hvert udløb, således at trykfaldet over dette reguleres. Ventilationen af hvert lokale kan styres uafhængigt. Desuden reguleres hastigheden af ventilatoren i indtaget for at kontrollere trykforholdene i bygningen. Ved behovsstyret ventilation kan ventilationsraten holdes på det mindst mulige niveau, hvilket er mest energiøkonomisk.

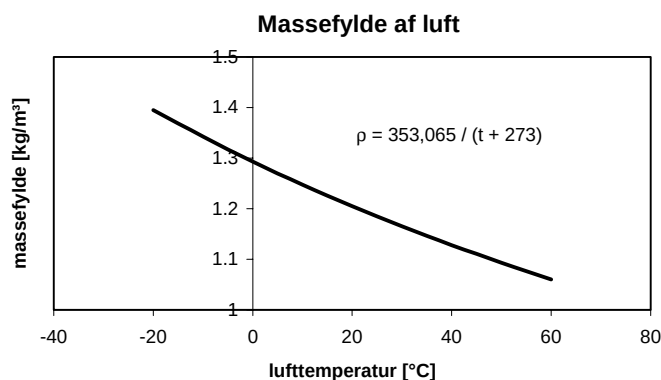
2. Termisk drivtryk

Naturlig ventilation opstår ved et samspil mellem vindpåvirkning og den termiske opdrift, der skyldes temperaturforskellene mellem inde og ude. For at opnå et godt indeklima, er det nødvendigt, at der altid er en tilstrækkelig ventilation tilstede i bygningen. Det er derfor ikke tilrådeligt hovedsagelig at basere ventilationen på den drivkraft, vinden skaber, idet luftskiftet i bygningen da populært sagt bliver som vinden blæser – meget fluktuerende. Der vil være perioder med for lille ventilation med dårligt indeklima til følge og perioder med for stor ventilation med deraf forøget opvarmningsbehov.

Naturlig ventilation bør derfor primært være baseret på den termiske opdrift, dog med hjælp fra vinden, når dette er muligt, men bygningen skal være dimensioneret således, at den nødvendige ventilation alene kan opnås ved hjælp af den termiske opdrift. Det betyder, at naturlig ventilation bør dimensioneres for situationer uden vindpåvirkning. Derefter er det nødvendigt at dimensionere ind- og udtag, så vinden helst hjælper med til at drive ventilationen eller ikke influerer på ventilationen, men aldrig virker mod den termiske opdrift.

I kapitel 4 diskuteres forskellige former for indtag og afkast, hvor vinden enten altid virker med den termiske opdrift eller ikke modarbejder den. I det følgende vil derfor kun det termiske drivtryk blive behandlet.

Termisk opdrift opstår, fordi varm luft har en mindre massefylde end kold luft. Massefylden af atmosfærisk luft er tilnærmelsesvis omvendt proportional med luftens absolutte temperatur, som det fremgår af figur 2.1.



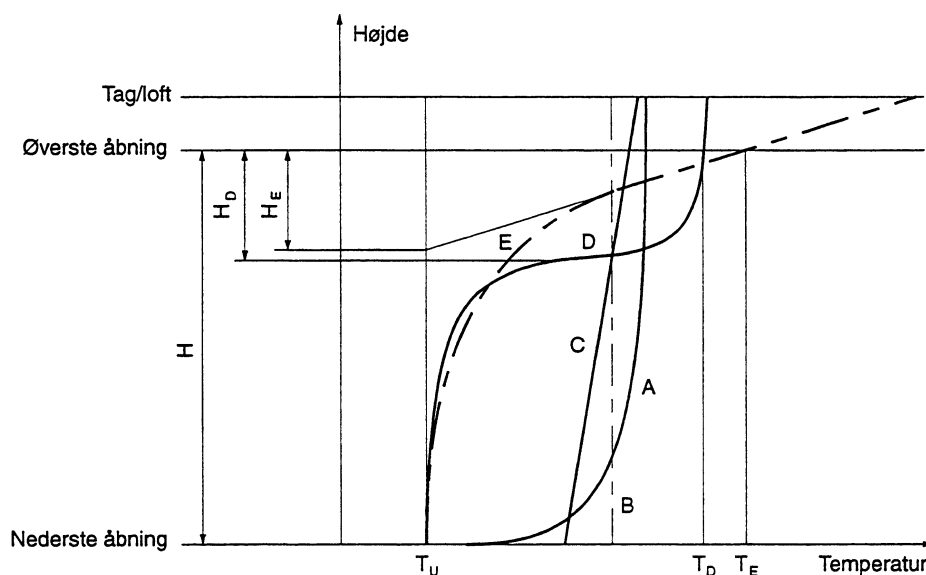
Figur 2.1. Massefylden for luft som funktion af luftens absolutte temperatur.

Forskellen i massefylde mellem to luftsøjler med forskellig temperatur vil skabe en trykforskel, der afhænger af luftsøjlernes højde og deres temperatur. Trykforskellen (her lig med drivtrykket) kan udtrykkes ved:

$$\Delta p = h \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_v) \quad (2.1)$$

hvor: Δp er trykforskellen i Pa,
 h er højden af luftsøjlerne i m,
 g er tyngdeaccelerationen = 9,8 m/s²,
 ρ_k er massefylden af den kolde luft i kg/m³,
 ρ_v er massefylden af den varme luft i kg/m³.

Traditionelt anvendes ovenstående formel ukritisk til beregning af drivtrykkene i en bygning uden hensyntagen til de aktuelle temperaturforhold i bygningen. Det går også godt, hvis der næsten ingen temperaturstratifikation optræder i bygningen, men hvis der forekommer en stor temperaturlagdeling i bygningen, som vist i figur 2.2, vil formel (2.1) give for høje drivtryk.



Figur 2.2. Højden som skal anvendes i formel (2.1) afhængig af det lodrette temperaturforløb i bygningen (Andersen, 1998a).

- kurve A: varmen tilføres jævnt nær gulvniveau,
- kurve B: er et teoretisk forløb, der med tilnærmelse optræder, når varmen tilføres jævnt i rummet, samtidigt med at den indstrømmende luft blandes godt op med rumluften,
- kurve C: varmekilderne er omtrentlig jævnt fordelt på de indvendige vægflader,
- kurve D: varmen tilføres i den øverste del af bygningen eller fra koncentrerede varmekilder,
- kurve E: varmen tilføres fra loftet eller den øverste del af de lodrette vægflader.

Formel (2.1) kan umiddelbart anvendes for situation A og B, hvor H er højdeforskellen mellem ind- og udløb.

Formel (2.1) kan tilnærmelsesvis anvendes for situation C, hvor H er højdeforskellen mellem ind- og udløb, men hvor ρ_v ikke findes for lufttemperaturen under loftet, men for middeltemperaturen af luften mellem ind- og udløb.

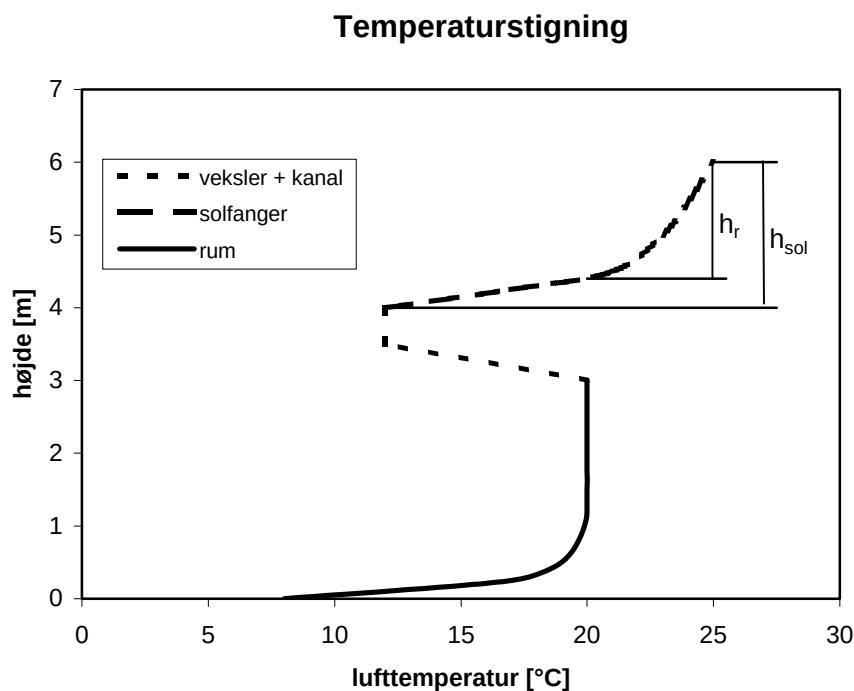
Formel (2.1) kan også anvendes for situation D og E, men højdeforskellen mellem ind- og udløb (H) skal erstattes med H_D og $H_E/2$.

Som det vises af figur 2.2, giver formel (2.1) anledning til en overestimering af drivtrykket i en bygning med stor temperaturstratifikation, hvis den anvendes ukritisk.

2.1. Driktryk i det undersøgte koncept

Figur 2.3 viser et eksempel på temperaturudviklingen i en bygning med det her undersøgte koncept, hvor der er varmeveksling mellem afkast- og friskluft samt en solskorsten. Udeluft-

temperaturen er her 0°C , mens rumtemperaturen er 20°C . Vekslereffektiviteten antages at være 40%. Efter at have passeret vekslerkredsens varmeplade i indløbet, har luften en temperatur på 8°C . Herefter opvarmes luften yderligere f.eks. gennem en radiator som beskrevet i kapitel 4. Det antages, at rumtemperaturen har et forløb som A i figur 2.2 og giver dermed anledning til et drivtryk som beskrevet i forbindelse med figur 2.2. Temperaturen af afkastluften falder med 8°C over vekslerkredsens køleplade. Efter et kanalstykke opvarmes luften igen gennem en solskorsten, hvor luften opvarmes mest over det første stykke.



Figur 2.3. Tænkt eksempel på temperaturforløbet for luften i det undersøgte koncept med varmegenvinding og solskorsten.

Da temperaturfaldet over veksleren sker over en begrænset højde, vil dette ifølge (Andersen, 1998b) kun i ubetydelig grad reducerer drivtrykket i systemet.

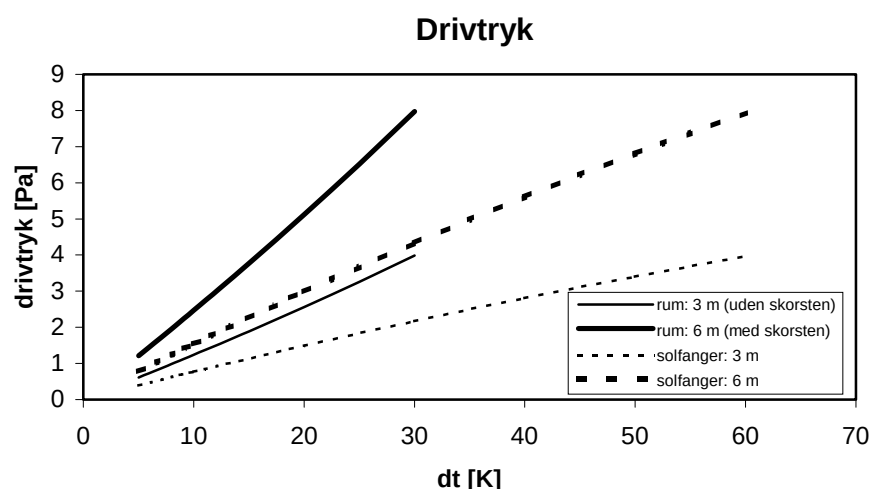
Drivtrykket som følge af skorstenen mellem rum og solfanger kan beregnes ved hjælp af formel (2.1), hvor h er højden af skorstenen og ρ_v findes ved middeltemperaturen i skorstenen, idet lufttemperaturen i skorstenen ikke nødvendigvis er konstant. Der kan være et varmetilskud eller varmetab fra omgivelserne til luften afhængig af, om skorstenen er placeret inde i bygningen eller udenpå bygningen.

Temperaturstigningen i en luftsolfanger forløber typisk ikke lineært. Den største temperaturtilvækst sker i starten. Dvs. den højde h , der skal benyttes i formel (2.1) vil ligge et sted mellem solfangerens hele og halve vertikale højde (h_{sol} i figur 2.3) – tilnærmelsesvis $2/3$ af den vertikale højde. Men da indløbstemperaturen til solfangeren er lavere end udløbstemperaturen fra rummet før veksleren, reduceres den betydende vertikale højde h_{sol} af solfangeren yderligere – i figur 2.2 til h_r , og som indløbstemperatur skal anvendes rumtemperaturen. Da det første stykke af solfangeren, hvor den største temperaturstigning sker, således skæres fra, er det i dette tilfælde mest rigtigt at regne med en resulterende højde på det halve af h_r . Dette gælder

dog kun for en vintersituation med indkoblet varmegenvinding. Om sommeren skal der regnes med totredjedele af den fulde vertikale højde h_{sol} .

Drivtrykket over solfangeren skal lægges sammen med drivtrykket over rummet og en evt. lodret kanal/skorsten for at få det samlede drivtryk.

Figur 2.4 giver en idé om de opnåelige drivtryk – dels over selve rummet og dels over en solfanger. Der er vist kurver for en rum/solfangerhøjde på henholdsvis 3 og 6 m. For rummet symboliserer 6 m, at vekslerkredsens køleflade er placeret 3 m oppe i en ventilationskanal. For solfangeren er højden den vertikale højde – som h_{sol} vist i figur 2.3. Der regnes ved beregningen af trykstigningen over solfangeren i figur 2.4 med en højde på totredjedele af h_{sol} . I figur 2.4 er udgangspunktet en rumtemperatur på 22°C.



Figur 2.4. Det opnåelige drivtryk over et rum eller en solfanger som funktion af temperatur-differencen og højden.

Som det ses af figuren, er det et relativt beskedne drivtryk, der kan opnås – specielt i lave bygninger, og specielt set i forhold til mekaniske ventilationsanlæg, der ofte opererer med trykdifferencer på flere hundrede Pa. Disse lave drivtryk skal der tages højde for ved anlægsudformningen, således at trykfaldet over anlægget bliver så lille som muligt. Ellers bliver det nødvendigt med ventilatorassistance, som det er beskrevet i det forrige kapitel for Natvent og Grong.

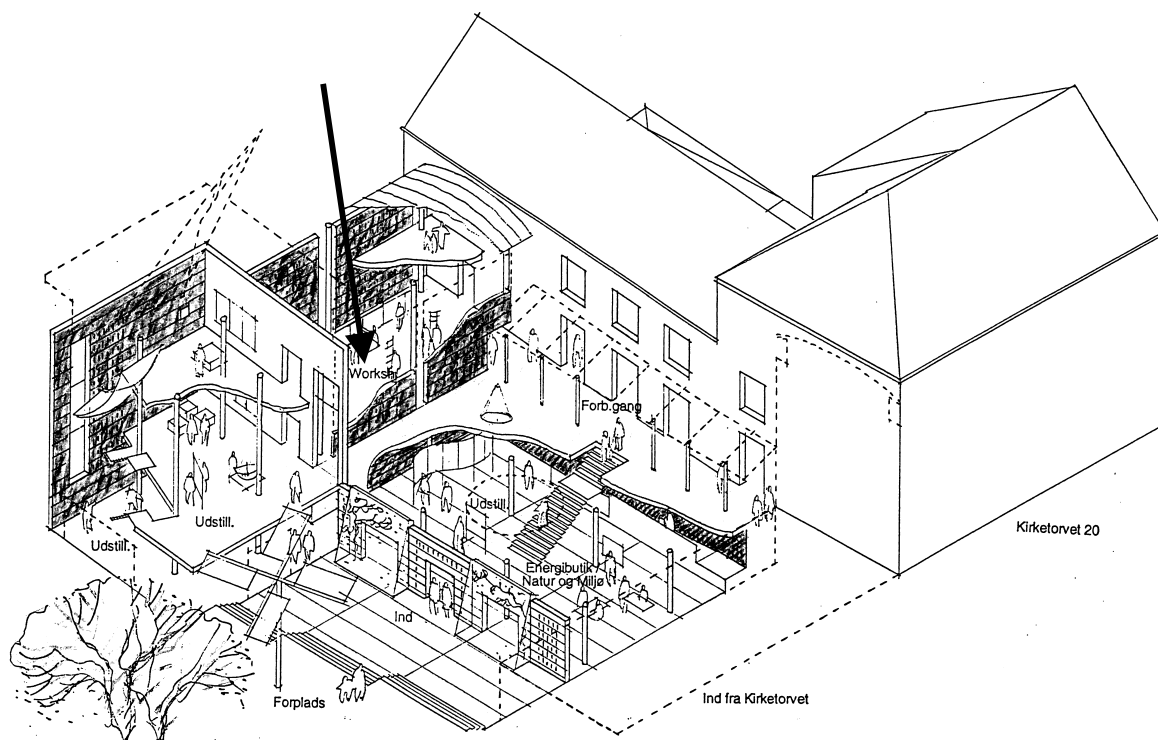
3. Varmevekslerkreds

I dette kapitel beskrives resultaterne af en undersøgelse af den opnåelige genvindingsgrad for et koblet væskebatteri med et kølemiddel som varmetransporterende medium.

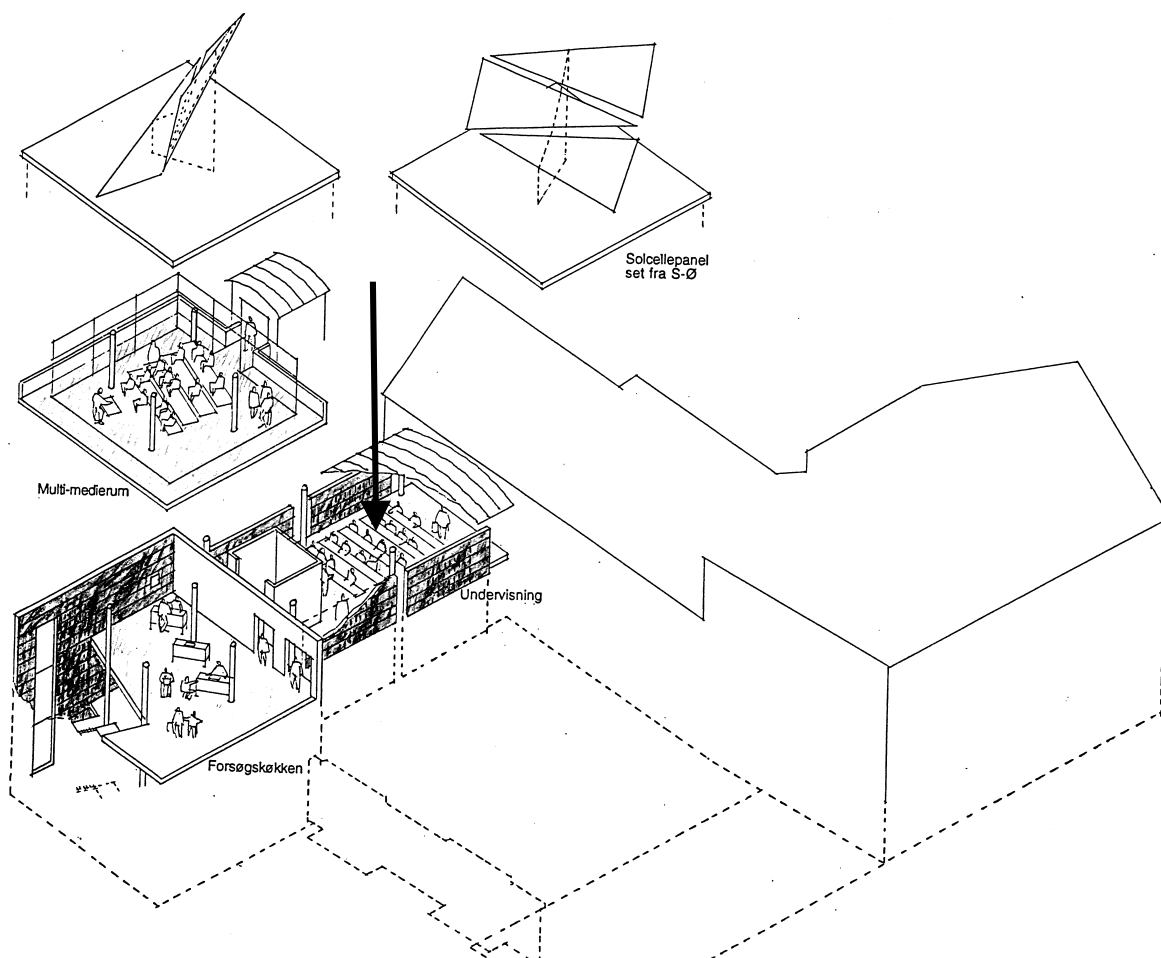
Der er, som det beskrives i de følgende afsnit, opbygget en computer-model af et sådant koblet væskebatteri. Herefter er der foretaget parameteranalyser for at fastlægge udformningen af varmevekslerne samt genvindingsgradens afhængighed af udelufttemperaturen.

Til brug for parameteranalyserne har der været brug for at definere et rum og en ventilationsgrad. Da Vejle kommune har deltaget i projektets følgegruppe, var det naturligt at tage udgangspunkt i ”Grønt Center, Vejle”, der er planlagt til opførelse i Vejle. Konceptet er velegnet til denne bygning og falder helt i tråd med formålet med bygningen. Desuden vil informationsværdien være høj på grund af det sandsynligt store besøgstal.

Figur 3.1-2 viser rumlige snit i Grønt Center, Vejle. I det følgende er der foretaget beregninger for workshop og undervisningslokalerne vist med pilene i figur 3.1-2. Disse rum har hver især et areal på 60 m^2 og en rumhøjde på 3.1 m . Bygningsreglementet angiver, at disse rum skal have et luftskifte på 3 h^{-1} . Dvs. en volumenstrøm af friskluft på $60 \times 3.1 \times 3 = 558 \text{ m}^3/\text{h}$. I de følgende beregninger er der dog også foretaget beregninger for et luftskifte på $1 \text{ h}^{-1} = 156 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figur 3.1. Snit i Grønt Center Vejle. Workshopen er et af de rum, der bruges som eksempel (Exners Tegnestue, 1998).



Figur 3.2. Snit i Grønt Center Vejle. Undervisningslokalet er et af de rum, der bruges som eksempel (Exners Tegnastue, 1998).

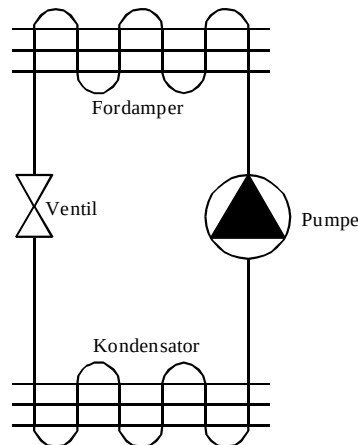
3.1. Undersøgelse af den opnåelige varmegenvindingsgrad

Den opnåelige varmegenvindingsgrad med det foreslåede koncept bestående af et koblet væskebatteri med et kølemiddel som varmetransporterende medium er undersøgt ved hjælp af en edb-model.

3.1.1. Systemudformning i programmet

Det undersøgte system består af to flader (en kondensator og en fordamper), en pumpe, rørføring mellem fladerne samt en trykreducering (repræsenteret i beregningerne ved en ventil). Dette er vist i figur 3.3.

Kondensatoren er placeret i indsugningen, altså nederst i bygningen, og fordamperen er placeret i udblæsningen, altså øverst i bygningen. I fordamperen optages varme fra den udgående luft, hvorved kølemidlet fordamper og i kondensatoren afgives varme til den indgående luft, hvorved kølemidlet kondenserer.



Figur 3.3. Systemudformning i modellen.

Mellem kondensator og fordamper er monteret en cirkulationspumpe, der alene anvendes til at cirkulere det kondenserede kølemiddel. Princippet kan sammenlignes med et køle-/ varmeanlæg, der dog anvender en kompressor til transport af kølemidlet.

Den anvendte systemudformning gør det muligt at anvende systemet til køling om sommeren. Der er dog ikke i nærværende projekt gennemført beregninger til uddybning af dette.

3.1.2. Modellering

Til beregning af nøgletal for varmegenvinding i systemet, har DTI udviklet et redskab i form af et EES-program. EES (Engineering Equation Solver) (Klein and Alvarado, 1998) er meget anvendt indenfor bl.a. køleteknikken, da det indeholder en række funktioner og rutiner, bl.a. for kølemidler, der gør det let anvendeligt.

Udgangspunktet for beregningerne er det maksimale drivtryk, der er til stede. Dette estimeres ved den aktuelle højdeforskel mellem friskluftindtag og afkast samt den aktuelle indsugnings-temperatur (før kondensator) og den aktuelle rumtemperatur (før fordamper).

Beregningerne er foretaget ved udelukkende at se på ét rum. Rummet har som før nævnt et volumen på 186 m^3 . Det forudsættes, at luften opnår rumtemperatur hurtigt efter friskluftindtaget (efter kondensator og eventuel anden varmekilde) – som kurve A eller B i figur 2.2. Der er i beregningerne ikke taget hensyn til eventuelle vindbelastninger på rummet.

Programmet er opbygget med en række input variable samt en tilsvarende række outputs. De vigtigste af disse optegnes automatisk i et diagram, med gengivelse af de vigtigste resultater – se bilaget.

Fladerne, der er anvendt i beregningerne, er identiske lamelflader (ens kondensator og fordamper) med dimensionerne 650/ 650/ 500 mm (h/b/d) . Lamelafstanden er fastsat til 3,5 mm, og der anvendes forsatte rør. I beregningerne er anvendt kølemidlet R290 (Propan), der er miljøneutralt og har termofysiske egenskaber, der gør kølemidlet velegnet til denne type sy-

stem. Der er i det udarbejdede program muligheder for valg af andre typer kølemiddel, bl.a. HCFC'er eller HFC'er, men da de førstnævnte udfases med udgangen af 1999, og de sidstnævnte ønskes udfaset inden for en overskuelig årrække, er det et naturligt valg at anvende kulbrinter som kølemiddel.

3.1.3. Resultater

Der er gennemført en række beregninger for systemet med ovennævnte forudsætninger. Beregningerne er vist i tabel 3.1 for et luftskifte på henholdsvis 1 og 3 gange i timen. Detaljerede udskrifter fra beregningerne kan findes i bilaget.

Be-reg-ning	luft-skifte (pr. h)	Δt (K)	W_pum-pe (W)	W_luft-skifte (W)	Q_c (W)	VGV (-)	Driv-tryk (Pa)	dP_fla-der (Pa)	t_ind (°C)	t_ud (°C)
1	1	37	18	2340	975	0,42	5,04	0,17	3,6	9,7
2	1	35	17	2213	915	0,41	4,73	0,17	4,7	10,6
3	1	33	16	2087	855	0,41	4,43	0,17	5,7	11,5
4	1	31	15	1960	794	0,41	4,13	0,17	6,8	12,4
5	1	29	14	1834	734	0,40	3,83	0,17	7,8	13,4
6	1	27	13	1707	674	0,39	3,54	0,17	8,9	14,3
7	1	25	12	1581	614	0,39	3,26	0,17	9,9	15,3
8	1	23	11	1455	554	0,38	2,97	0,17	11,0	16,2
9	1	21	10	1328	495	0,37	2,70	0,17	12,0	17,1
10	1	19	9	1202	435	0,36	2,42	0,17	13,1	18,1
11	1	17	7	1075	375	0,35	2,15	0,17	14,1	19,0
12	1	15	6	949	316	0,33	1,88	0,17	15,2	20,0
13	1	13	5	822	256	0,31	1,62	0,17	16,2	20,9
14	1	11	4	696	197	0,28	1,36	0,17	17,2	21,8
15	1	9	3	569	138	0,24	1,11	0,17	18,3	22,8
16	1	7	2	443	79	0,18	0,86	0,17	19,3	23,7
17	3	37	52	7020	2813	0,40	5,04	1,52	3,0	10,2
18	3	35	49	6640	2640	0,40	4,73	1,52	4,1	11,1
19	3	33	46	6261	2466	0,39	4,43	1,52	5,2	12,0
20	3	31	43	5881	2293	0,39	4,13	1,52	6,3	12,9
21	3	29	40	5502	2120	0,39	3,83	1,52	7,4	13,8
22	3	27	37	5122	1947	0,38	3,54	1,52	8,5	14,7
23	3	25	34	4743	1775	0,37	3,26	1,52	9,6	15,6
24	3	23	31	4364	1602	0,37	2,97	1,52	10,7	16,5
25	3	21	28	3984	1430	0,36	2,70	1,52	11,7	17,4
26	3	19	25	3605	1257	0,35	2,42	1,52	12,8	18,3
27	3	17	21	3225	1085	0,34	2,15	1,52	13,9	19,2
28	3	15	18	2846	914	0,32	1,88	1,52	15,0	20,1
29	3	13	15	2466	742	0,30	1,62	1,53	16,0	21,0

Tabel 3.1. Resultater fra simuleringerne.

luftskifte (pr. h): luftskifte pr. time

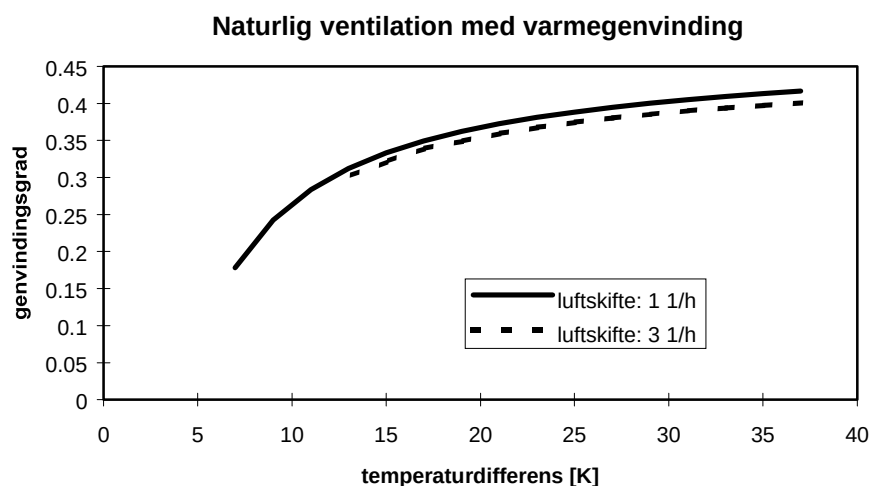
Δt (K): temperaturdifferens mellem ude og inde

W_pumpe (W): tilført effekt til kølemiddelpumpe

$W_{\text{luftskifte}}(W)$:	varmetab ved luftskifte uden varmegenvinding
$Q_c (W)$:	kondensatoreffekt (genvundet varmeeffekt)
VG (-):	varmegenvindingsgrad ($Q_c / W_{\text{luftskifte}}$)
Drivtryk (Pa):	aktuelt drivtryk
$dP_{\text{flader}} (Pa)$:	det samlede tryktab over fladerne
$t_{\text{ind}} (^\circ C)$:	indsugningstemperatur efter kondensator (inden eventuel varmeplade)
$t_{\text{ud}} (^\circ C)$:	udsugningstemperatur efter fordampere

3.1.4. Resultatanalyse

I foregående afsnit er resultaterne af beregningerne vist. I det følgende er disse resultater undersøgt nærmere, bl.a. med henblik på at anskueliggøre, hvor store virkningsgrader, der kan opnås ved naturlig ventilation med varmegenvinding.



Figur 3.4. Genvindingsgrad som funktion af temperaturredifferensen mellem ude og inde samt af luftskiftet.

Figur 3.4 viser den opnåede varmegenvindingsgrad som funktion af temperaturredifferensen mellem ude og inde. Varmegenvindingsgraden er defineret som forholdet mellem den varmemængde, der genvindes og den varmemængde, der i alt bortledes fra rummet.

Det ses, at der ved et luftskifte på 3 gange i timen ikke opnås varmegenvinding ved en temperaturredifferens mindre end 13 K. Dette skyldes, at det aktuelle tryktab overstiger det til opnåelige drivtryk. Drivtrykket kan dog øges ved at placere fordampere højere end de 3,1 m over friskluftindtaget, som er antaget i beregningerne – se kapitel 2. Herved bliver det muligt at have varmegenvinding i hele fyringssæsonen.

Den meget lille differens mellem varmegenvindingsgraden ved henholdsvis 1 og 3 gange luftskifte tilskrives de anvendte flader – varmeoverføringsevnen øges med øget lufthastigheden, mens den overførte energimængde øges jo længere tid, luften opholder sig i varmeveksleren. Ved ændring af geometrien vil ovennævnte differens også blive ændret.

Det ses, at der i størstedelen af fyringssæsonen kan opnås varmegenvindingsgrader på 30 – 40 %. En optimering af systemet vil sandsynligvis kunne lede til højere varmegenvindingsgrader.

Det undersøgte system er udstyret med ens kondensator- og fordamperflade med forsatte rør. Anvendes flugtende rør falder varmegenvindingsgraden - dog kun med 2- 5 %.

Øges lamelafstanden, der i beregningerne er fastsat til 3,5 mm, falder varmegenvindingsgraden ligeledes. Dette skyldes bl.a., at det samlede varmeoverførende areal reduceres, men samtidig ændres strømningsprofilet, og tryktabet falder over fladen.

Da kølemidlet i drift altid har en lavere temperatur end rumluften, vil der være et lille varmetab fra rumluften til kølemidlet i rørene mellem de to vekslere. Denne varmeoverførsel er dog forsvindende i forhold til den overførte energimængde i varmevekslerne, og influerer derfor ikke på systemets funktion. Da rørtemperaturen kan komme under dugpunktstemperaturen, er det tilrådeligt, at rørene isoleres for at undgå kondensdannelse på rørene. Rørene er dog tynde, så en isolering på 5-10 mm vil ikke gøre rørene væsentlig vanskeligere at placere. Der kan benyttes præ-isolerede kobberør.

I de gennemførte beregninger er elforbruget til cirkulationspumpen beregnet. Dette ligger i størrelsesordenen 2 - 52 W afhængig af temperaturer og luftmængder over fladerne. Ved et luftskifte på 3 h^{-1} og en temperaturdifferens på 25 K genvindes ca. 1,8 kW, mens der kun tilføres 34 W til cirkulationspumpen, som principielt er eneste energiforbrugende komponent i systemet. Dvs. en COP på 53. Energiforbruget til cirkulationspumpen er dog i beregningerne forbundet med en stor usikkerhed. Den virkelige COP for systemet kan kun fastlægges præcist ved hjælp af målinger på et faktisk anlæg.

I beregningerne er det antaget, at der er en fordamper og en kondensator for hvert rum. Der er dog ikke umiddelbart noget, der forhindrer en mere central opbygning af systemet. F.eks. med en fælles fordamper og separate kondensatorer i hvert rum.

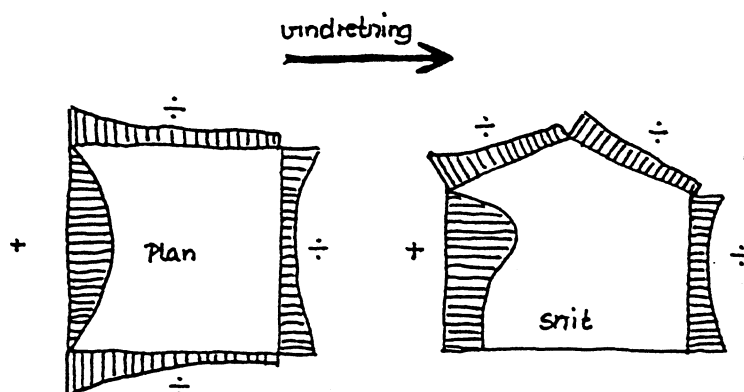
I kapitel 5 er der foretaget en sammenligning mellem det her beskrevne koncept og traditionel mekanisk ventilation.

4. Luftkreds

Som det fremgår af figur 1.3 indeholder det undersøgte koncept ud over vekslerkredsen en hel del andre komponenter til håndtering af frisk- og afkastluft. Disse komponenter bliver diskuteret i nærværende kapitel. Kapitlet er inddelt i underafsnit, der hver omhandler en komponent. Fælles for komponenterne er, at de kun må give anledning til små trykfald samt forhindre, at luften løber den gale vej i systemet.

4.1. Indtag

Friskluftindtaget er et kritisk punkt i konceptet. Konceptet bygger på decentrale friskluftindtag enten direkte gennem klimaskærmen eller gennem en luftsolfanger/solvæg. Indtaget skal helst udformes sådan, at vinden enten øger drivtrykket i systemet eller ikke modvirker det. Dette er svært at opnå, som figur 4.1 viser. Når friskluftindtaget ligger i vindsiden, vil vindtrykket øge drivtrykket, da der opstår overtryk her, men samtidigt vil vinden gøre drivtrykket fluktuerende. Omvendt når friskluftindtaget ligger i læsiden. Her vil vinden skabe et undertryk ved friskluftindtaget, der modvirker drivtrykket i systemet. Da undertrykket i læsiden ikke skabes af indtagets udformning, men alene af placeringen, er det vanskeligt/umuligt at hindre, at der under specielle vindforhold skabes et undertryk ved friskluftindtaget.

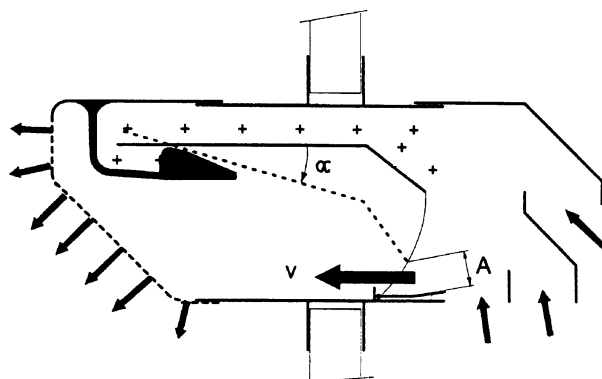


Figur 4.1. Eksempel på trykforhold omkring en bygning som følge af vindpåvirkning (Egedorf, 1990a). + og ÷ angiver henholdsvis over- og undertryk.

En mulighed for at mindske indvirkningen af undertryk ved friskluftindtaget er at sørge for, at der opstår et tilsvarende eller større undertryk ved afkastet, som da vil ophæve effekten af undertrykket ved friskluftindtaget.

En anden mulighed for at hindre undertryk ved friskluftindtaget er at fjerne friskluftindtaget fra bygningens facade, som det for eksempel er gjort i NatVent-projektet (figur 1.4), hvor indtaget er over taget. Her er det muligt at udforme indtaget, så der aldrig er negativt tryk og for det meste et overtryk. I NatVent har det dog medført store tryktab, der mere end ophæver den positive placering af friskluftindtaget. Indtaget kan også føres væk fra bygningen, som det er gjort i Grong (figur 1.8). Her kan indtaget udføres, så det enten neutraliserer vindens indflydelse eller udnytter vinden positivt. En kanal i jorden vil yderligere konditionere luften, men vil måske kræve kanalført fordeling af friskluften inde i bygningen. En kanalføring der ofte vil være dyr og som kan resultere i store tryktab.

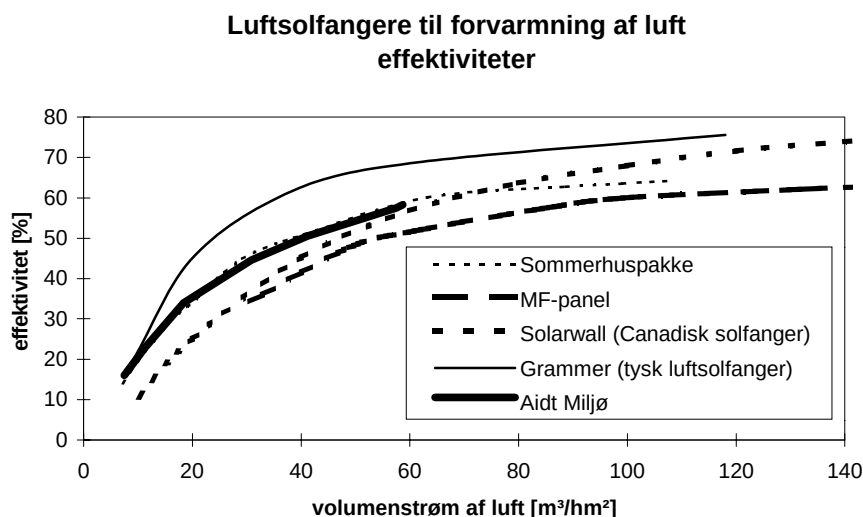
For at sikre tilstrækkelig med friskluft til en bygning, er det nødvendigt at dimensionere efter "worst case". Dvs. at der i størstedelen af tiden vil være et større drivtryk til rådighed end nødvendigt. Det vil lede til et for stort luftskifte og dermed et stort varmetab, hvis det ikke reduceres. Styring af det undersøgte koncept behandles senere i kapitlet, her skal det blot nævnes, at der har været forsket i friskluftventiler, der reducerer volumenstrømmen af friskluft, når drivtrykket er for stort, men som ellers ikke påvirker luftstrømmen. Dette er dels sket i NatVent-projektet, men også i Danmark (Egedorf, 1990b). Figur 4.2. viser et snit i "det passive tryk indtag" udviklet under NatVent.



Figur 4.2. Snit i "det passive tryk indtag" udviklet under NatVent (De Gids, 1997).

4.2. Luftsolfanger/solvæg til forvarmning af friskluften

Friskluften til bygningen kan forvarmes i en luftsolfanger eller solvæg, før den ledes ind i bygningen. Afhængig af størrelsen og effektiviteten af solfangeren kan luften specielt i overgangsperioderne – forår og efterår – ved hjælp af solen opvarmes til over rumtemperaturen. Da det er friskluft med udelufttemperatur, der forvarmes, kan der ske en (mindre) forvarmning af luften selv på overskyede dage. Effektiviteten af en solfanger til forvarmning af friskluft er primært afhængig af volumenstrømmen af luft gennem solfangeren, som det er vist på figur 4.3.



Figur 4.3. Eksempler på effektiviteten for forskellige luftsolfangere til forvarmning af friskluft (Jensen et al, 1997).

Forvarmning af friskluft ved hjælp af luftsolvarme er udførligt behandlet i IEA Task 19-projektet "Solar Energy Systems" (Hastings and Mørck, 1999). Her er kombinationen af luftsolvarme/varmegenvinding dog ikke behandlet. Derfor er et simuleringsprogram udviklet under IEA Task 19 blevet modificeret til at kunne beregne besparelsen for et naturligt ventilationssystem med varmegenvinding, hvor friskluften forvarmes af en luftsolfanger, før den passerer varmegenvindingssystemets varmeplade.

Der tages udgangspunkt i eksemplet fra kapitel 3 (Grønt Center, Vejle) – med en volumenstrøm af luft på 558 m³/h = et luftskifte på 3 gange i timen. Som varmegenvindingsgrad anvendes værdierne fra tabel 3.1 og figur 3.4. Der anvendes desuden solindfald og udelufttemperaturer fra det danske referenceår TRY (SBI, 1982). Udfra figur 4.3 antages følgende sammenhænge mellem areal af solfanger, volumenstrøm af luft pr. m² solfanger og effektivitet for en gennemsnits-luftsolfanger.

Solfanger areal [m ²]	Volumenstrøm [m ³ /hm ²]	Effektivitet [%]
9	60	60
13,5	40	50
18	30	45

Tabel 4.1. Sammenhæng mellem solfangerareal, volumenstrøm af luft gennem solfangeren og effektiviteten af solfangeren.

Tabel 4.2 viser, hvor stor en brugbar mængde energi, som solfangeren kan tilføre friskluften. Da frisklufttemperaturen derved hæves, reduceres dels varmegenvindingsenhedens effektivitet dels den mængde energi, det er muligt at overføre ved hjælp af varmegenvindingsenheden. Derfor er den reelle besparelse også vist – dvs. den samlede besparelse med solfanger og genvinding minus besparelsen ved udelukkende varmegenvinding. Den reelle besparelse som følge af solfangeren udgør ca. 55% af energimængden tilført i solfangeren.

Solfanger areal [m ²]	Energi tilført i solfangeren [kWh/år]	Reel besparelse som følge af solfangeren [kWh/år]
9	1480	790
13,5	1790	980
18	2097	1180

Tabel 4.2. Besparelser som følge af solforvarmning af friskluften.

I ovenstående tilfælde udgør besparelsen mellem 7 og 11% af ventilationstabet uden varmegenvinding og solforvarmning.

Ved valg af luftsolfanger skal det sikres, at der kun er et beskedent trykfald over solfangeren, da solfangeren ellers vil reducere luftskiftet i bygningen. Lavt tryktab er vigtigere end høj effektivitet.

4.3. Eftervarmning af friskluft

Indblæsningsluften må ikke være så kold, at der kan opstå trækgener i forbindelse med tilførsel af den friske luft til bygningen. Indblæsningsluften bør derfor ikke være lavere end ca. 3°C under indelufttemperaturen. I fyringssæsonen vil der være perioder, hvor friskluften er for kold til direkte indblæsning i bygningen, selvom der er tilført varme til luften via genvindingsfladen i indtaget. Dette gælder især i perioder uden sol, hvor luften ikke forvarmes i f.eks. en solvæggen.

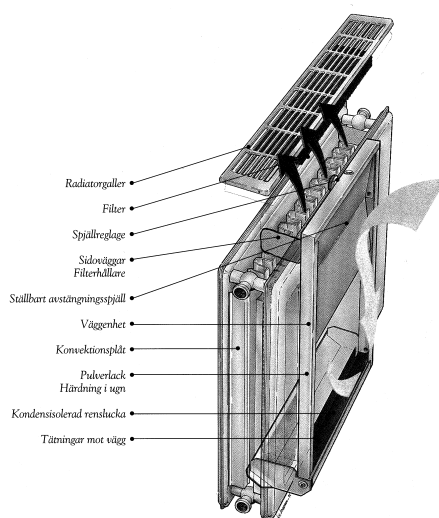
Det er derfor nødvendigt at udforme systemet, så der er mulighed for eftervarmning af friskluften inden indblæsning. Dette kan udføres ved at tilføje en ekstra varmeplade i friskluftkanalen. Denne skal placeres efter genvindingssystemets varmeveksler. Som alle øvrige komponenter i systemet er det vigtigt, at den ekstra varmeplade har et lavt trykfald og samtidig kapacitet nok til at opvarme luften til den ønskede indblæsningstemperatur

En lille undertemperatur på den friske luft, vil sikre den mest effektive ventilation, mens en overtemperatur vil tendere til, at den friske luft vil stige direkte op til loftet og dermed i mindre grad komme opholdszonen tilgode. En overtemperatur skabt af en solfanger vil på den anden side medvirke til en reduktion af rummets varmebehov. Der skal tages hensyn til disse forhold ved design af systemet.

Varmepladen til eftervarmning af friskluften kan udføres som en traditionel luftvarmeveksler placeret i et centralt indtag. Dette er tilfældet i eksemplet fra Grong skole (Tjelflaat og Rødahl, 1997).

I et koncept som dette, hvor der ønskes mulighed for decentrale luftindtag, skal luften kunne eftervarmes decentralt. Dette kan f.eks. foregå ved hjælp af radiatorer, der er placeret i selve opholdsrummet.

I figur 4.4 er vist et svensk radiatorkoncept, hvor ventilationsluft opvarmes gennem en radiator, før den sendes ind i selve opholdszonen. Radiatoren er udformet, så luften strømmer ned langs indersiden og op gennem selve radiatorens varmeplade. Radiatoren fungerer dels som en traditionel radiator, dels som varmeplade til eftervarmning af friskluften. Radiatoren vil typisk være koblet til det eksisterende opvarmningssystem.



Figur 4.4. Epecon Ventus radiator med forvarmning af ventilationsluft (Epecon AB, 1996).

Radiatoren vil selvfølgelig medføre et ekstra trykfald i systemet, men dette kan mindskes ved en videreudvikling af konceptet. Den viste radiator er designet med et direkte luftindtag, hvilket f.eks. betyder, at der er insekt- og pollen-filtre indbygget i radiatoren. Hvis radiatoren skal indbygges i et koncept med varmegenvinding og solvæg, skal radiatoren designes specielt med henblik på dette formål.

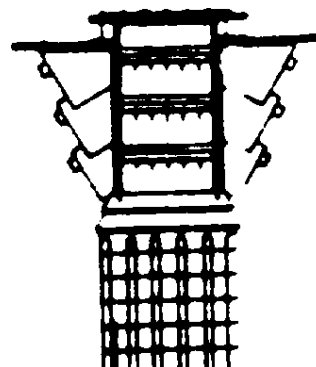
4.4. Afkast

Afkastet bør som de øvrige komponenter i systemet udformes med mindst muligt tryktab. Desuden skal afkastet sikre, at der ikke kommer tilbageløb i afkastkanalen, da dette kan mindske ventilationen væsentligt.

Afkastet skal derfor udformes, så vinden ikke kan skabe et overtryk ved ventilationssystemets udmundning. Ved forskellig udformning af afkastet, kan dette enten neutralisere vindkræfterne, så vinden ikke har indflydelse på drivtrykket, eller sikre at vinden altid skaber et undertryk ved udmundningen. Derved kan vindkræfterne anvendes til at øge drivtrykket i ventilationssystemet. I det følgende gives en række eksempler på udformninger af afkast.

4.4.1. Afkast, der neutraliserer vindeffekter

I Queens Building, De Montfort University i Leicester, UK anvendes udelukkende naturlige drivkræfter til ventilation. Bygningen er udstyret med en række ventilationstårne til forøgelse af drivtrykket. Tårnene er firkantede og udstyret med hætter, der bremser vinden i alle fire retninger. Derved neutraliseres vindpåvirkninger, uanset vindretningen, så afkastluften altid kan komme ud af systemet. Ventilationstårnene i Queens Building er vist i figur 4.5.

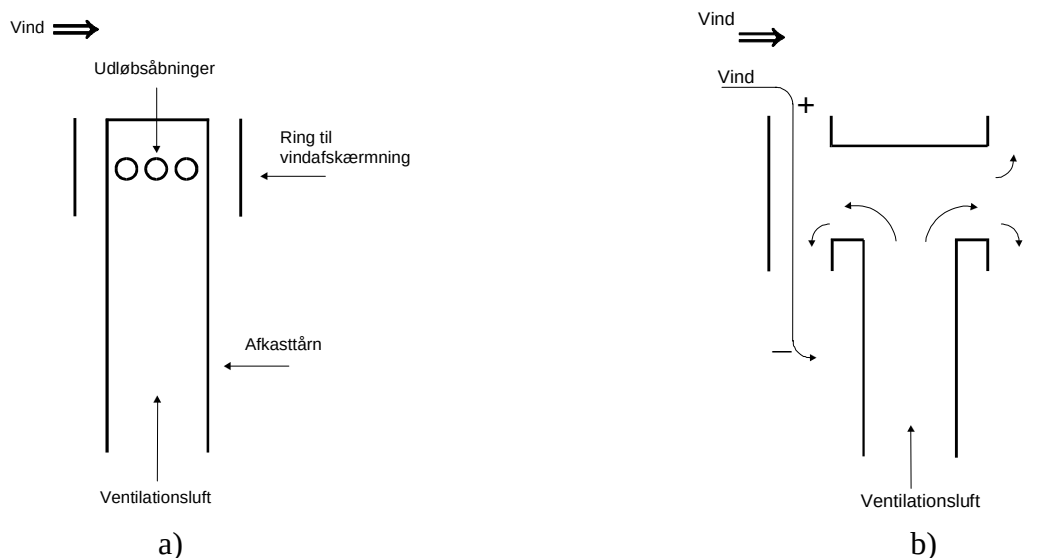


Figur 4.5. Ventilationstårne på Queens Building i Leicester, UK. Til højre er vist en skitse af princippet i afkastet (Architecture Today, 1991).

Vindkræfterne kan også elimineres ved at udforme afkastet med en vindafskærmning. Et eksempel på dette er vist i skitsen i figur 4.6 a). Her lukkes ventilationsluften ud af åbninger i siden på afkastkanalen. Uden om udløbet er placeret en afskærmning, som forhindrer vinden i

at skabe et overtryk ved udløbsåbningerne. Vinden kan give en luftbevægelse mellem afkastkanalen og afskærmningsringen. Vindens bevægelse i afkastet skaber ikke et drivtryk for ventilationen, men sikrer at afkastluften fra bygningen altid uhindret kan komme ud.

Udløbet kan også udformes med udløb til flere sider, så der uanset vindretningen altid kan skabes et undertryk ved nogle af udløbene. Derved har ventilationsluften mulighed for at komme ud, selvom der er overtryk ved en del af åbningerne. En skitse af en sådan udformning er vist i figur 4.6 b). + og – angiver henholdsvis, at vinden ét sted skaber et overtryk, mens der et andet sted bliver et lille undertryk, hvor luften kan komme ud. De to typer afkast benytter sig af samme koncept til neutralisering af vindeffekten.



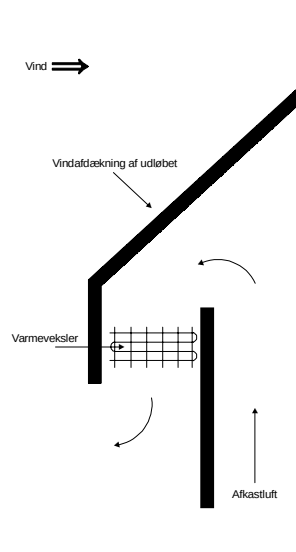
Figur 4.6. Neutralisering af vindeffekter ved a) afskærmning af udløbet med en ring eller b) med udløb til mange sider. I begge tilfælde vil der altid være åbninger, hvor afkastluften kan komme ud.

Det kan være fordelagtigt at placere veksleren til varmegenvindingen øverst i afkastkanalen. Derved kan veksleren udnytte den ekstra temperaturstigning, der er sket i en eventuel solskorsten, som et bidrag til forvarmning af luften i indtaget. Efter varmeveksleren vil temperaturen af luften være lavere end før veksleren. Dette vil nedsætte drivtrykket lidt, hvis luften efter veksleren stadig skal bevæge sig opad. Hvis luften i stedet kan strømme nedad, kan afkølingen af luften bidrage med et drivtryk i den rigtige retning. En skitse af dette princip er vist i figur 4.7.

I perioder uden sol kan det dog risikeres, at luften afkøles i solskorstenen, hvorved der bliver mindre varme, der kan overføres i varmevekslerkredsen. Hvis der er stor risiko for varmetab i skorstenen, bør varmeveksleren ikke placeres efter denne.

4.4.2 Afkast, der udnytter vindkræfter til at skabe drivtryk

I stedet for blot at eliminere vindeffekterne, kan disse udnyttes til at skabe drivtryk i ventilationssystemet. Luften skal altid kunne forlade systemet i den retning, hvor vinden skaber et undertryk. Dette kræver oftest en form for styring af udløbet.



Figur 4.7. Skitse af afkast med varmeveksler placeret i udløbet.

Nedenstående figur 4.8 viser et udsnit af tagfladen fra Slättängsskolan i Borås, Sverige, der udelukkende anvender naturlig ventilation. Her er anvendt to forskellige former for ventilationsafkast. Skolen er forsynet med små tårne med oplukkelige vinduer i alle retninger. Alt efter vindretningen kan vinduerne i læsiden åbnes. I læsiden er der et vindskabt undertryk, der hjælper med til at suge luften ud af bygningen. I dette tilfælde betjenes vinduerne manuelt, men princippet kan også anvendes med automatisk betjente vinduer.

Udover ventilationstårnene anvendes i Slättängsskolan en række ventilationshætter, der alle er forsynet med en lille vejrhane. Disse udnytter vinden til at dreje udløbet, så det altid vender mod læsiden. Det har den fordel, at drejningen foregår automatisk, samt at der ikke skal anvendes et styresystem.



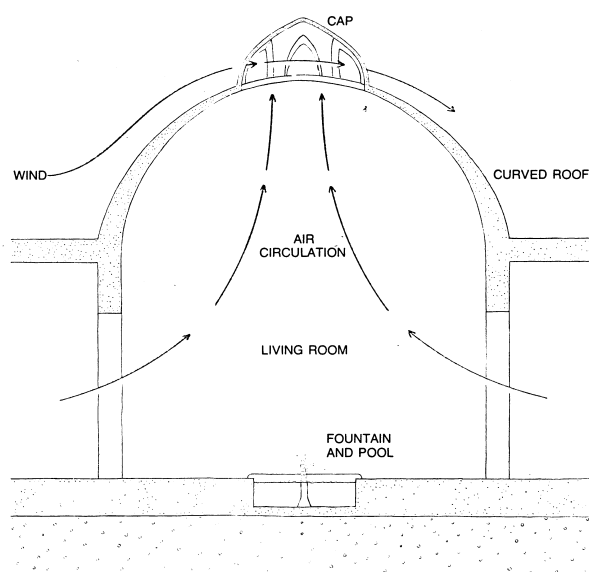
Figur 4.8. Ventilationsafkast på Slättängsskolan i Borås, Sverige

På Egebjergskolen i Ballerup, DK anvendes også naturlig ventilation i en del af skolen. Her er afkastet ligeledes udformet som et lille tårn med oplukkelige vinduer i alle retninger. Vinduerne styres automatisk, så de altid er lukkede i vindsiden og åbne i læsiden. Ventilationstårnet er desuden forsynet med solfangere, så luften yderligere kan opvarmes inden afkastet. Derved udnyttes både sol- og vindkræfter til at øge drivtrykket i systemet. Et billede fra opbygningsfasen af Egebjergskolens ventilationssystem er vist i figur 4.9. På taget ses ventilationstårnet med de oplukkelige vinduer. Solfangerne er placeret lige under vinduerne.



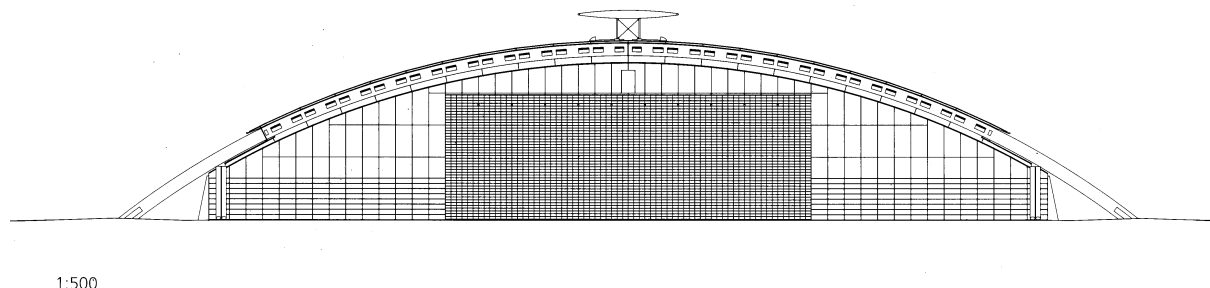
Figur 4.9. Billede af Egebjergskolen.

Det er også muligt at udforme selve taget, så der altid vil være undertryk et bestemt sted, f.eks. på tagets højeste punkt. I figur 4.10 er vist et eksempel fra Iran, hvor naturlig ventilation anvendes til køling af bygningerne. Det buede tag bevirker, at vindhastigheden stiger hen over taget, hvilket får trykket ved toppen til at falde. Afkastet beskyttes af en hætte med en række åbninger til alle sider.

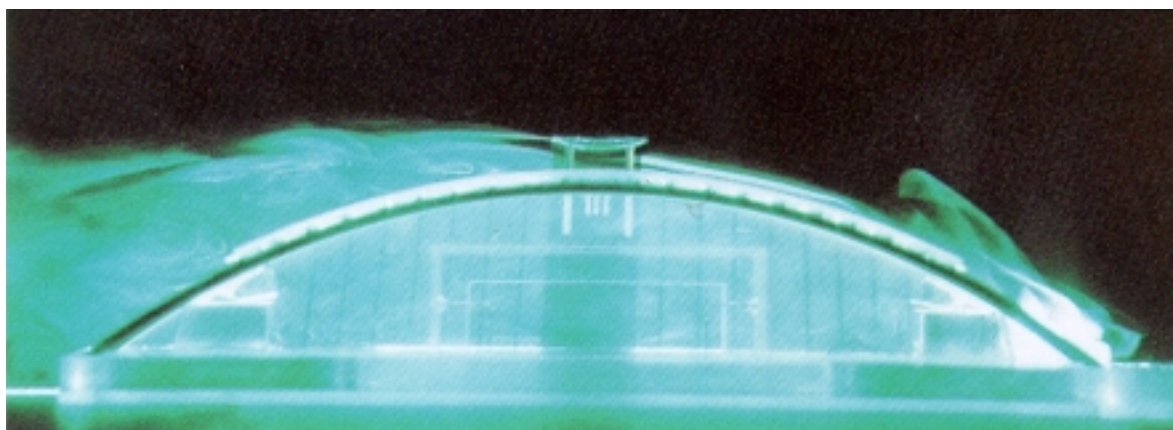


Figur 4.10. Naturlig ventilation anvendt til køling i Iran (Bahadori, 1978).

Figur 4.11 viser en kongres- og udstillingsbygning af den tyske arkitekt Thomas Herzog, der dels anvendes samme princip som ved bygningen i figur 4.11, dels accelereres vinden yderligere op ved at passere en arealindsnævring ved luftafkastet i toppen af bygningen i form af en spoiler. Figur 4.12 viser ved hjælp af et modelforsøg luftstrømningen omkring bygningen – som det ses, skabes der et sug ved luftafkastet.

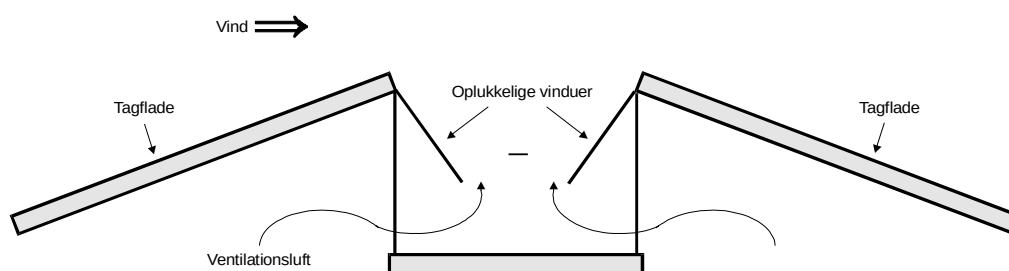


Figur 4.11. Kongers- og udstillingsbygning i Linz set fra gavlen (Herzog, 1994).



Figur 4.12. Luftstrømning omkring bygningen vist ved modelforøg (Herzog, 1994).

Ved at placere afkastet fra ventilationssystemet i en fordybning i taget, kan der skabes et undertryk i fordybningen, der vil suge luften ud af bygningen. I figur 4.13 er vist en skitse, hvor et sæt oplukkelige vinduer er placeret i en nedsænkning i taget. Vinden vil strømme langs tagfladerne og danner et undertryk nede i fordybningen, uanset vindretningen. Dette får ventilationsluften til at strømme ud af bygningen.



Figur 4.13. Skitse af tagflade med åbninger i fordybning

En anden mulighed for forøgelse af drivtrykket ved hjælp af vinden er anvendelse af roterende aftrækshætter som vist i figur 4.14. Ventilatoren er udformet som en kugle, der er slidset op i siderne. Slidserne tjener både som vinger for vinden og som ventilator i kanalen. En alternativ udformning er, at slidserne udelukkende tjener som vinger for vinden. Kuglen er da forbundet til en ventilator nede i kanalen, som den driver.



Figur 4.14. Eksempel på roterende aftrækshætte (Air Vent, 1999).

Resultater fra afprøvning af to roterende aftrækshætter er beskrevet i (Egedorf, 1995). Ved en lufthastighed på 5 m/s vil de to roterende aftrækshætter yde et maksimalt sugetryk på mellem 12 og 19 Pa. Men uden vind eller kun lidt vind, vil aftrækshætterne forøge systemets tryktab, dog mindre end en traditionel skydespalte eller vægventil. Uden vind og med en volumenstrøm gennem aftrækshætterne på 60 m³/h er tryktabet over de undersøgte aftrækshætter mellem 5 og 15 Pa. Ud fra (Egedorf, 1995) ser det ud til, at der er følgende sammenhæng mellem sugetryk og tryktab ved vindstille: Jo større sugetryk aftrækshætten kan præstere, jo højere er tryktabet ved vindstille. Der er dog behov for en nærmere undersøgelse for mere præcist at fastlægge fordele og ulemper ved anvendelse af roterende taghætter.

4.5. Solskorstene

En solskorsten i afkastet kan bidrage til drivtrykket på to områder. Først og fremmest hæves udløbet, hvilket giver en større højdeforskel mellem indtag og afkast. I perioder med sol vil solskorstenen desuden opvarme den i forvejen forholdsvis varme indeluft, inden den sendes ud til udeklimaet. Dette øger drivtrykket yderligere, idet der skabes en større temperaturdifférens mellem afkastluften og udeluften.

Brug af en solskorsten er velegnet i sommerperioden, hvor der ellers kun er et lille termisk drivtryk til rådighed, og hvor der kan være behov for forøget ventilation til køling af bygnin-

gen. Det drivtryk, der skabes af solskorstenen, stiger med solindfaldet, så der er mulighed for forøget ventilation i de perioder, hvor der er meget sol.

Hvis luften også skal igennem solfangeren i perioder, hvor der ikke er sol, er et lavt trykfald i solskorstenen er meget vigtigt. Et lavt trykfald kan sikres med kanaler med et stort tværsnitsareal. Luftkanalernes tværsnitsareal må dog ikke blive så store, at der kan dannes intern luftcirkulation i kanalerne. Det vil sige, at luften kan stige opad langs de varme kanalvægge og løbe nedad langs de koldere vægge. Dette vil mindske drivtrykket.

Solskorstenen skal desuden være godt isoleret, så der ikke i vinterperioder og perioder uden sol kan ske et væsentligt varmetab fra solskorstenen. Luften fra bygningen må ikke blive væsentligt afkølet gennem solskorstenen. Afkøling af luften vil dels betyde en formindskelse af drivtrykket og dels medføre, at der langs skorstenens sider vil være en nedadrettet luftstrømning. Er dette tilfældet, bør solskorstenen bypasses.

Luftkanaler med store tværsnitsarealer vil medføre en dårligere varmeovergang fra solskorstenens sider til luften, hvilket giver en dårligere effektivitet for solskorstenen. En effektiv solfanger vil til gengæld hæve lufttemperaturen og dermed drivtrykket mere, men der er stor risiko for, at forøgelsen af drivtrykket vil blive mindre end forøgelsen af tryktabet over solskorstenen. Et lavt trykfald er derfor vigtigere end en god solfangereffektivitet.

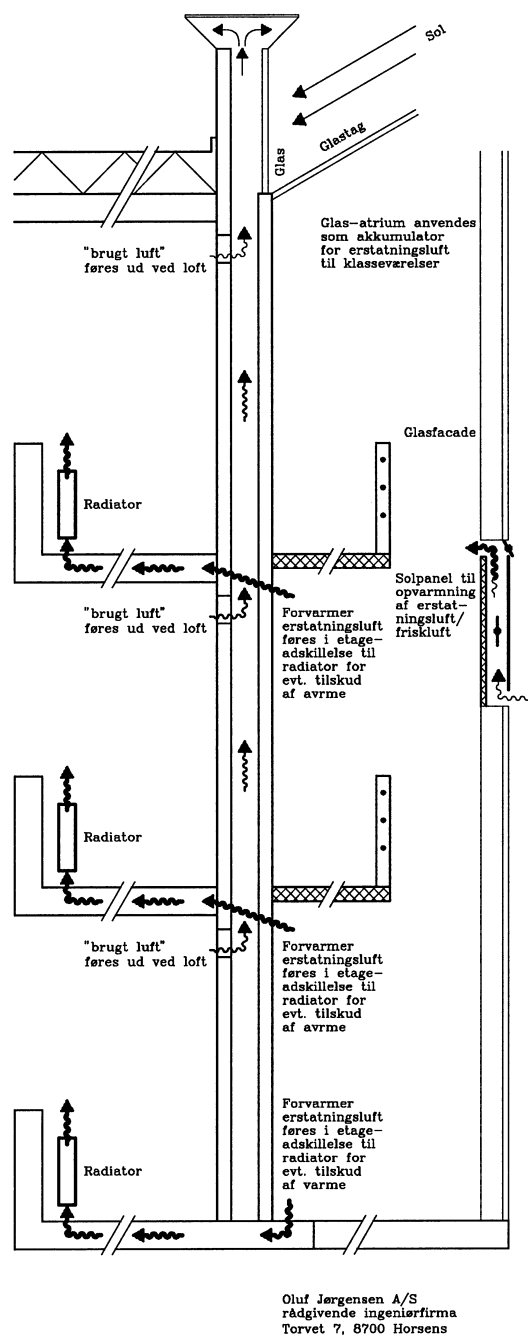
Solskorstenen kan placeres før varmegenvindingens fordamper, idet den ekstra varmetilførsel i solskorstenen derved kan nyttiggøres til forvarmning af friskluften via genvindingssystemet. Dette vil være fordelagtigt i perioder med sol. Der kan dog være andre perioder, hvor solskorstenen vil medføre et varmetab fra luften, hvorved der bliver mindre varme at genvinde i fordampere. Det kan derfor diskuteres, hvorvidt solskorstenen bør placeres før eller efter varmeveksleren.

I det følgende gives et par eksempler på udformning af solskorstene.

Laboratoriemålinger i forbindelse med SaveHeat-projektet har vist, at en solskorsten med en højde på 2 m og et indre tværsnitsareal på 0,2 m x 1 m, kan forøge luftmængden med op til 47% i forhold til en tilsvarende skorsten uden solfanger (Sirén et al., 1997) – se også figur 1.7. Den positive effekt af en solskorsten på drivtrykket er altså betydelig. I den opbyggede prototype har man forsøgt at undgå problemet med intern cirkulation i skorstenen ved at inddele denne i en række mindre lodrette kanaler, som dog stadig er så store, at trykfaldet ikke bliver for stort. Et billede af solskorstenen i SaveHeat-prototypen er vist i figur 1.5 i kapitel 1, hvor bl.a. kanalinddelingerne kan ses. Kanaladskillelserne fungerer samtidig som en forøgelse af det varmeoverførende areal, hvilket bidrager til at forbedre effektiviteten. Luften opnår desuden en mere ensartet temperaturstigning.

Det nye pædagogseminarium i Ikast anvender naturlig ventilation med solassistance bl.a. i form af en solskorsten i afkastkanalen. Derudover udstyres bygningen bl.a. med et atrium samt solvægge til forvarmning af friskluften. Det er det første byggeri i Danmark, hvor solassistance er benyttet konsekvent i forbindelse med naturlig ventilation. En skitse af systemet er vist i figur 4.15.

IKAST SEMINARIET Solassisteret naturlig ventilation



Figur 4.15. Ventilationsprincippet i det nye pædagogseminarium i Ikast.

I The Inland Revenue Building i Nottingham, England anvendes trappetårne til forøgelse af den naturlige ventilation. Trappetårnenes tage kan hæves og sænkes hydraulisk, hvorved ventilationsraten kan styres. Tårnene er glaskonstruktioner, hvor solindfaldet opvarmer luften inden udløbet. Derved virker trappetårnene som solskorstene. Et trappetårn fra The Inland Revenue Building er vist i figur 4.16.



Figur 4.16. The inland Revenue Building (Herzog, 1996)

4.6. Styring af systemet

De naturlige drivtryk er fluktuerende på grund af det varierende udeklima. Dels ændrer drivtrykket sig med årstiderne, men der er også i høj grad korttidssvingninger. Dette kan resultere i meget svingende ventilationsmængder og rumtemperaturer, hvis ikke ventilationssystemet kan styres.

Der kan vælges forskellige styringsstrategier for et ventilationssystem. I traditionelle mekaniske ventilationssystemer vælges ofte at tilføre en konstant mængde friskluft, i kontorbyggeri dog eventuelt med en nedsættelse af ventilationsmængden i nattetimerne. Det er nødvendigt, at ventilationsmængden altid er så stor, at den ønskede luftkvalitet overholdes. Med en konstant ventilationsrate vil der derfor være perioder, hvor der tilføres mere luft, end der er behov for. Dette gælder også i et system med naturlig ventilation, fordi de termiske drivkræfter eller vindeffekter ofte kan give for store drivtryk.

For at spare energi til opvarmning af friskluften er det en fordel at variere ventilationsraten efter det gældende behov for frisk luft. Dette gælder især for systemer med naturlig ventilation, fordi varmegenvindingsgraden oftest vil være lavere end for et tilsvarende mekanisk system. Ved behovstilpasset ventilation styres ventilationsraten, så der tilføres lige netop så meget frisk luft, at den ønskede luftkvalitet overholdes.

I et naturligt ventilationssystem er det nødvendigt at have et mål for ventilationsraten, uanset om der ønskes konstant eller behovstilpasset ventilation. Dette skyldes, at der ikke findes en ventilator, der kan levere en fast luftmængde. Måling af CO₂-koncentrationen vha. en sensor i

opholdszonen er en ofte anvendt metode til behovsstyring af ventilationsraten. CO₂-koncentrationen er et godt mål for, hvor mange personer, der opholder sig i bygningen, men den kan ikke tage hensyn til andre forureningskomponenter, f.eks. afgang fra materialer mm. Denne styringsmetode er derfor mest egnet i tilfælde, hvor personer udgør de væsentligste forureningskilder i indeklimaet.

For at sikre en tilstrækkelig ventilationsrate er det nødvendigt at systemet udformes med variabel varmegenvinding, f.eks. ved hjælp af styrbare bypass-spjæld, så dele af luftstrømmen kan dirigeres udenom varmevekslerne, hvis der ikke er drivtryk nok til fuld varmegenvinding, eller hvis der ikke er behov for genvinding. Der skal også være mulighed for at indtage friskluften udenom solvæggen for at undgå alt for høje indblæsningstemperaturer i sommerperioden. Mulig placering af spjæld i systemet er vist i figur 4.18.

I perioder med for stort drivtryk må ventilationsraten styres med reguleringsspjæld. Det kan diskuteres, hvorvidt spjældet bør placeres i indtaget eller i afkastet, eller om der eventuelt bør være et spjæld begge steder.

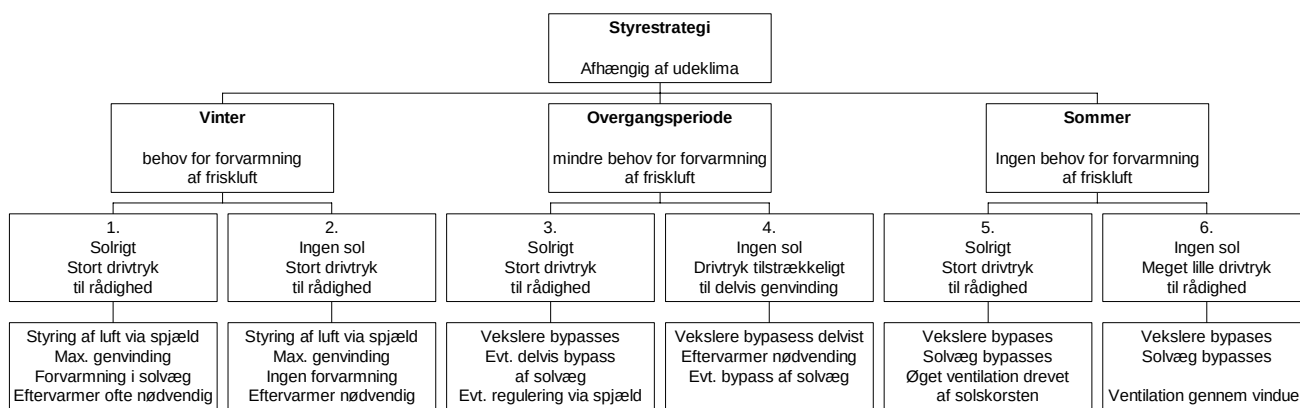
En for høj luftmængde i indtaget vil bidrage til et forøget varmebehov og dermed energiforbrug, og der kan i kolde perioder være risiko for trækgener. Dette kan tale for at placere reguleringsspjældet i indtaget. Et stort drivtryk i afkastkanalen kan dog så medføre, at systemet vil virke som aftræksventilation, hvor luften suges ind i bygningen via infiltration dvs. uden om indtaget. Dette forøger ligeledes varmebehovet og giver anledning til trækgener. Dette kan undgås ved placering af reguleringsspjældet i afkastet.

Forskellige styresituationer er optegnet i et diagram i figur 4.17. Der kan i alt skelnes mellem 6 forskellige driftssituationer for et anlæg med fuld solassistance, idet der er set bort fra vindpåvirkninger:

1. Vinter, koldt og solrigt
2. Vinter, koldt og ingen sol
3. Overgangsperiode, solrigt, solvæggen forvarmer luften tilstrækkeligt
4. Overgangsperiode, ingen sol, solvæggen forvarmer ikke luften tilstrækkeligt
5. Sommer, varmt og solrigt
6. Sommer, varmt men ingen eller kun lidt sol

Uden solassistance reduceres antallet af driftssituationer til 3 – vinter, overgangsperiode og sommer, idet det ikke er nødvendigt at tage hensyn til solindfaldet.

I tilfælde 1 er udetemperaturen lav, hvilket giver et stort termisk drivtryk. Desuden kan solen øge drivtrykket yderligere, hvilket betyder, at der er rigeligt drivtryk til rådighed for systemet. Luften forvarmes i solvæggen, og alt luften føres gennem varmevekslerne. Den maksimalt mulige varmegenvindingsgrad opnås. Det er desuden ofte nødvendigt at eftervarme luften inden indblæsning, så den ønskede indblæsningstemperatur opnås. Alle bypass-spjæld er lukkede i dette tilfælde. Ventilationsraten styres med reguleringsspjæld.



Figur 4.17. Principdiagram for styring af naturligt ventilationssystem.

Tilfælde 2 beskriver en situation, hvor det termiske drivtryk stadig er stort nok til fuld varmegenvinding, men solvæggen forvarmer ikke luften inden veksleren. Friskluften skal derfor eftervarmes inden indblæsning. Afhængig af systemudformningen kan solvæggen eventuelt bypasses.

I forår og efterår er udetemperaturen højere, hvilket giver et lavere termisk drivtryk. Der er ikke altid mulighed for fuld varmegenvinding, men behovet for opvarmning af friskluften er også mindre. I perioder med sol – tilfælde 3 – kan solen øge drivtrykket, men opvarmer også luften i indtaget, så varmegenvinding ofte ikke er nødvendig. Derfor kan vekslerne ofte bypasses, så systemets tryktab mindskes. Det kan være nødvendigt at regulere luftmængden med et spjæld.

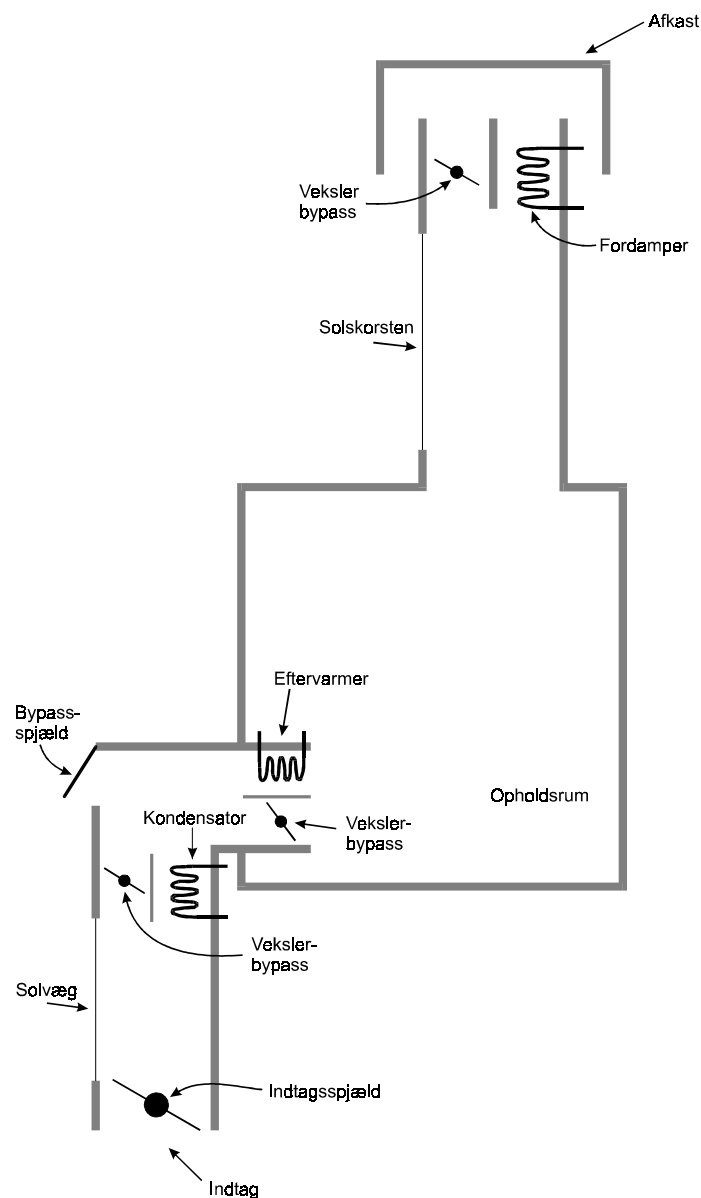
Hvis solvæggen ikke kan forvarme friskluften tilstrækkeligt på grund af for lidt sol, vil det være ønskeligt at indkoble varmegenvindingssystemet (tilfælde 4). Da drivtrykket på grund af den forholdsvis høje udetemperatur er ret lille, vil det måske kun være muligt at foretage varmegenvinding på en del af luftmængden, og der vil være situationer, hvor eftervarmning er nødvendig. Alt efter systemets udformning kan luften eventuelt bypasses solvæggen for at mindske tryktabet og forøge mulighederne for varmegenvinding.

I sommerperioden er der ikke brug for forvarmning af friskluften. Da udetemperaturen ligger tæt på indetemperaturen er drivtrykket lille. Luften kan evt. føres udenom både solvæg og varmevekslere i indløb og afkast. Derved mindskes systemets tryktab og overophedning af luften i solvæggen undgås. På solrige dage – tilfælde 5 - kan solskorstenen give et stort drivtryk, der kan anvendes til at øge ventilationsraten.

Hvis der er høje udetemperaturer, men hverken sol eller vind (tilfælde 6), vil der kun være et meget lille drivtryk til rådighed. Det kan i denne situation være svært at opretholde den ønskede ventilationsrate via ventilationssystemet. Behovet for frisk luft må så opfyldes ved åbning af vinduer. Denne situation vil også opstå, hvis udetemperaturen bliver højere end inde-temperaturen.

Styresystemet skal opbygges med mindst 2 sensorer, en temperaturføler i friskluftindtaget og en føler til bestemmelse af ventilationsraten (f.eks. i form af en CO₂-føler eller lufthastighedsføler). Styring af ventilationssystemet påvirker både luftmængden og temperaturen i indblæsningen, og der stilles indeklimamæssige krav til begge parametre. Styresystemet skal tage

hensyn til, at det ikke er muligt at regulere den ene parameter uden at påvirke den anden. F.eks. giver en åbning af et bypass-spjæld uden om varmeveksleren i indtaget både anledning til et større luftflow, men også til en lavere indblæsningstemperatur. Desuden skal hver sensor have mulighed for at ændre flere forskellige spjæld. En mulig styringsstrategi for et system som dette kan eventuelt være fuzzy-logic. En skitse af systemet med spjæld er vist i figur 4.18 nedenfor.



Figur 4.18. Det benyttede koncept med spjæld til styring og regulering af ventilationssystemet.

Figur 4.18 viser et fuldt udbygget styresystem for naturlig ventilation med varmegenvinding og solassistance. I et system med kun varmegenvinding vil styresystemet være mere enkelt. I sin mest enkle form bestående af en føler til bestemmelse af ventilationsmængden (CO_2 -føler eller lufthastighedsføler) samt et spjæld til regulering af ventilationsmængden.

5. Sammenligning med mekanisk ventilation

De foregående kapitler beskriver det undersøgte koncept og resultaterne fra undersøgelserne. Som det fremgår af indledningen skal dette koncept ses som et alternativ til traditionel mekanisk ventilation. Det er derfor interessant at foretage en sammenligning mellem dette koncept og mekanisk ventilation.

5.1. Energibehov ved forskellige ventilationsprincipper

I dette afsnit tages der udgangspunkt i resultaterne fra kapitel 3, hvor varmegenvindingsgraden for det undersøgte koncept er fastlagt. Der tages ligeledes udgangspunkt i ventilationsbehovene fra kapitel 3 – henholdsvis 186 og 558 m³/h, svarende til et luftskifte på henholdsvis 1 og 3 h⁻¹.

Konceptet sammenlignes dels med traditionel balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding – varmegenvindingsgrad = 60%, og dels med afkastventilation, da det undersøgte koncept kan erstatte disse ventilationsløsninger. Der sammenlignes kun ”rene” ventilationssystemer – dvs. uden forvarmning i en solfanger/solvæg og uden solskorsten.

Til beregning af energibehovet til opvarmning af ventilationsluften for de tre ventilationsprincipper er anvendt et lille til formålet opbygget simuleringsprogram, der time for time beregner opvarmningsbehovet. Opvarmningsbehovet beregnes på baggrund af udelufttemperaturen angivet i det danske referenceår TRY (SBI, 1982). For naturlig ventilation med varmegenvinding anvendes varmegenvindingsgraderne vist i figur 3.4, mens der for den balancerede ventilation med varmegenvinding anvendes en fast varmegenvindingsgrad på 60%.

Tabel 5.1 viser energibehovene for de tre ventilationsprincipper. Energibehovene er vist normaliseret på baggrund af ventilationsmængden pr. time, idet energibehovene tilnærmelsesvis er en lineær funktion af ventilationsmængden. Der er i beregningerne af opvarmningsbehovet anvendt en afkasttemperatur på 21°C. Til beregning af primærenergiforbruget antages det, at opvarmning af ventilationsluft har en effektivitet på 85%, mens effektiviteten for et nyt kulfyret elværk antages at være 46% (Rambøll, 1997).

Ventilationsprincip	Opvarmningsbehov kWh/år pr. m ³ /h	Elektricitetsforbrug kWh/år pr. m ³ /h	Primærenergi kWh/år pr. m ³ /h
Naturlig ventilation med varmegenvinding	22	0,15 ¹⁾	26
Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding	14	6 ²⁾	30
Afkastventilation	35	3 ²⁾	48

Tabel 5.1. Sammenligning af energiforbrug ved anvendelse af de tre ventilationsprincipper.

¹⁾ Elforbrug til cirkulationspumpen i systemet,

²⁾ (DTI, 1995).

Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding har det laveste energiforbrug i bygningen - 20 kWh/år pr. m³/h mod 22 kWh/år pr. m³/h for naturlig ventilation med varmegenvinding. Ses derimod på energiforbruget af primærenergi, er forholdet omvendt. Her er energiforbruget lavest ved naturlig ventilation med varmegenvinding: 26 kWh/år pr. m³/h mod 30 kWh/år pr. m³/h for balanceret mekanisk ventilation. Dvs. primærenergibehovet ved naturlig ventilation er 15% lavere end ved mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Forbruget af primærenergi for naturlig ventilation med varmegenvinding er næsten kun det halve af primærenergiforbruget i forbindelse med afkastventilation.

Det lavere forbrug i primærenergi ved naturlig ventilation med varmegenvinding vil være endnu lavere i forhold til mekanisk ventilation, hvis der ikke blev regnet med effektiviteten for et nyt elektricitetsværk, men i stedet med effektiviteten for det danske elsystem i dag, der er lavere. Desuden har naturlig ventilation den fordel, at elforbruget også mindskes i sommermånederne, hvor det ikke er muligt at afsætte kraftvarmeværkernes overproduktion af varme.

Med solassistance kan yderligere opnås en besparelse i opvarmningsbehovet af friskluften (se afsnit 4.2), hvilket vil give et endnu mindre forbrug af primærenergi.

5.2. Økonomi

Det har ikke i nærværende projekt været muligt at foretage en detaljeret økonomisk sammenligning mellem det undersøgte koncept og traditionel ventilation.

Konklusionen fra delprojektet i NatVent vedr. naturlig ventilation med varmegenvinding var, at systemet er dyrere end traditionel mekanisk ventilation med varmegenvinding (se afsnit 1.3.1). Det kan ikke undre, da systemet indeholder en lige så stor kanalføring som traditionel mekanisk ventilation.

Det her undersøgte koncept har en kortere føringsvej for friskluften, hvilket må medføre en lavere installationspris end i NatVent-projektet. Et hurtigt overslag angiver prisen på vekslerkreds inkl. installation og styring af denne del af systemet til lige under 30.000,- kr. (ekskl. moms) for systemet beregnet i kapitel 3. Hertil kommer styring af luftstrømmen samt konstruktionsmæssige ændringer i bygningen. Prisen for det sidste er svært at udtale sig om, men det anses for muligt at holde den samlede pris under prisen for balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding, der ligger på omkring 100,- kr. pr. m³/h cirkuleret luft – dvs. omkring 56.000,- kr. (ekskl. moms) for et anlæg til et rum som i kapitel 3.

5.3. Sammenfatning

Undersøgelserne viser, at naturlig ventilation kan have et lavere primærenergi-forbrug end traditionel mekanisk ventilation, samt at der er mulighed for, at systemet ikke er dyrere end balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding.

En endelig afklaring på ovenstående kan dog kun opnås ved at installere naturlig ventilation med varmegenvinding i en bygning.

6. Solvent98

I forbindelse med projektet er der udviklet et program - Solvent98 - til beregninger på solassisteret naturlig ventilation med varmegenvinding. Programmet er udviklet i regnearksprogrammet Excel 97 for at give et hurtigt og simpelt program med en let tilgængelig brugerflade. Det er udviklet af studerende ved DTU i Helsingør, som har udført programmeringen som en del af deres eksamensprojekt. En detaljeret dokumentation for programmet og dets forudsætninger er givet i (Florin og Jespersen, 1998)

Formålet med udviklingen af programmet har været at frembringe et simpelt og let anvendeligt værktøj, der kan give et hurtigt overblik over sammenhørende værdier af drivtryk, luftskifte og opnåelig varmegenvindingsgrad for en given bygning med naturlig ventilation.

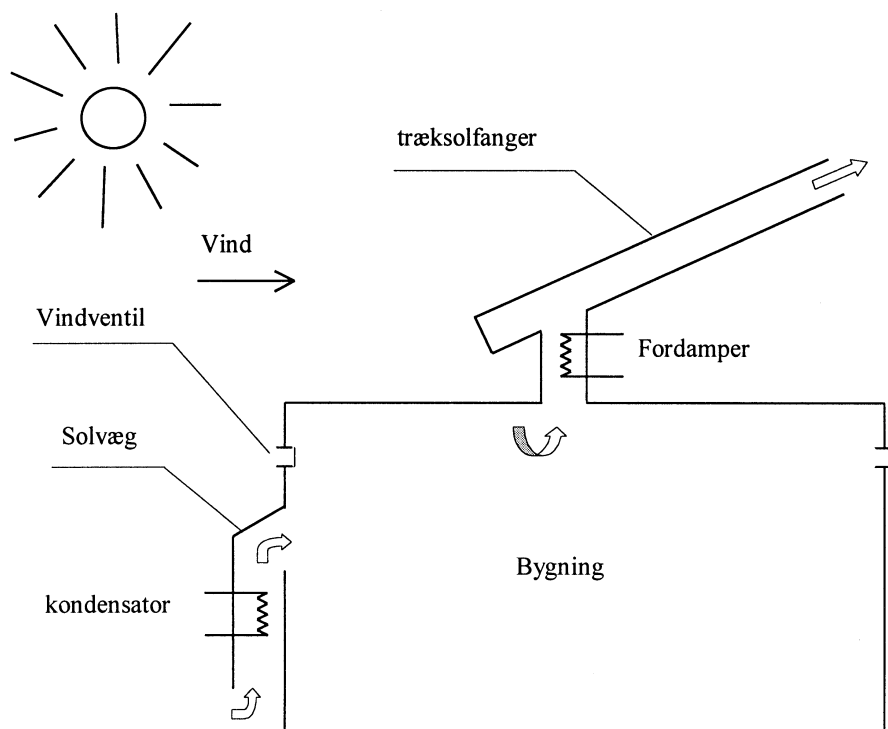
Programmet kan bl.a. anvendes til at vurdere, hvorvidt de definerede tryktab i systemet er tilstrækkeligt små til at muliggøre et velfungerende naturligt ventilationssystem, samt til at vise sammenhænge mellem luftskifter og genvindingsgrader. Programmet kan desuden anvendes til at identificere de "worst case"-situationer, hvor systemet har vanskeligt ved at opretholde et tilstrækkeligt luftskifte.



Figur 6.1. Startmenu til programmet Solvent98.

6.1. Beregningsmodel

Programmets beregningsmodel er opbygget af en kasseformet bygningen med et indtag og et afkast. I indtaget er placeret en varmeveksler i form af en kondensator samt en solvæg til forvarmning af friskluften. I afkastet er placeret en fordamper og en luftsolfanger/solskorsten. Derudover er der i bygningens sider placeret spjæld til direkte luftindtag, hvor vindtrykket kan udnyttes til indblæsning. Modellen er skitseret i figur 6.2.



Figur 6.2. Skitse af beregningsmodel.

Ved beregningerne skelnes mellem en vinter- og en sommersituation. I sommersituationen er der ikke behov for forvarmning af friskluften. Solvæggen frakobles derfor, og luften ledes direkte ind i bygningen. Desuden kan luft ledes ind i bygningen gennem vindspjæld på bygningens sider. Varmegenvindingssystemet kan kobles til eller fra, alt efter om varmevekslerne udgør en modstand i systemet, eller om luften kan ledes udenom.

I vintersituationen er der behov for forvarmning, og vindspjældene holdes derfor lukket, så alt luften ledes igennem solvæg og varmeveksler. Friskluften passerer kondensatoren først og solvæggen derefter, hvilket ikke er en hensigtsmæssig placering som beskrevet i afsnit 6.4. Beregninger kan foretages med og uden solvæg, samt med eller uden varmegenvindingssystem, hvor solvæggen alene skal forvarme luften.

Beregninger kan også foretages uden træksolfangeren i afkastet. I perioder uden sol, f.eks. i nattetimerne kan det være en fordel at bypasse denne, idet den udgør en trykmodstand, men bidrager ikke til drivtrykket.

Det er dermed muligt i programmet at opbygge en model med alle komponenter, for derefter ved beregningerne at ind- eller udkoble delkomponenter. Dette giver mulighed for at under-

søge forskellige systemopbygninger, og analysere hvilken betydning systemets enkeltdele har for det samlede resultat.

Programmet kan anvende udeklimadata for et bestemt tidspunkt i referenceåret TRY (SBI, 1982) som parametre for beregningerne, men det er også muligt selv at indtaste de relevante udeklimadata. Hvis udeklimadata angives direkte, skal udetemperatur, solstråling vinkelret på solfangerfladen samt vindstyrke og vindretning indtastes.

6.2. Beregningsforudsætninger

Da formålet har været at udvikle et simpelt og hurtigt program, der ikke kræver meget modellering eller simuleringstid, er problemstillingen forenklet en del. Beregningsforudsætningerne for programmet er listet nedenfor.

Generelt

- stationære beregninger
- inkompressible og adiabatisk forhold
- optimale forhold, intet snavs mm.

Bygning

- ingen infiltration/eksfiltration, dvs. indgået lig udgået luftmængde
- simpel kasseformet bygning
- ventilation efter fortrængningsprincippet
- temperatur under loft er kendt
- kun én indsugning og ét aftræk

Forvarmning i solvæg

- effektivitet og tryktab som funktion af volumenstrøm er kendt
- solvæg er ude af funktion uden for fyringssæsonen

Varmegenvinding

- tryktab som funktion af volumenstrøm er kendt
- væskekoblet system, dvs. fordamper og kondensator kan placeres uafhængigt af hinanden
- 100% varmeoverførsel fra fordamper til kondensator, dvs. intet tab i væskekreds

Luftsolfanger/solskorsten

- effektivitet og tryktab som funktion af volumenstrøm er kendt
- der anvendes den aritmetiske middeltemperatur i beregningerne
- evt. vind giver altid undertryk (sug) ved afkastet
- den samlede mængde luft passerer altid igennem luftsolfangeren
- konventionel solfanger

Vind

- ventiler/spjælds tryktabskarakteristik som funktion af temperaturdifferens og volumenstrøm er kendt
- spjæld på bygningens læside, dvs. hvor der er undertryk, holdes altid lukkede
- alle spjæld er lukkede i fyringssæsonen

6.2.1. Det benyttede ligningssæt

Drivtryk

Programmet kan håndtere både termiske drivtryk og vindtryk. Det termiske drivtryk opstår pga. densitetsforskelle mellem den kolde udelufttemperatur og den varme rumluft. Det termiske drivtryk beregnes af:

$$\Delta p = h \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_v)$$

Dette er en for simpel antagelse, som det diskuteres i afsnit 6.4.

I programmet beregnes de termiske drivtryk adskilt for hver del af systemet, hvorefter disse adderes. Det vindskabte drivtryk beregnes ud fra trykdifferensen over bygningen:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot v^2$$

hvor C er en formfaktor for vindens tryk på bygningen. Formfaktorer beregnes af programmet ud fra taghældning, bygningens højde/bredde-forhold, samt vindretningen i forhold til bygningen.

Solvæg

For solvæggen angives sammenhørende værdier for volumenstrøm, effektivitet og trykfald. Der kan angives op til 10 sæt værdier. I mellem disse foretager programmet en lineær interpolation, hvilket betyder, at beregningerne bliver mest nøjagtige, hvis der angives flest mulige koordinatsæt. Solvæggens ydelse og effektivitet beregnes i programmet af ligningerne:

$$Q_{\text{solvæg}} = V \cdot \rho_m \cdot c_p \cdot (t_{f,\text{solvæg}} - t_{\text{indblæs}})$$
$$\eta = \frac{Q}{A \cdot G}$$

Varmegenvindingssystem

For varmegenvindingsanlægget beregnes temperaturnyttevirkning og ydelse af:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{t_{e,\text{kond}} - t_{\text{ude}}}{t_{i,\text{loft}} - t_{\text{ude}}}$$
$$Q_{\text{gen}} = V \cdot \rho_m \cdot c_p \cdot (t_{e,\text{kond}} - t_{\text{ude}})$$

Træksolfanger/solskorsten

For luftsolfangeren i aftrækket angives effektivitetsligninger af typen:

$$\eta = \eta_0 - k_0 \cdot \frac{\Delta T}{G} - k_1 \cdot \frac{\Delta T^2}{G}$$

Effektivitetsligningerne angives for varierende volumenstrøm, og der angives et tilsvarende trykfald for solfangeren. Der kan angives op til 10 sæt ligninger. Som ved solvæggen anvender programmet lineær interpolation for at fastlægge effektivitet og trykfald ved andre volumenstrømme. Solfangerens ydelse og effektivitet beregnes i programmet af ligningerne:

$$Q_{\text{solfanger}} = V \cdot \rho_m \cdot c_p \cdot (t_{ude} - t_{e,kond})$$

$$\eta_{\text{solfanger}} = \frac{Q_{\text{solfanger}}}{A \cdot G}$$

Tryktab i lige rør og kanaler

Tryktabet i de lige rør og kanaler beregnes ud fra Reynolds tal og en friktionskoefficient λ . Tryktabet pr. m rør beregnes af:

$$p\Delta = \lambda \cdot \frac{p_d}{D_h} \quad \text{hvor}$$

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{laminar strømning}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \cdot \frac{3.71 \cdot D_h}{k} \quad \text{turbulentstrømning}$$

For sandruheden k kan der vælges et standardmateriale i programmet, eller der kan indtastes en k -værdi direkte.

Fittings

Tryktabet i enkeltmodstande som rørbøjninger og arealændringer beregnes af en tryktabskoefficient ζ ganget på det dynamiske tryk. Disse tryktabskoefficienter beregnes ud fra tilnærmede udtryk fundet på baggrund af værdier fundet i litteraturen.

Systemets samlede trykfald

Programmet beregner alle trykmodstande som værende i serieforbindelse, hvorved det samlede tryktab kan beregnes som summen af de enkelte trykfald:

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{rør}} + \Delta p_{\text{fittings}} + \Delta p_{\text{enkelt modstande}}$$

6.3. Programmets opbygning

Programmet er opbygget af i alt 8 menuer i form af faner i et regneark. Menu 1 til 7 anvendes til at definere den givne bygning og det tilhørende system i detaljer, mens menu 8 anvendes udførsel af selve beregningerne.

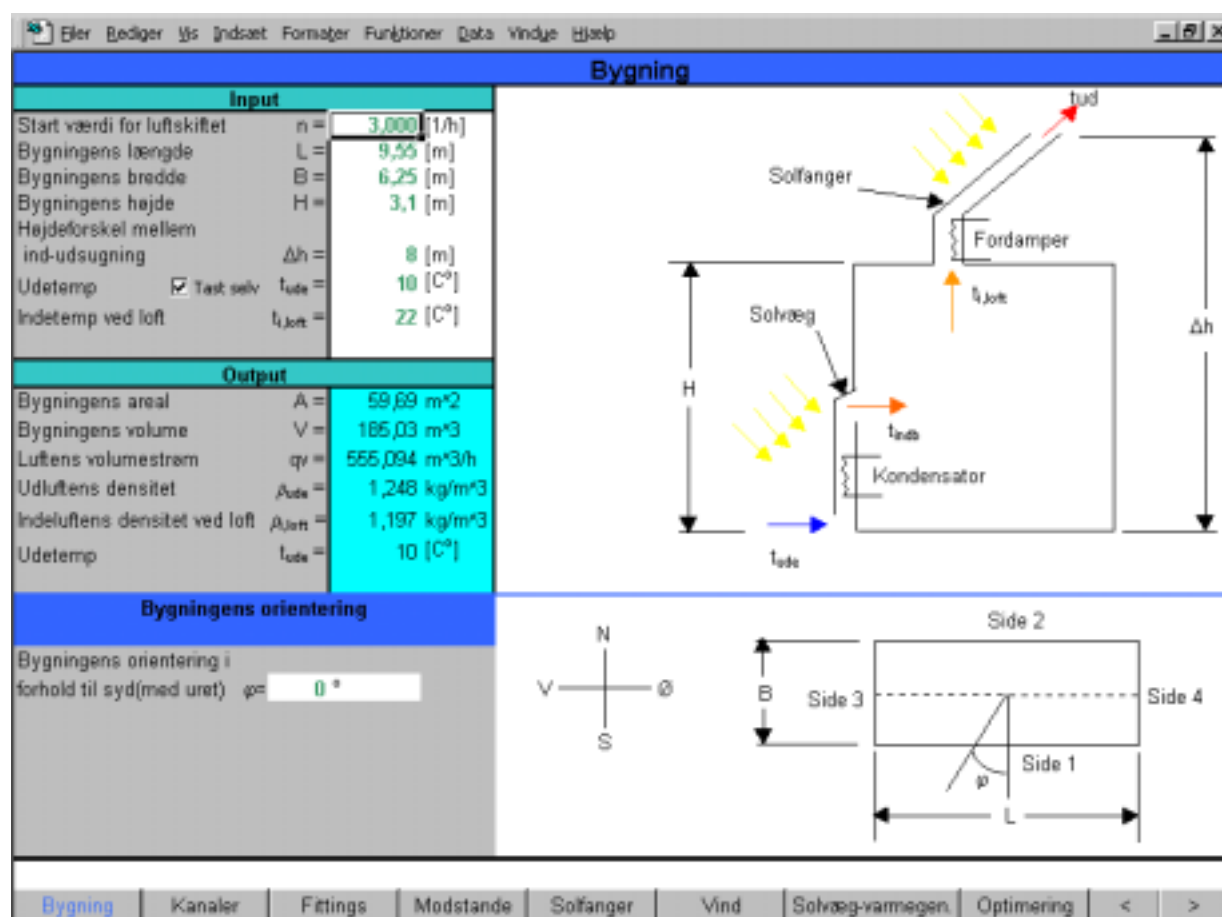
Definition af bygning og system foregår ved, at programmets bruger skal indtaste detaljerede informationer. Dette betyder, at brugeren er nødt til at vide en del om systemet, for at pro-

grammet kan give tilstrækkeligt anvendelige resultater. I menuerne er vist skitser og figurer til hjælp for brugeren, hvor de nødvendige inputdata er defineret. For alle menuer gælder, at de nødvendige inputdata skal indtastes i de hvide felter. Derudover er der i menu-billedet vist en del outputdata, som automatisk ændres, når inputdata ændres. En del af disse er startgæt for iterationer, og de endelige resultater vises først, når beregningerne er udført.

Udeklimadata kan indtastes som specifikke data for udetemperatur, vindforhold og solstråling, eller data fra referenceåret TRY kan anvendes ved at definere den ønskede dag og tidspunktet på dagen. Da programmet kun udfører stationære beregninger, arbejdes der udelukkende med konstante udeklimadata.

6.3.1. Bygning

I den første menu "Bygning" defineres bygningens geometri og orientering. En skitse af beregningsmodellen viser de mål, der skal angives. I denne menu defineres også den ønskede indetemperatur lige under loftet, hvor ventilationsaftrækket er placeret. Eventuelt kan en udelufttemperatur defineres her, hvis der ikke ønskes at anvende klimadata fra referenceåret. Klimadata fra referenceåret angives ved at vælge dato og tidspunkt under menu 8 "Optimering".



Figur 6.3. Skærbillede for menu 1 "Bygning".

6.3.2. Kanaler

Under menuen ”Kanaler” defineres ventilationssystemets kanaler. Der kan defineres 2 forskellige typer af kanaler i systemet. I programmet er en liste over tryktabskoefficienter for forskellige materialer. Det er også muligt selv at indtaste en værdi for kanalernes ruhed. Derved kan programmet beregne det samlede tryktab i kanalsystemets lige strækninger.

Kanal nr. 1		Kanal nr. 2	
Input		Input	
☐ Runde ☒ Rektangulære		☐ Runde ☒ Rektangulære	
Længde:	8,00 [m]	Længde:	0,00 m
Bredde:	0,65 [m]	Bredde:	0,30 m
Højde:	0,65 [m]	Højde:	0,30 m
Output		Output	
A ₁ =	0,42 [m]	A ₂ =	0,09 [m]
d _h =	0,650 [m]	d _h =	0,300 [m]
v ₁ =	0,36 [m/s]	v ₂ =	1,71 [m/s]
Re=	18016 =>Turbulent	Re=	39035 =>Turbulent
k=	6,00E-04 [m]	k=	6,00E-04 [m]
λ=	0,019	λ=	0,023
p ₁ =	0,08 [Pa]	p ₂ =	1,76 [Pa]
ρΔ=	0,002 [Pa/m]	ρΔ=	0,137 [Pa/m]
Δp=	0,019 [Pa]	Δp=	0,000 [Pa]
ρ=	1,20 [kg/m³]	ρ=	1,20 [kg/m³]
μ=	1,32E-05 m²/s	μ=	1,32E-05 m²/s

Figur 6.4. Skærbillede for menuen ”Kanaler”.

6.3.3. Fittings

Tryktab i fittings i systemet beregnes særskilt i menuen "Fittings". Her defineres rørbøjninger og arealændringer, som repræsenterer de mest almindelige typer fittings i et ventilationssystem. Der kan i alt defineres 4 forskellige former for fittings i systemet, men gerne flere af samme type.

Fittings

Bøjning type 1:

90 deg

☐ Cirkulær
☒ Rektangulær

Antal= 1
r/h= 1,5
h/b= 1

Tilhørende kanal:
1 ☒
2 ☐

Output

1	0,36 m/s
ζ	0,099
Δp	0,008 Pa

Bøjning type 2:

α deg

☐ Cirkulær
☒ Rektangulær

Antal= 0
 α = 35
r/h= 1,5
h/b= 1

Tilhørende kanal:
1 ☐
2 ☒

Output

2	1,71 m/s
ζ	0,039
Δp	0,000 Pa

Gradvis udvidelse:

$A_1/A_2 = 0,25$

Antal= 0
 α = 40

Tilhørende kanal:
1 ☐
2 ☒

Output

2	1,71 m/s
ζ	0,460
Δp	0,000 Pa

Tværsnitsændring:

$A \rightarrow B$
 α β

Strømningsretning:
☒ A $\rightarrow$ B
☐ A $\leftarrow$ B

Arealforhold:
 $\alpha / \beta = 0,2$

Antal= 2

Tilhørende kanal:
1 ☒
2 ☐

Output

1	0,36 m/s
ζ	0,631
Δp	0,101 Pa

Bygning Kanaler **Fittings** Modstande Solfanger Vind Solvæg-varmegen. Optimering < >

Figur 6.5. Skærbillede for menuen "Fittings".

6.3.4. Modstande

Udover selve kanalsystemet kan der defineres op til 4 forskellige typer enkeltmodstande i systemet. Disse defineres ved hjælp af op til 10 sæt af sammenhørende værdier af tryktab som funktion af volumenstrøm. Ud fra disse foretager programmet en interpolation for at finde tryktabet ved vilkårlige andre volumenstrømme. For at give størst mulig beregningsnøjagtighed bør der defineres så mange koordinatsæt som muligt, og koordinatsættene skal dække hele det område af volumenstrømme, som kan komme på tale med den pågældende model.

Modstande											
Input											
Modstand type 1			Modstand type 2			Modstand type 3			Modstand type 4		
Antal koordinatsæt: 6			Antal koordinatsæt: 10			Antal koordinatsæt: 8			Antal koordinatsæt: 10		
	V[m³/h]	Δp[Pa]		V[m³/h]	Δp[Pa]		V[m³/h]	Δp[Pa]		V[m³/h]	Δp[Pa]
1	10	0,5	1	10	0,01	1	10	0,05	1	10	0,5
2	40	0,6	2	20	0,015	2	30	0,2	2	20	0,6
3	70	0,9	3	30	0,03	3	50	0,4	3	30	0,9
4	90	1,2	4	40	0,05	4	80	0,6	4	40	1,2
5	110	1,7	5	50	0,09	5	100	0,8	5	50	1,7
6	170	2	6	60	0,13	6	130	1,2	6	60	1,9
			7	90	0,3	7	150	1,8	7	80	2,3
			8	120	0,6	8	170	2,3	8	120	3,1
			9	150	1,5				9	150	3,7
			10	170	2,2				10	170	4,2
Antal af modstande: 1			Antal af modstande: 1			Antal af modstande: 0			Antal af modstande: 0		
Output											
samlede modstand: 0,00 Pa											
Bygning Kanaler Fittings Modstande Solfanger Vind Solvæg-varmegen Optimering < >											

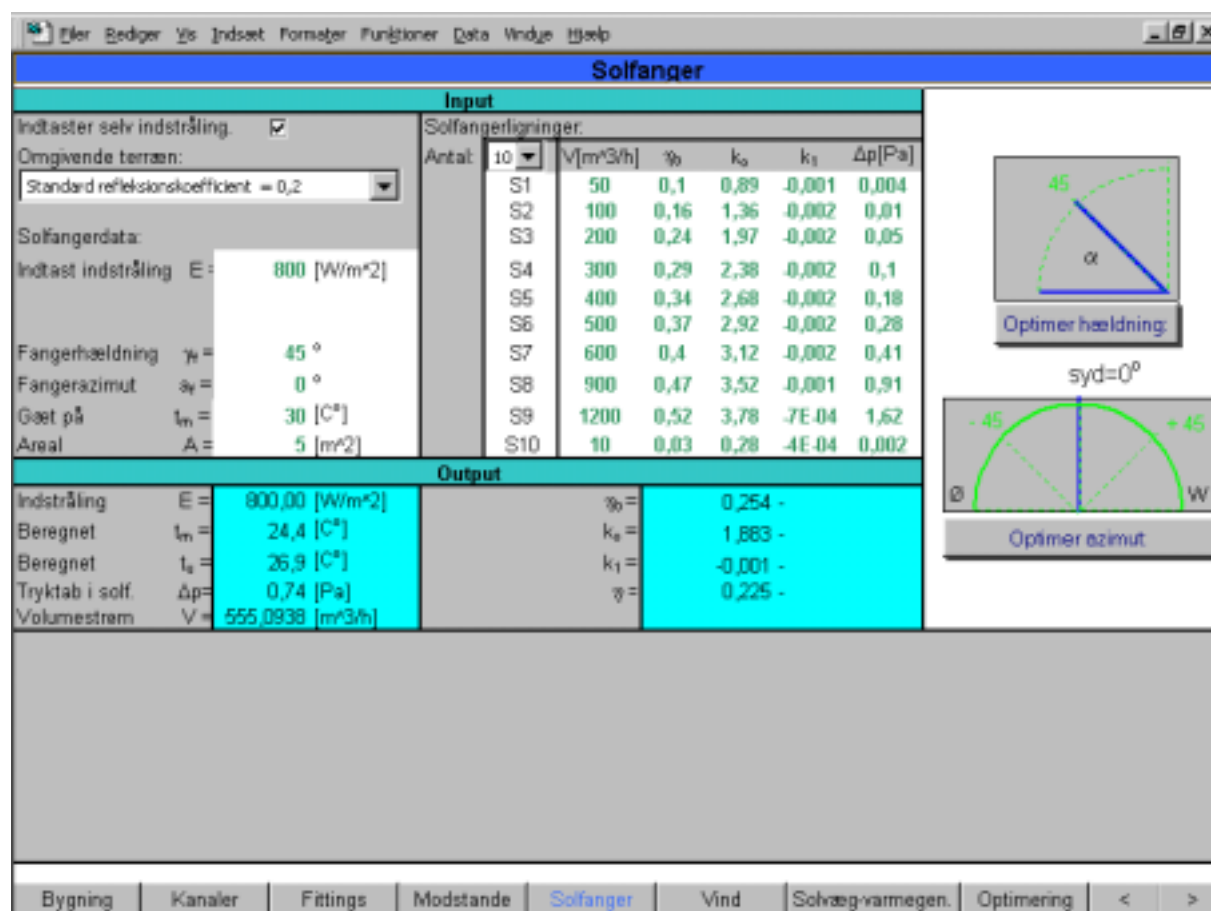
Figur 6.6. Skærbillede for menuen "Modstande".

6.3.5. Solfanger

Træksolfangeren i afkastet defineres i menuen ”solfanger”. Effektivitetskurver og tryktab skal angives som funktion af forskellige volumenstrømme. Her kan der ligeledes angives op til 10 sæt sammenhørende værdier. Hele intervallet af mulige volumenstrømme skal dækkes med koordinatsættene. Der skal desuden angives et startgæt for solfangerens middeltemperatur.

Effektivitetsudtryk for solfangeren kan evt. beregnes ved hjælp af programmet SolEff (Rasmussen, 1995).

Derudover defineres solfangerens orientering og hældning, samt typen af det omgivende terræn. Dette anvendes til at beregne den samlede indstråling på solfangeren. Solstrålingen kan indtastes direkte, eller der kan vælges data fra referenceåret.

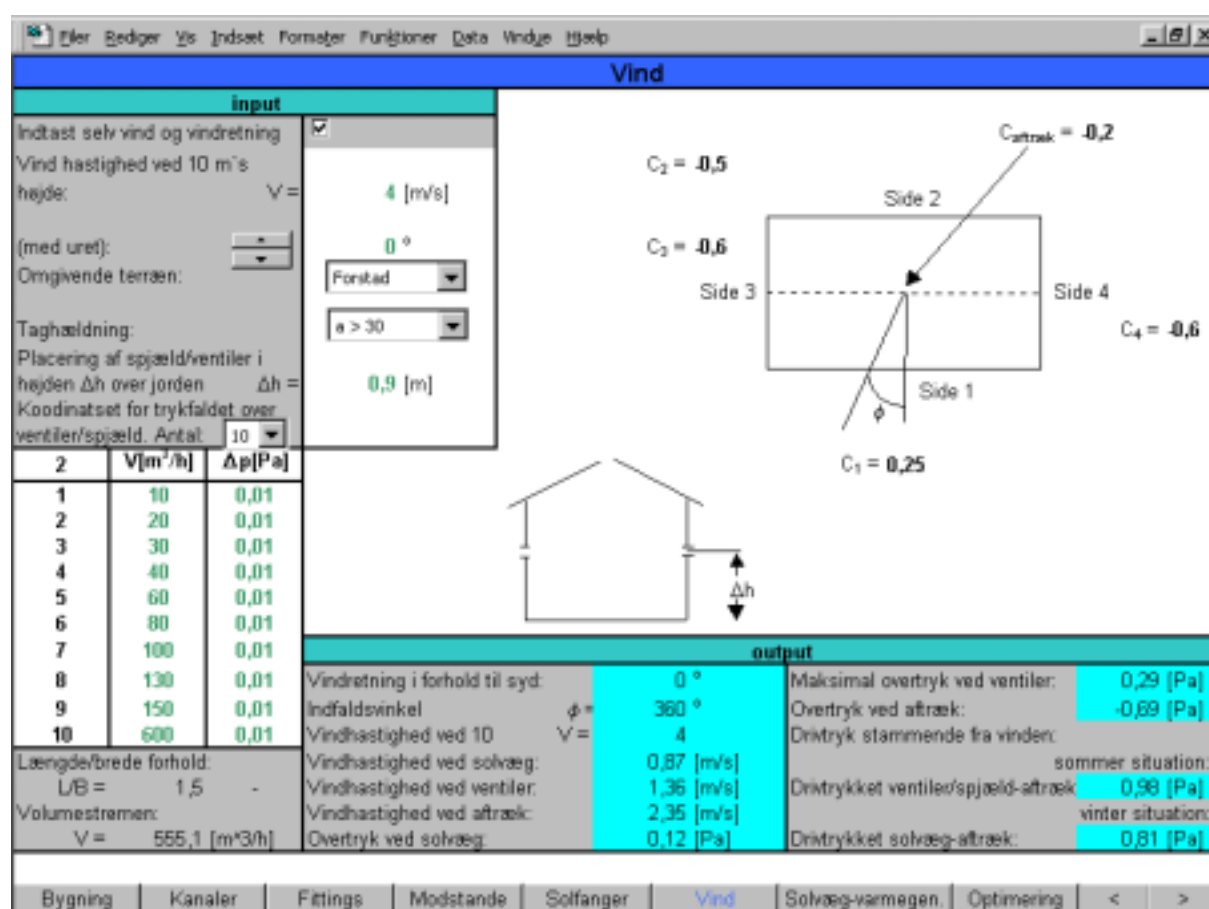


Figur 6.7. Skærbillede for menuen ”Solfanger”.

6.3.6. Vind

Eventuelle vindstyrede spjæld kan defineres under menuen ”Vind”. Det er i programmet forudsat, at der er placeret 2 spjæld på modsatte sider i bygningen, samt at de 2 spjæld er identiske. En tryktabskarakteristik for spjældene defineres ved op til 10 sæt sammenhørende værdier for tryktab og volumenstrøm.

Åbningernes placering på bygningen defineres ved en højde målt fra grundniveau. Programmet vælger ud fra bygningens geometri og orientering et sæt formfaktorer for spjældene. Derudover vælges et omgivende terræn, hvorfra en ruhedsfaktor for området kan beregnes. Vindforholdene i referenceåret er målt i 10 m’s højde, men omregnes til vindhastighed og tryk ved hhv. solvæggens indtag, vindspjældene og aftrækket.



Figur 6.8. Skærbillede for menuen ”Vind”.

6.3.7. Solvæg - Varmegenvinding

I menuen ”Solvæg + varmegen” defineres solvæggen i indtaget og varmegenvindingssystemet. For solvæggen indtastes effektivitetsligninger og trykfald som funktion af volumenstrøm med op til 10 koordinatsæt. Derudover defineres solvæggens areal, indfaldsvinkelkorrektion samt placering på bygningen. Indstrålingen på solvæggen kan indtastes direkte, eller værdier fra referenceåret kan vælges.

For hhv. fordamper og kondensator i varmegenvindingssystemet angives ligeledes op til 10 sæt sammenhørende værdier for trykfald og volumenstrøm. Systemets varmegenvindingsgrad angives også. Denne kan enten fastholdes eller anvendes som et startgæt ved beregningerne. Værdierne i outputfeltet er foreløbige værdier, som ændres ved beregningerne.

Solvæg - Varmegenvinding

Koordinatset for effektiviteten og trykfaldet.

Antal: 10

	V[m ³ /h]	η	Δp [Pa]
1	10	0,18	0,04
2	20	0,26	0,07
3	30	0,31	0,11
4	40	0,35	0,2
5	60	0,38	0,35
6	80	0,44	0,5
7	100	0,48	0,7
8	130	0,51	1,1
9	150	0,56	2,1
10	600	0,6	3,2

Indtast varmegenvindingsgrad $\eta = 0,50$

Den ønsket volumestøm er $V = 555,0938$ [m³/h]

Rumtemp. under loftet er $t_{\text{Lan}} = 22$ [C°]

Udetemperaturen $t_{\text{ude}} = 10$ [C°]

Koordinatset for trykfaldet i kondensatoren

Antal: 7

	V[m ³ /h]	Δp [Pa]
1	50	0,0075
2	100	0,03
3	200	0,12
4	300	0,27
5	400	0,48
6	500	0,75
7	600	1,08

Indtast selv indstråling ☒

Indtast indstråling $I = 800$ [W/m²]

Solvæggens areal $A = 0$ [m²]

Placering af lufvindtag over jorden $\Delta h = 0,15$ [m]

Placering af solvæg på side: ☐

output

Solvæggens oringtering i forhold til syd (med uret): 0°

Solindstråling: $E = 800,00$ [W/m²]

Solvægnes eff. $\eta = 0,6$

Middeltemp. i sol. $t_m = 10$ [C°]

Middeltemp. i kondensator $t_m = 10$ [C°]

Afgivet effekt i kondensator $Q = 0$ [W]

Indblæsning temperatur $t_{\text{indb}} = 10$ [C°]

Middeltemp. i fordamper $t_m = 22$ [C°]

Udløbtemp. fra fordamper $t = 22$ [C°]

Koordinatset for trykfaldet i fordamperen

Antal: 7

	V[m ³ /h]	Δp [Pa]
1	50	0,015
2	100	0,06
3	200	0,24
4	300	0,54
5	400	0,96
6	500	1,5
7	600	2,16

Bygning | Kanaler | Fittings | Modstande | Solfanger | Vind | Solvæg-varmegen | Optimering | < | >

Figur 6.9. Skærbillede for menuen ”Solvæg + varmegen.”.

6.3.8. Optimering

Under menuen "Optimering" foretages de egentlige beregninger. Her angives først, om beregningen skal foretages for en vinter eller sommersituation, samt om en eller flere af komponenterne skal udelades af analysen. Desuden kan der vælges et tidspunkt fra referenceåret, hvorfra de relevante udeklimadata skal hentes. Dette har dog kun betydning, såfremt det er valgt ikke at indtaste de nødvendige værdier direkte i de øvrige menuer.

Der kan foretages to typer af beregninger. Hvis det indtastede luftskifte fra menuen "Bygning" ønskes fastholdt, kan programmet beregne den maksimale varmegenvindingsgrad, der er mulig at opnå i den givne situation. En anden mulighed er at lade den indtastede varmegenvindingsgrad være fastholdt. I dette tilfælde kan programmet beregne det luftskifte, der kan opnås.

Derudover listes i denne menu en række andre væsentlige resultater fra beregningerne, bl.a. de samlede tryktab i systemet, det totale drivtryk, samt temperaturer forskellige steder i systemet.

Bygningens luftskifte		Bygningens orientering	
Bygningens volumestrem	V = 410,2 [m³/h]	Indstrålingen på solfangeren	E = 800,0 [W/m²]
Det totale drivtryk	dp = 4,49 [Pa]	Solfanger arealet	A = 5 [m²]
Drivtryk stammende fra vinden	dp = 0,81 [Pa]	Solfanger effektiviteten	η = 0,18 -
Det termiske drivtryk	dp = 3,68 [Pa]	Indstråling på solvæg	E = 800,0 [W/m²]
Trykfald		Solvægens areal	A = [m²]
kanaler mv.	dp = 0,07 [Pa]	Solvægens effektivitet	η = 0,58 -
solfanger	dp = 0,55 [Pa]	Varmegenvindingsgraden	γ = 0,50 -
solvæg	dp = 2,74 [Pa]	Varmeovertørt mængde i	
kondensator	dp = 0,51 [Pa]	varmegenvindingsdel	Q = 848,2 [W]
fordamper	dp = 0,62 [Pa]	Bygningens orientering:	0 °
ventiler/spjæld	dp = 0,00 [Pa]	Længde/brede forhold	L/B = 1,5 -
Samlede trykfald	dp = 4,48 [Pa]	Taghældning	α : α > 30 °
Udetemperaturen	t _{ude} = 10 [°C]	Omgivende terræn:	Forstad
Indetemperatur ved loft	t _{inde} = 22,0 [°C]	Vindretning:	0 °
Temperaturen til solfanger	t _i = 15,9 [°C]	Vindhastighed i 10's meter højde	V = 4 [m/s]
Uløbstemperaturen	t _{ud} = 21,1 [°C]		

Figur 6.10. Skærbillede for menuen "Optimering".

6.4. Problemer og videreudvikling

Med SolVent98 er der opbygget et lettilgængeligt og brugervenligt program til beregning af naturlig ventilation med og uden varmegenvinding og solassistance. Programmet er dog ikke færdigudviklet, idet programmet indeholder flere fejl og mangler.

Den mest alvorlige mangel er, at drivtrykket udelukkende beregnes på baggrund af udeluft-temperaturen og afkasttemperaturen efter evt. varmegenvinding og solskorsten. Det betyder, at drivtrykket vil være for lavt ved naturlig ventilation kun med varmegenvinding og for højt i systemer med solskorsten. Programmet bør videreudvikles, så det tager hensyn til drivtrykket over de enkelte dele i systemet – solvæg, rum, skorsten og solskorsten, som det er diskuteret i kapitel 2. Dette betyder mange muligheder for sammensætning af drivtrykket, idet der også skal kunne tages hensyn til forskellige temperaturprofiler i rummet som vist i figur 2.2. Programmet kunne således udvides med endnu en menu, hvor forskellige parametre af betydning for beregningen af det samlede drivtryk indtastes.

En fejl ved programmet er, at solvæggen er placeret efter varmegenvindingsenhedens kondensator. Dette er ikke en fornuftig placering af solvæggen. Effektiviteten af varmegenvindingsenheden stiger, men en del af den genvundne energi tabes i solvæggen på tidspunkter uden solindfald. Solvæggen bør derfor altid placeres før kondensatoren.

Iterationsrutinen i programmet er meget primitiv. Denne kan med fordel udskiftes med en bedre og mere robust rutine.

Programmet har ikke været underkastet en validering. Programmet bør gennemgå en nøjere undersøgelse, hvor det sammenlignes med målinger og analytiske cases, før det frigives til brug for en videre kreds.

Der er ingen tvivl om, at programmet vil være et godt værktøj for rådgivere, der skal projektere bygninger med naturlig ventilation. Der mangler i dag et sådant værktøj. Derfor bør programmet færdigudvikles, afprøves og gøres tilgængelig for en bredere kreds.

7. Sammenfatning

I nærværende projekt har det været formålet at undersøge mulighederne for udvikling af et samlet koncept for naturlig ventilation med varmegenvinding. Desuden er der lagt vægt på at undersøge mulighederne for at lade solen bidrage til det termiske drivtryk og til forvarmning af friskluften.

Konceptet bygger bl.a. på en væskekoblet varmevekslerkreds, hvilket betyder at friskluftindtag og afkast kan placeres uafhængigt. Dette åbner op for mere varierende systemudformninger og betyder også, at de naturlige drivtryk kan udnyttes bedre.

Systemets opbygning og udformning af delkomponenter er diskuteret, og en række eksempler på mulige udformninger er givet. Generelt skal komponenter til et naturligt ventilationssystem udføres med et lavt trykfald, og indtag og afkast skal udformes med henblik på vindpåvirkninger, der kan have stor indflydelse på ventilationssystemet. Indtag og afkast skal udformes således, at de mindst er vindneutrale, men helst så vinden forøger drivtrykket. Dvs. det skal sikres et vindskabt overtryk ved indtaget og et undertryk ved afkastet.

Det væsentligste krav til konceptet er, at et tilfredsstillende indeklima kan opretholdes. Det betyder, at ventilationssystemet skal kunne levere det luftskifte, der kræves for at opretholde en god luftkvalitet. Undersøgelserne har vist, at det er muligt at udforme systemet, så det tilstrækkelige luftskifte kan opretholdes i stort set alle vejsituationer, undtagen i meget varme sommerperioder uden sol, hvor friskluft må tilføres ad anden vej, f.eks. gennem vinduer i bygningen. Det vurderes på baggrund af undersøgelserne, at det er muligt at udføre systemets komponenter med et så lavt trykfald, at ventilatorunderstøtning ikke er nødvendig.

For at opnå acceptabel komfort er det nødvendigt, at indblæsningstemperaturen ikke er væsentligt lavere end rumtemperaturen, da dette kan give anledning til træk. Eftervarmning af friskluften efter genvindingsfladen kan f.eks. forgå ved hjælp af en ekstra varmeplade eller ved at føre luften gennem en radiator, der er designet til formålet. Ved anvendelse af en luftsofanger i indtaget kan der yderligere opnås en besparelse i opvarmningsbehovet. Et eksempel viser en besparelse på ca. 7-10% af det samlede energibehov til opvarmning af ventilationsluften.

Da de naturlige drivtryk er fluktuerende, er det nødvendigt at styre systemet, så det fungerer optimalt ud fra de drivtryk, der til enhver tid er til rådighed. Her er det afgørende, at varmegenvindingsgraden kan styres, f.eks. ved at lede større eller mindre dele af luften udenom systemets varmevekslere. Ved at styre ventilationsraten efter det gældende behov i stedet for efter en fast luftmængde, kan energibehovet til opvarmning af luften desuden mindskes.

Beregninger har vist, at der i størstedelen af fyringssæsonen kan opnås genvindingsgrader på 30-40%. Varmegenvindingsgraden kan sandsynligvis øges gennem en optimering af systemet. Et pumpedrevet kredsløb giver ikke alene mulighed for vilkårlig placering af fordamper og kondensator, men også for at opsplitte systemet yderligere. Systemet kan opbygges som decentral undersystemer med en køle- og varmeplade i hvert rum, som et mere centralt system med en fælles køleplade og varmeplader i hvert rum eller som et central system med fælles køle- og varmeplade i fælles afkast og friskluftindtag. Der er således mange varierende systemopbygninger. Disse er ikke undersøgt nærmere i dette projekt. Konceptet kan også anvendes i bygninger med traditionel afkastventilation, hvor der ønskes varmegenvinding. Det er ofte umuligt at placere kanaler til et balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding i eksi-

sterende bygninger. Det er lettere at placere to varmevekslere med tynde rør imellem. Afhængig af trykfaldet i de eksisterende afkastkanaler vil det ofte være nødvendigt at bibeholde den eksisterende afkastventilatorer i systemet, for at sikre et tilstrækkeligt luftskifte.

Vekslerkredsen i systemet er opbygget som koblede væskebatterier, hvor et kølemiddel anvendes som varmetransporterende medium. Anvendelse af et kølemiddel giver en større varmeoverføringsevne i vekslerne end vand. Samtidigt skal der cirkuleres en mindre massestrøm end ved brug af vand som transportmedium. Der kan derfor bruges tyndere rør.

Forskellige typer kølemidler kan anvendes i væskekredsen, men det er naturligt at vælge et miljøneutralt kølemiddel i stedet for f.eks. HFC-kølemidler, der på længere sigt ønskes afskaffet. Det er valgt at gennemføre beregningerne med propan som varmeoverførende fluid. Cirkulationspumpen har et energiforbrug, der udgør mindre end 2% af energibehovet til opvarmning af ventilationsluften.

I forbindelse med projektet er der udviklet et edb-program i programmet Excel97. Det var formålet med programmet at skabe et let anvendeligt værktøj, der hurtigt kan give et overblik over mulighederne for naturlig ventilation og varmegenvinding i en given bygning. Desuden kan programmet medtage solassistance i form af henholdsvis solvæg og solskorsten i beregningerne. Programmet bygger dog på nogle forsimplede antagelser for beregning af det termiske drivtryk, og det har ikke været muligt inden for dette projekts rammer at videreudvikle programmet, så det kan anvendes til generelle formål. Det er håbet, at programmet på et senere tidspunkt kan videreudvikles, så det kan blive et hurtigt og nyttigt værktøj til beregninger af luftstifte og varmegenvindingsgrader for naturlige ventilationssystemer.

Beregninger har vist, at systemet - selv med en lavere varmegenvindingsgrad end for et tilsvarende balanceret mekanisk ventilationssystem med varmegenvinding - har et lavere primærenergiforbrug. Det er også vurderet, at systemet er økonomisk konkurrencedygtigt med traditionelle mekaniske ventilationssystemer.

Undersøgelserne viser, at naturlig ventilation med varmegenvinding og solassistance er mulig og er et område med mange udviklingsmuligheder.

8. Referencer

- Air Vent, 1999. www.certainteed.com/ventilation/products/windturb.html
- Andersen, K.T., 1998a. Dimensionering af naturlig ventilation med termisk opdrift. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-rapport 301. ISBN 87-563-0996-1.
- Andersen, K.T., 1998b. Personlig kontakt. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Architecture Today, 1991. A well tempered environment: Peake Short at Leicester. No. 23. pp 30-35.
- Bahadori, M. N., 1978. Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. Scientific American, vol 238 no. 2, February 1978, pp. 144-152.
- De Gids, W.F. Controlled air flow inlets. Proceedings fra 18th annual AIVC Conference ”Ventilation and Cooling”, Athen, 23.-26. September 1997. pp. 245-255.
- DTI, 1995. Kortlægning af ventilationsforhold i brancher med stort rumvarmebehov som følge af et stort behov for ventilation. Dansk Teknologisk Institut, Energi.
- Egedorf, M., 1990a. Naturlig ventilation i småhuse – Dimensionering og afprøvning. Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut. ISBN 87-7511-919-6.
- Egedorf, M., 1990b. Naturlig ventilation uden træk – Udvikling af selvregulerende strømningsventil. Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut. ISBN 87-7556-052-3.
- Egedorf, M., 1995. Funktionsafprøvning af roterende aftrækshætter. Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut.
- Exners Tegnestue, 1998. Grønt Center, Vejle – Forslag til udformning og indretning af udstillings-, undervisnings- og kontorfaciliteter.
- Florin, H. og Jespersen, P.W., 1998. Solassisteret naturlig ventilation med forvarmning og varmegenvinding. Afgangsprøjsjekt ved Diplomingeniøruddannelsen. Danmarks Tekniske Universitet, Helsingør.
- Hastings, S.R. and Mørck, O., 1999. Solar Air Systems – A Design Handbook. James & James Publishers. ISBN 1-873936-86-9. Under publicering.
- Herzog, T., 1994. Design Center Linz. Verlag Gerd Hatje. ISBN 3-7757-0524-4.
- Herzog, T., 1996. Solar Energy in Architecture and Urban Planning. Prestel, Munich – New York.
- Hestad, T., 1998. Heat Recovery in Natural Ventilation Design of Office Buildings. Proceedings fra 19th annual AIVC Conference ”Ventilation Technologies in Urban Areas”, Oslo, 28.-30- september 1998. pp. 426-437.

- Klein, S.A and Alvarado, F.L., 1998. Engineering Equation Solver – version 4.865. F-Chart Software.
- Jensen, S.Ø. et al, 1997. Luft/væskesolfangere. Prøvestationen for solenergi, Dansk Teknologisk Institut, Energi. ISBN 87-7756-470-7.
- Rambøll, 1997. Individuelle el- og gasdrevne varmepumper – Samfundsøkonomi, privatøkonomi samt energi- og miljømæssig analyse.
- Rasmussen, P.B., 1995. Program til beregning af luftsolfangeres effektivitet – Soleff. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet. Rapport nr. 95-29.
- Riffat S.B. og Gan G., 1997. Passive Stack Ventilation with Heat Recovery. Air Infiltration Review, vol. 18, no 4. September 1997. pp. 7-9.
- SBI, 1982. Vejrdata for VVS og energi – Dansk referenceår TRY. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI rapport nr. 135.
- Sirén. K. et al. Solar Assisted Natural Ventilation with Heat Pipe Heat Recovery. Proceedings fra 18th annual AIVC Conference "Ventilation and Cooling", Athen, 23.-26. September 1997. pp. 323-330.
- Schultz, J.M., 1993. Naturlig ventilation med varmegenvinding. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 249.
- Tjelflaat, P.O. og Rødahl, E., 1997. Design of Fan-Assisted Natural Ventilation. SINTEF Bygg og miljøteknikk, Arkitektur og byggteknikk, Norge.
- Zaccheddu, E., 1998. Personlig kontakt. Sulzer Infra Lab Ltd, Schweiz.

Bilag

EES-beregninger - beregningseksempler

De 15 siders bilag forefindes ikke elektronisk. De kan rekvireres hos BuildVISION, Teknologisk Institut. Bilaget indeholder udskrifter fra ESS-beregningerne.