



Komponenter til naturlig ventilation

Del I – Lavtsiddende indløbsåbninger

Forprojekt

*Udarbejdet for Energistyrelsen
J nr.: 1213/01-0016*

*Line Louise Overgaard
Per Heiselberg
Carl Hammer*

Maj 2002

Komponenter til naturlig ventilation
Del I – Lavtsiddende indløbsåbninger (forprojekt)

Maj 2002

Udgivelse og tryk:
© Teknologisk Institut
Gregersensvej
Postboks 141
DK-2630 Taastrup
Tlf.: 7220 2000

ISBN: 87-7756-661-0
ISSN: 1600-3780

Forord

Nærværende delrapport er resultatet af en del af projektet *Komponenter til naturlig ventilation*, der er udført under Energistyrelsens energiforskningsprogram (EFP), J. nr. 1213/01-0016.

Projektet har været opdelt i to delprojekter. Delprojekt I har været en forundersøgelse af mulighederne for udvikling og anvendelse af lavtsiddende indløbsåbninger til naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet, mens der i delprojekt II /20/ er blevet udviklet en luft-til-væske varmeveksler med lavt trykfald på luftside. I nærværende delrapport er kun delprojekt I afrapporteret.

Projektet har således haft to formål. Det ene formål har været at undersøge mulighederne for udvikling og anvendelse af lavtsiddende friskluftindtag i facader til naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet uden komfortproblemer. Projektets andet formål har været at udvikle en luft-til-væske varmeveksler med et tilstrækkeligt lavt trykfald, så varmegenvinding i naturligt ventilerede bygninger kan gøres mulig. Anvendelse af varmeveksleren til forvarmning af friskluften vil desuden samtidig reducere risikoen for problemer med træk i opholdszonen.

Delprojekt I er udført i et samarbejde mellem:

Teknologisk Institut, Energianvendelse i bygninger, BuildVISION
Aalborg Universitet, Institut for Bygningsteknik
VELFAC A/S

Indhold

Forord.....	1
Indhold	2
1 Indledning.....	3
2 Resume	4
3 Beskrivelse af ventilationskoncept.....	5
3.1 Anvendelsesområder	6
3.2 Dimensionering	6
3.3 Indtrængningslængde/nærzone	7
4 Litteraturstudium.....	8
4.1 Vinduessystemer (VELFAC A/S).....	8
4.2 Tekstikanaler (fra KE-Fibertec)	11
4.3 Kombineret friskluftventil og radiator (RIO Comfort).....	12
4.4 Tilluftskonvektorer og termopaneler (fra MINERGIO/Thermopanel AB)	14
4.5 Sammenfatning.....	16
5 Fastsættelse af krav	18
5.1 Anvendelsesrelaterede krav	18
5.2 Funktionsmæssige krav	22
5.3 Markedsføringsmæssige krav	23
5.4 Sammenfatning/projektafgrænsning	25
6 Konklusion.....	26
7 Referencer	27
Bilag.....	29

1 Indledning

En af de væsentligste barrierer for større udbredelse af naturlig ventilation er, at der er stor usikkerhed med hensyn til dimensionering af naturlige ventilationssystemer. Med den viden, der er tilgængelig i dag, kan rådgiverne normalt ikke garantere, at der i alle situationer opnås et indeklima, der tilfredsstiller de fastsatte krav.

På Aalborg Universitet blev der i 99/00 udført en række projekter, hvor laboratorieundersøgelser af strømningsforhold, ventilationskapacitet og termisk komfort er blevet udført for udvalgte vinduestyper i forskellige driftssituationer med højtstående vinduer. Som Aalborg Universitet konkluderede om de opnåede resultater fra projekterne, så:

- ”fungerer vinduer som indblæsningsåbninger efter de samme principper som andre indblæsningsåbninger – men er meget mere komplicerede at forudsige”
- ”er det nuværende komfortniveau, som mekanisk ventilation var for 15-30 år siden”
- ”kan komfortforbedringer skabes gennem udvikling af åbningsudformninger”.

I et moderne kontorbyggeri med en høj isoleringsstandard, stor udnyttelse af passiv solvarme og mange interne varmekilder (personer, udstyr m.v.) vil basistemperaturen typisk ligge på 10-14 °C (dvs. at det ud fra et energimæssigt synspunkt ikke er nødvendigt at opvarme den tilførte ventilationsluft ved en udetemperatur på 10-14 °C). Det betyder, at kølig luft på 10-14 °C vha. naturlig ventilation skal kunne tilføres rummet, uden at det giver anledning til komfortproblemer for de mennesker, der opholder sig i rummet. Udfordringen er her at udforme og afpasse indløbsåbning(erne), så luften kommer ind over så stort et areal som mulig og med en så lav hastighed som mulig. I praksis vil det ofte være nødvendigt at udnytte hele facadebredden og dermed skabe en plan strømning (frem for en tredimensional strømning).

Kombinationen af kølebehov samtidig med friskluftbehov (hvor de væsentligste forureningskilder er lugt og CO₂ fra mennesker/inventar) peger på fortrængningsprincippet som et oplagt ventilationsprincip. Lavtsiddende indløbsåbninger og højtstående udløbsåbninger medvirker til større drivtrykshøjde (frem for højtstående indløbsåbninger) samtidig med, at ventilationseffektiviteten ved anvendelse af fortrængningsprincippet er høj og den nødvendige friskluftmængde derfor mindre.

Der er således behov for at udvikle en facadeintegreret, lavtsiddende indløbsåbning til naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet, der ikke skaber komfortproblemer i opholdszonen. Der er desuden behov for at kortlægge disse åbnings åbningskarakteristikker i forskellige driftssituationer (dvs. fastlægge kapacitets- og komfortmæssige forhold ved forskellige tryk og temperaturforhold).

Ved nærværende delprojekts start fandtes der i Danmark ingen umiddelbar konkret viden om strømningsforholdene i forbindelse med sådanne lavtsiddende indløbsåbninger til naturlig ventilation. Der fandtes kun tilgængelige teorier for fortrængningsarmaturer til mekanisk ventilation.

Nærværende delprojekt omhandler derfor bl.a. undersøgelse af eksisterende teori og erfaringer fra:

- Naturlig ventilation via traditionelle (højtstående) vinduesåbninger
- Mekanisk fortrængningsventilation
- Eksisterende komponenter/materialer/mulige delkomponenter

Desuden beskriver projektet mulige anvendelsesområder og driftssituationer samt nødvendige krav i forbindelse med de forskellige anvendelsesområder og driftssituationer.

2 Resume

I nærværende delprojekt er mulighederne for anvendelse af et lavtsiddende facadeintegreret indtagssystem til naturlig ventilation via fortrængningsprincippet undersøgt i forskellige driftssituationer.

Ventilation efter fortrængningsprincippet er specielt egnet til lokaler med stor intern belastning (såvel varme- som forureningsafgivelser). De bygninger, hvor det facadeintegrerede indtagssystem er relevant, er således især kontorer (specielt storrumskontorer, men også evt. mindre cellekontorer), mødelokaler og institutioner. Ved speciel udformning af indtagssystemet vil det desuden også være velegnet til boliger.

Relevant teori og erfaringer (vedrørende naturlig ventilation vha. højtsiddende åbningstyper, mekanisk fortrængningsventilation samt eksisterende komponenter, materialer, konstruktioner, systemer mv.) er indsamlet og behandlet, og der er opstillet krav til åbningens funktion og udformning bl.a. afhængig af anvendelsesområde (hhv. kontorer, mødelokaler, institutioner mv.) og driftssituation.

De udførte undersøgelser har fx vist, at det lavtsiddende indtagssystem skal kunne levere en luftmængde på mellem 5 og 20 l/s pr. m facade, hvis det skal kunne anvendes inden for de forventede anvendelsesområder: kontorer, mødelokaler og institutioner. Afhængig af, om indtagssystemet skal anvendes til rene naturlige ventilationssystemer eller evt. hybride ventilationssystemer (med en lille hjælpeventilator i udløbet), så må tryktabet over indtagssystemet maksimalt være hhv. 3-8 Pa eller 10-15 Pa afhængig af anvendelsesområdet.

De indledende undersøgelser i dette forprojekt tyder på, at muligheden for at kombinere filtrering af udeluft, etablering af ensartet luftfordeling samt etablering af en luftsolfanger til forvarmning af luften ved anvendelse af et tekstilmateriale i åbningsudformningen (kendt fra lavimpulsindblæsning) kunne være interessant at arbejde videre med. Luftsolfangere med filter- eller tekstilmateriale som absorber har jf. nye undersøgelser på Teknologisk Institut vist sig at være nogle af de mest effektive luftsolfangere.

Det har desuden vist sig, at der er basis for integrering af en varmeveksler med flere forskellige funktioner i indløbskomponenten. Varmeveksleren skal kunne benyttes til både varmegenvinding (via væskekobling med tilsvarende varmeplade i udløbet) og opvarmning (via kobling til bygningens varmesystem). Endvidere bør muligheden for anvendelse af veksleren til natkøling (via kobling til det kolde brugsvand i bygningen) undersøges.

Alt i alt vurderes det på baggrund af de indledende undersøgelser i dette forprojekt, at der er gode muligheder for, at der kan udvikles et sådant facadeintegreret multifunktionelt indtagssystem til naturlig eller hybrid ventilation efter fortrængningsprincippet.

En væsentlig barriere for større udbredelse af naturlig ventilation er, at der er stor usikkerhed med hensyn til dimensionering af naturlige ventilationssystemer. Med den viden, der er tilgængelig i dag, kan rådgiverne normalt ikke garantere, at der i alle situationer opnås et indeklima, der tilfredsstiller de fastsatte krav. Efter evt. udvikling af en prototype er der derfor desuden behov for at kortlægge indtagssystemets åbningskarakteristikker i forskellige driftssituationer (dvs. fastlægge kapacitets- og komfortmæssige forhold ved forskellige tryk og temperaturforhold).

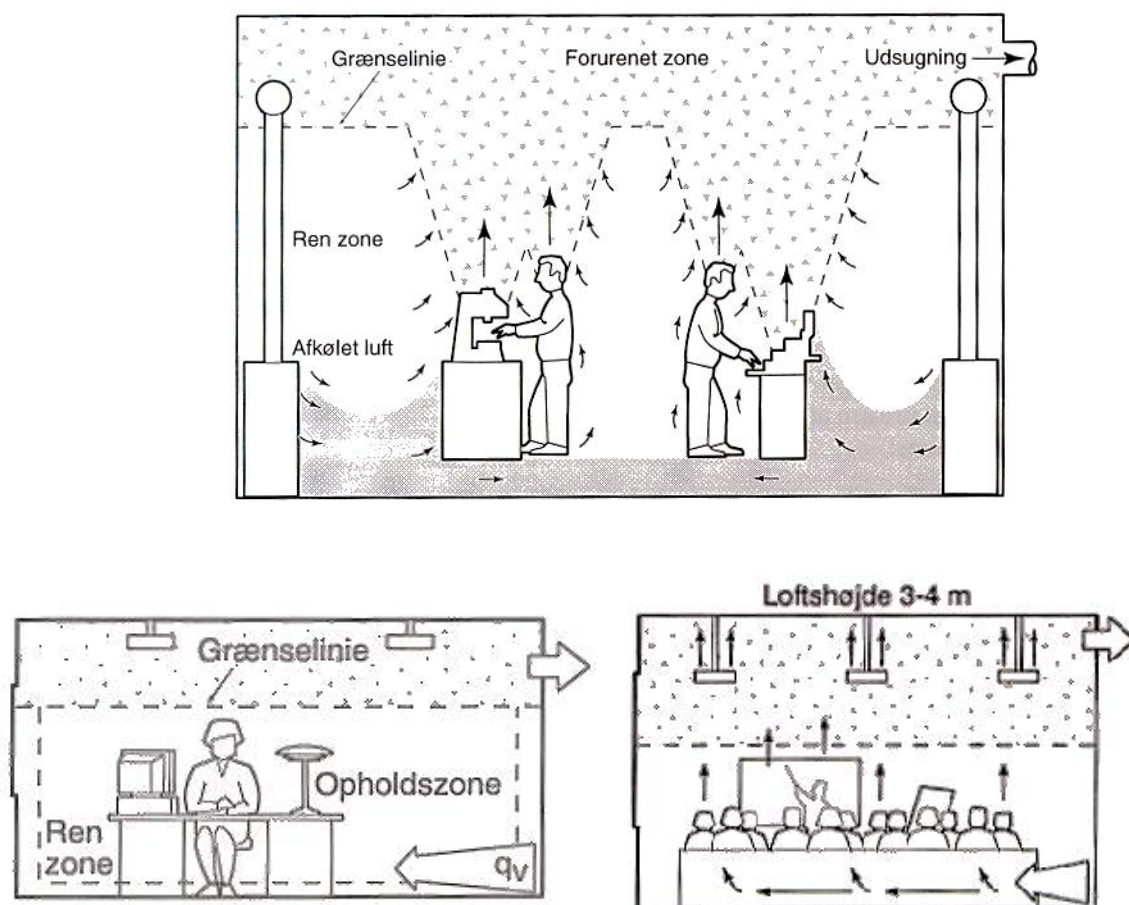
3 Beskrivelse af ventilationskoncept

I såvel kontor- som institutionsbyggeri er der en stigende interesse for anvendelsen af naturlig ventilation (NV) samtidig med, at der ofte er store interne varmebelastninger. De interne belastninger medfører, at der allerede ved en udetemperatur på 10-14 °C er et overskud af varme i bygningen, og at det derfor ud fra et energiøkonomisk synspunkt er rentabelt med naturlig ventilation uden varmegenvinding. Der er derimod komfortmæssige problemer forbundet med at tilføre indblæsningsluft på 10-14 °C. Dvs. af komfortmæssige hensyn kræves en eller anden form for forvarmning af luften (gerne i kombination med en ventilationsform med lav turbulensintensitet i opholdszonen).

Kombinationen af kølebehov samtidig med friskluftbehov (hvor de væsentligste forureningskilder er lugt og CO₂ fra mennesker/inventar) peger på fortrængningsprincippet som et oplagt ventilationsprincip. Lavtsiddende indløbsåbninger og højsiddende udløbsåbninger medvirker til større drivtrykhøjde (frem for højsiddende indløbsåbninger) samtidig med, at ventilationseffektiviteten ved anvendelse af fortrængningsprincippet er høj, og den nødvendige friskluftmængde derfor mindre.

En anden fordel ved at have indløbskomponenten (med forvarmningsenhed) placeret nede ved gulvet i stedet for oppe ved loftet er, at højsiddende glasarealer har stor betydning for dagslysniveauet i lokalet. Det er lyset gennem den øverste halve meter, der giver det største bidrag til et godt dagslys i et lokale.

Ideen ved anvendelse af fortrængningsprincippet er, at kølig luft sendes langsomt ind i lav højde og fordeler sig ud over gulvet. Ved hjælp af termisk opdrift fra personer og udstyr mv. trækkes den friske luft derefter opad, og fjerner forurening og overskudsvarme fra opholdszonen. Se Figur 3.1.



Figur 3.1: Illustration af strømningsbilledet ved anvendelse af passiv termisk fortrængning. Kilde: Håndbog i industriventilation /6.s37-44/.

Dvs. det grundlæggende princip ved fortrængningsventilation er, at varme og forurening bliver ført direkte væk fra opholdszonen op mod loftet af konvektionsstrømmene fra de termiske kilder i rummet. Konvektionsstrømmene trækker omgivende luft med sig, hvorved den opadrettede volumenstrøm øges, samtidig med at dens hastighed falder. Jo varmere en kilde er, desto kraftigere er den opadrettede konvektionsstrøm (desto mere omgivende luft vil blive medrevet) /6.s37/. Personer danner fx konvektionsstrømme på ca. 40-55 l/s pr. person /6.s39/.

3.1 Anvendelsesområder

Fortrængningsprincippet er jf. /6.s37/ specielt velegnet til lokaler med stor varmeudvikling, eller hvor der skal tilføres store mængder erstatningsluft (industrien, mødelokaler, kontorer mv.).

Ventilationskonceptet/indløbskomponenten egner sig derfor umiddelbart til følgende anvendelsesområder:

- Kontorbyggeri
 - Flerrumskontorer
 - Mødelokaler
 - (Evt. enkeltmandskontorer)
- Institutioner
 - Skoler
 - Børnehaver
- Industrielokaler
- (Evt. boliger)

Boliger hører umiddelbart til de mindre egnede lokaler, men under specielle forhold (stor termisk belastning fra solindfald, udstyr el. lign.) og med en speciel udgave af indløbskomponenten/konceptet kan de alligevel være relevante.

Det kan ligeledes diskuteres, hvorvidt enkeltmandskontorer egner sig til ventilationsprincippet, eller om belastningen pr. gulvareal er for lille. Dog bliver mange kontorbyggerier opført med samme facadesystem overalt og fleksibel indretning, hvor storrumskontorer og cellekontorer kan etableres efter behov. Det vil således være en fordel, hvis systemet/komponenten også kan anvendes ved cellekontorer.

3.2 Dimensionering

Ved traditionel mekanisk fortrængningsventilation dimensioneres luftmængden ofte efter det såkaldte grænselinieprincip. Ved at tilføre den rene kølige luft nær gulvniveau og udsuge den varme forurenede luft under loftet, kan der dannes en såkaldt grænselinie, der skiller rummet i en nedre, ren og tempereret zone og en øvre, varm og forurenede zone /6.s39/. Hvis der dimensioneres efter dette grænselinieprincip, er det vigtigt, at der tilføres tilstrækkeligt ren luft i den nedre zone for at holde grænselinien over opholdszonen og dermed forhindre varm og forurenede luft i at trænge ned i opholdszonen. Dvs. den indblæste volumenstrøm dimensioneres, så den er større end summen af konvektionsstrømmene.

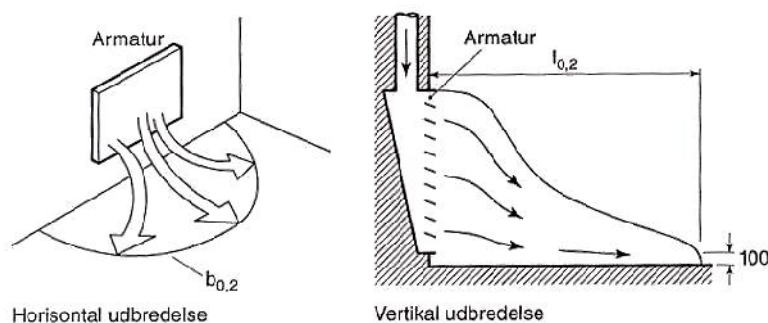
Friskluftbehovet pr. person er ca. 10-14 l/s person, mens konvektionsstrømmene fra personer er meget større (ca. 15-20 l/s pr. person i en højde af 1,1 m over gulvet og ca. 40-50 l/s pr. person i en højde af 1,8 m over gulvet). Dimensioneres der efter grænselinieprincippet i forbindelse med naturlig ventilation i fx kontorer og mødelokaler, vil det således enten kræve store luftmængder og dermed et for stort energiforbrug (til opvarmning), eller også vil grænselinien ligge forholdsvist lavt i rummet med en lavere effektivitet til følge.

I forbindelse med naturlig ventilation, hvor den dimensionerende luftmængde er bestemt af friskluftbehovet (fremfor af kølebehovet) er dimensionering efter den traditionelle grænselagsmetode således ikke relevant.

3.3 Indtrængningslængde/nærzone

Fortrængningsprincippet skabes, som nævnt, ved at etablere en lagdelt strømning, hvor kold indblæsningsluft strømmer ud i lokalet langs gulvet i et lag under den varmere rumluft. Dette medfører, at der kun er en meget ringe opblanding mellem de to luftmasser, fordi turbulensintensiteten dæmpes af temperaturforskellene. Dette medfører, at indblæsningsluften kan nå dybere ind i lokalet med lav hastighed (end ved opblæsningsventilation) /6.s81/.

Selv om indblæsningshastigheden er relativt lav, er der dog traditionelt en zone foran indblæsningsarmaturer (mekaniske), kaldet nærzonen, hvor lufthastigheden er større end den ønskede maksimalhastighed i opholdszonen (som regel 0,2 m/s). Nærzonen defineres med andre ord sædvanligvis som en zone omkring indblæsningsarmaturet, hvor lufthastigheden er større end 0,2 m/s jf. /6.s81/, se Figur 3.2.



Figur 3.2: Illustration af lagdelt strømning og nærzone i forbindelse med fortrængningsventilation. Kilde: Håndbog i industriventilation /6.s81/.

4 Litteraturstudium

Som en del af projektet er der udført et litteraturstudium, hvor litteratur vedrørende tidligere erfaringer, eksisterende komponenter mv. er indsamlet og gennemgået. Det drejer sig bl.a. om teori og erfaringer vedrørende naturlig ventilation via almindelige (højsiddende) vinduer, teori og erfaringer vedrørende mekanisk fortrængningsventilation samt beskrivelser af diverse konstruktioner, materialer og komponenter, der kunne tænkes at være relevante i forbindelse med udformningen af den nye komponent.

Det materiale, der er gennemgået, kan inddeles i følgende tre kategorier:

- Materiale om naturlig ventilation generelt (primært traditionelle, højsiddende vinduesåbninger)
- Materiale om fortrængningsventilation generelt (primært mekanisk)
- Materiale om relevante konstruktioner, materialer, komponenter og systemer

Der er bl.a. fem artikler (reference /1/-/5/), som beskriver resultaterne fra den omfattende eksperimentelle forskning, som i de seneste år er udført på Aalborg Universitet i relation til naturlig og hybrid ventilation via højsiddende vinduesåbninger. Vigtige elementer fra den gennemgåede litteratur om naturlig ventilation via højsiddende åbninger er opsummeret og kommenteret i bilag 1.

Det gennemgåede materiale om mekanisk fortrængningsventilation samt lavimpulsventilation (reference /6/-/8/) vedrører bl.a. teori for og beskrivelse af ventilationsprincippet *passiv fortrængning*, dimensioneringsregler, forskellige armaturudformninger, forskellen mellem samt fordele og ulemper ved hhv. lavimpuls- og fortrængningsprincippet (vha. tekstilkanaler) samt et lille afsnit om hastighedsforløbet ved 2-dimensionel fortrængningsventilation. Vigtige elementer fra det gennemgåede materiale om mekanisk fortrængningsventilation er opsummeret og kommenteret i bilag 2.

Der er desuden en meget interessant artikel (reference /9/), der faktisk beskriver strømningsmekanikken bag naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet ved en kombination af vind og termiske drivkræfter - dog kun i en situation uden varmekilder, dvs. ved afkøling af rummet efter anvendelse. Denne er ligeledes opsummeret i bilag 2.

Blandt det gennemgåede materiale om eksisterende konstruktioner/komponenter og materialer (reference /10/-/14/) er der bl.a. produktinformation om intelligente vinduessystemer fra VELFAC, diverse produktinformation om tekstilkanaler, kombinerede friskluftindtag/radiatorer fra hhv. KE-Fibertec, Ribe Jernindustri (Rio) samt MINERGI/Thermopanel AB.

I det følgende er vigtige elementer fra diverse produktinformation om vinduesudformninger, tekstilkanaler, kombinerede friskluftindtag/radiatorer mv. fra hhv. VELFAC A/S, KE-Fibertec, Ribe Jernindustri (Rio) samt MINERGI/Thermopanel AB gengivet og kommenteret.

4.1 Vinduessystemer (VELFAC A/S)

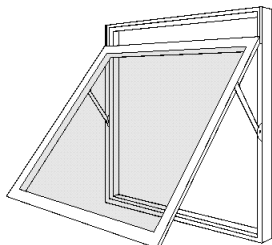
VELFAC A/S oplever en stigende efterspørgsel efter facader med et ensartet ydre (herunder bl.a. samme facadesystem over hele facaden) uanset transparente eller ikke-transparente felter, samtidig med at facaden skal indeholde flere og flere funktioner. Det har ført til anvendelsen af emaljeret glas eller pulverlakeret aluminium i de felter, hvor der skal skjules noget inde bagved. Se Figur 4.1.



Figur 4.1: Eksempler på ensartede facader med glas. Liverpool Football Academy (GB), Smithfield Village (Dublin), BMW Hovedsæde (Østrig), Engen III (Rødovre), og British Gas (GB). Kilde: VELFAC A/S /10/.

VELFAC A/S har bl.a. leveret en hel del vinduer med elektrisk betjente vinduesrammer til store byggeprojekter med naturlig ventilation i England. De elektrisk betjente vinduesrammer har i alle tilfælde været udadgående med funktionen ”topstyret” (VELFC 212), se Figur 4.2. Der har typisk været tale om ret lave, højt-siddende vinduer (til ensidig naturlig ventilation via højt-siddende vinduer).

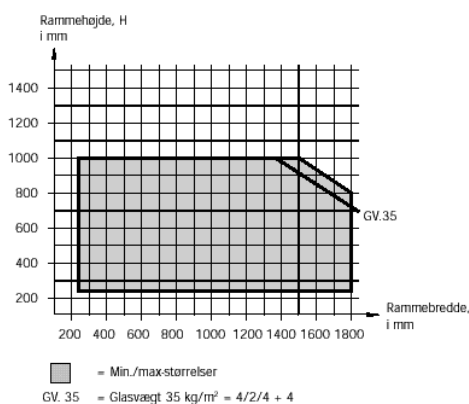
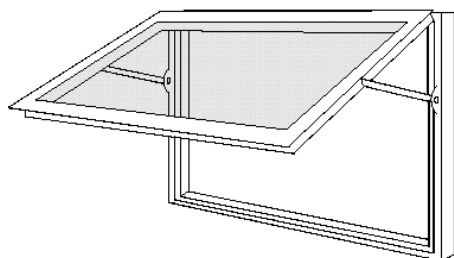
VELFAC 212 - TOPSTYRET VINDUE



Figur 4.2: Illustration af topstyret vindue. Kilde: VELFAC A/S /10/.

Den mest oplagte vinduestype at anvende i forbindelse med en lavtsiddende indløbskomponent til naturlig ventilation er et tophængt udadgående vindue, hvor der kun kan komme luft ind forneden (se Figur 4.3).

VELFAC 208 - TOPHÆNGT VINDUE



Figur 4.3: Illustration af tophængt vindue og dets mulige størrelser. Kilde: VELFAC A/S /10/.

Som det fremgår kan vinduet laves i højder (inkl. ramme) fra 250 mm – 1000 mm, mens bredden kan variere fra 250 mm til 1800 mm (dog kun hvis højden er max. 700 mm af konstruktionsmæssige årsager).

Fordelen ved at anvende et udadgående tophængt vindue til den nye lavtsiddende indløbskomponent vil være, at det giver plads til andre delkomponenter (filter, lydabsorbering, evt. varmeblade mv.) indenfor vinduesrammen.

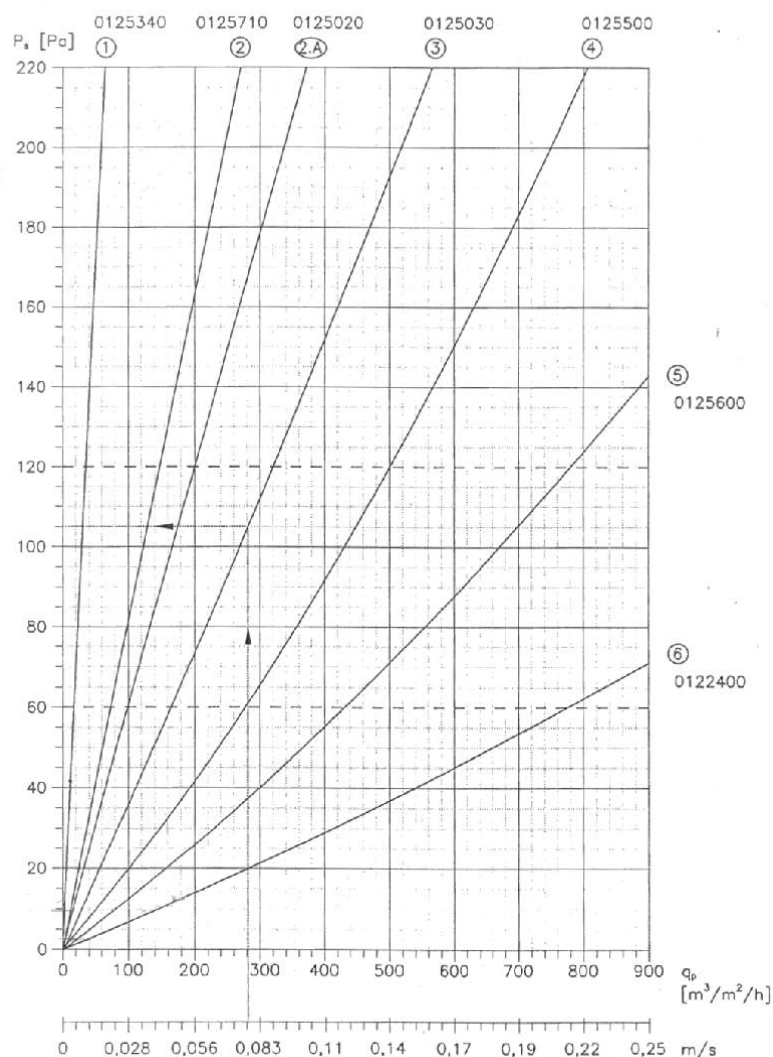
4.2 Tekstilkanaler (fra KE-Fibertec)

Tekstilkanaler anvendes jf. bilag 2 både til ventilation efter lavimpuls- og fortrængningsprincippet. Indblæsning gennem tekstilkanaler bevirker, at indblæsningsluften siver langsomt gennem tekstiloverfladen med en lav og ensartet hastighed, som normalt er under 0,1 m/s. Denne effekt vil fx også være ønskelig i forbindelse med direkte indblæsning i opholdszonen via en lavtsiddende indløbskomponent til naturlig ventilation. Tekstilmaterialet har endvidere en stor mikrobiologisk filtreringsevne (helt op til 60 % af partikler under 1 μm tilbageholdes), som ligeledes burde kunne udnyttes i forbindelse med den nye lavtsiddende indløbskomponent. Dog skal det bemærkes, at pga. fare for tilstopning bør tekstilmaterialet forholdsvis let kunne afmonteres indløbskomponenten med henblik på vask/rensning.

Tryktabet over de eksisterende tekstiltyper (fra KE-Fibertec) ligger dog selv for tekstilerne med den mindste vævningstæthed noget højt (5-15 Pa). Se Figur 4.4. Eksempelvis er tryktabet ca. 13 Pa ved 540 m^3/h over 3 m^2 pose (svarende til 180 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ eller 0,5 m/s).

KE-Fibertecs tekstilkanaler har fx været anvendt på Margeretaskolen i Helsingborg i Sverige i forbindelse med hybride ventilationssystemer med en ventilator i aftrækskanal og direkte indtag af frisk luft vha. højtplacerede tekstilkanaler (uden forvarmning), se Figur 4.5. For yderligere oplysninger samt måleresultater fra den pågældende skole i Sverige se bilag 7.

Datablad 3 – Permeabilitetsdiagram



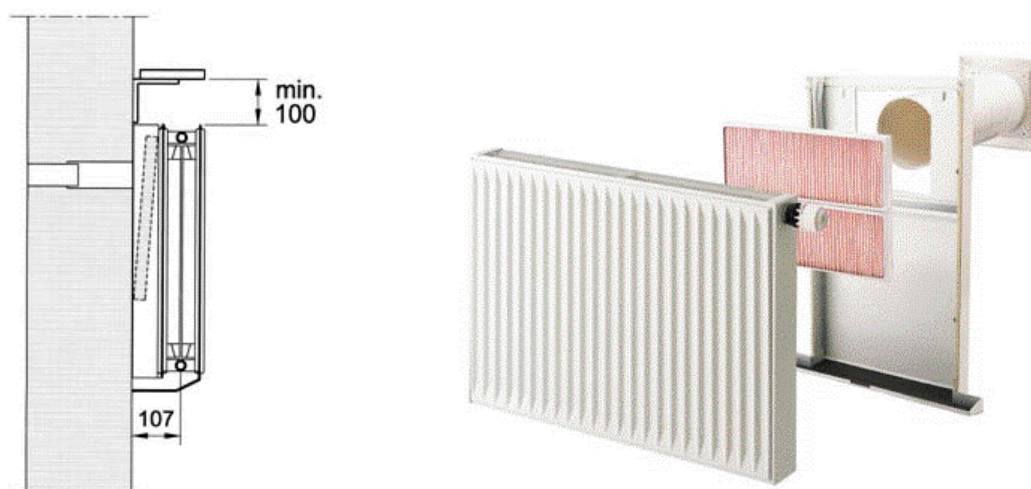
Figur 4.4: Tryktab over tekstilkanaler med forskellig vævningstæthed. Kilde: KE-Fibetec /11/.



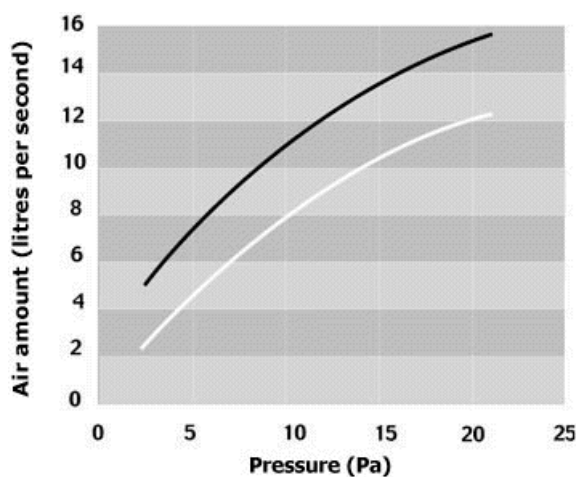
Figur 4.5: Direkte indtag af frisk luft gennem tekstilkanaler på Margeretaskolen i Helsingborg i Sverige. Kilde: KE-Fibertec /11/.

4.3 Kombineret friskluftventil og radiator (RIO Comfort)

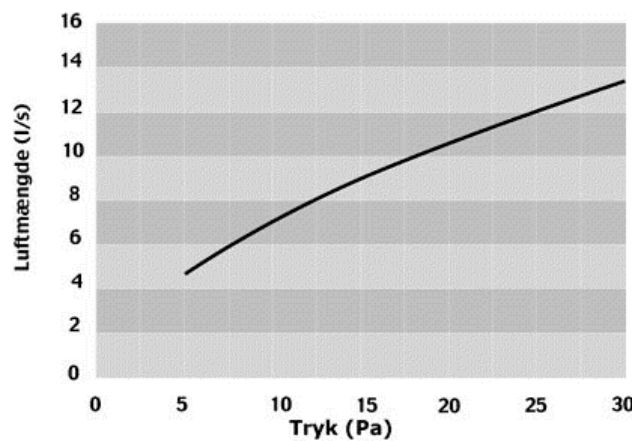
Ribe Jernindustri har udviklet en kombineret friskluftventil og radiator til brug i bygninger med mekanisk udsugning og et forholdsvis beskedent friskluftbehov (primært boliger). Komponenten er karakteriseret ved at ligne en almindelig radiator (indefra) og en tallerkenventil (udefra), se Figur 4.6. Den udvendige afslutning med en tallerkenventil gør, at den af æstetiske hensyn ikke er anvendelig i moderne kontorbyggeri, hvor der ønskes en glasfacade med et ensartet ydre indtryk.



Figur 4.6: Illustration af kombineret ventilenhed og radiator. Kilde:Ribe Jernindustri /12/.

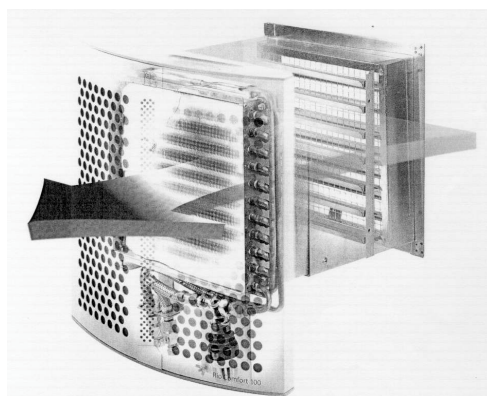


Figur 4.7: Tryktab over ventilenhed med hhv. standardfilter 10 PPI (sort) og allergenfilter EU 8 (hvid). Tryktabet er inkl. kanal gennem væg og udvendigt spjæld. Kilde: Ribe Jernindustri /12/.



Figur 4.8: Tryktab over ventilenhed. Ventil-sten med rektangulær kanal, 2 lydbafler og standardfilter. Kilde: Ribe Jernindustri /12/.

Den kombinerede friskluftventil og radiator har jf. Figur 4.7 og Figur 4.8 kun en begrænset kapacitet (på mindre end 15 l/s). Der findes en anden model (RIO Comfort 100) med større kapacitet, se Figur 4.9.



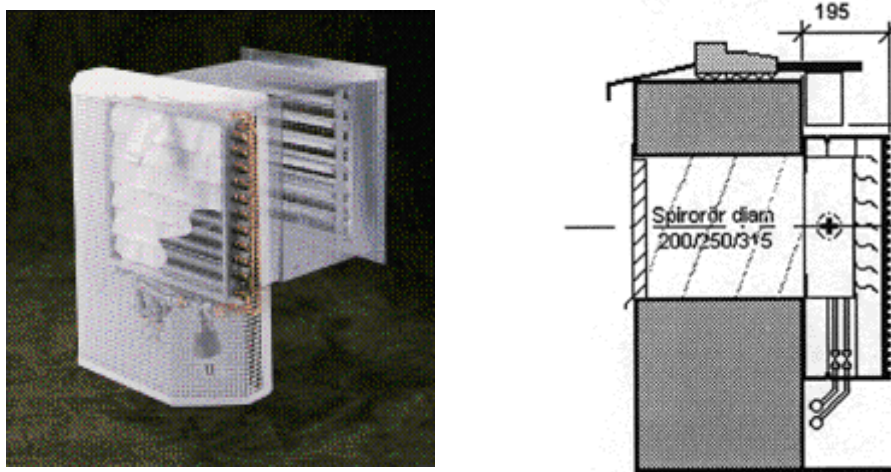
Figur 4.9: RIO Comfort 100. Kilde: Ribe Jernindustri /12/.

4.4 Tilluftskonvektorer og termopaneler (fra MINERGI[®]/Thermopanel AB)

I det følgende beskrives eksempler på svenske tilluftskonvektorer og Thermopaneler (dvs. friskluftindtag sammenbygget med hhv. konvektorer eller radiatorer).

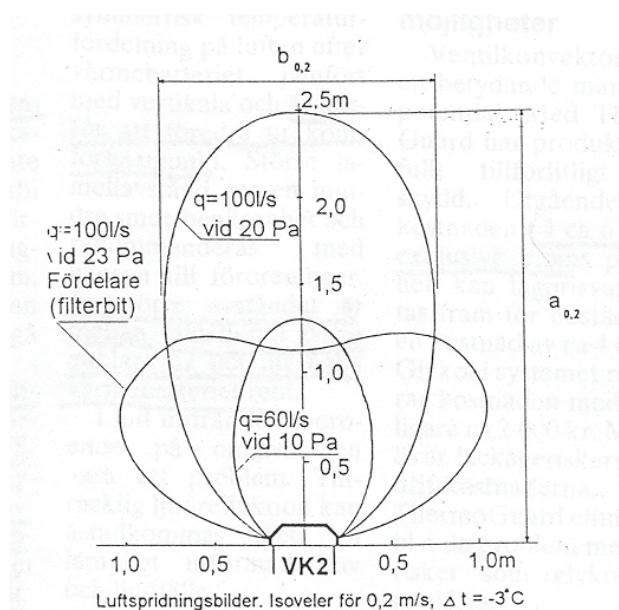
4.4.1 Tilluftskonvektor

I Sverige har et firma stor succes med at markedsføre en såkaldt "tilluftskonvektor" (tidligere markedsført under navnet "ventilkonvektor"), som de hævder kan tilføre trækfri, varm friskluft uden brug af ventilator (i hvert fald på tilluftssiden). Frisk luft udefra tages ind gennem en friskluftventil og føres via en kanal gennem ydervæggen og videre gennem en konvektor monteret på indersiden af væggen, se Figur 4.10.



Figur 4.10: Tilluftskonvektor. Kilde: MINERGI[®]/Thermopanel AB /13/.

Konvektoren er koblet til husets radiatorkreds og er dermed ikke (som mange andre installationer i Sverige) elektrisk. Konvektoren fås hhv. med og uden facadehov udvendigt for regnbeskyttelse, og de yder hhv. 90 og 105 l/s ved en trykforskel på 20 Pa. Se eksempel på strømningsbillede foran tilluftskonvektor i Figur 4.11:

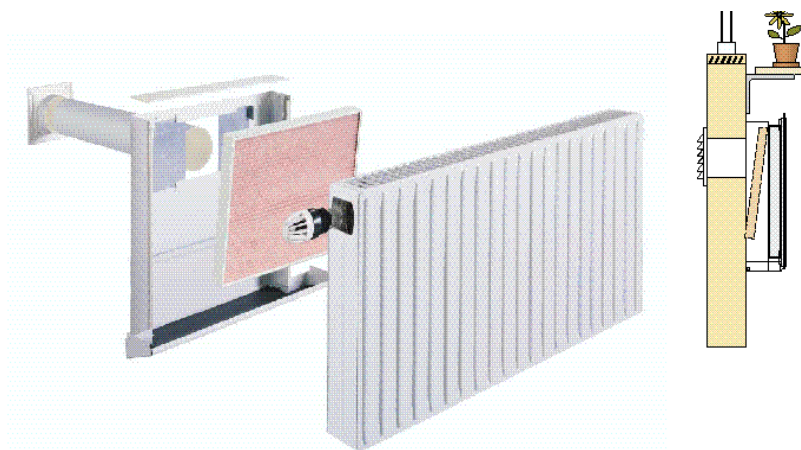


Figur 4.11: Eksempel på strømningsbillede foran tilluftskonvektor. Horisontal projektion af isoveler for 0,2 m/s ved en temperaturforskel på -3° . Kilde: Minergi /15.s36/.

Ulemperne ved konvektoren er, at den er beregnet til montering i ikke-transparente ydervægge (fx murede ydervægge). Desuden er såvel det udvendige som indvendige æstetiske udtryk ikke specielt elegant. Den opfylder derfor ikke krav til moderne kontor-, institutions- og boligbyggeri om ensartede facader/vægge. Desuden betyder det forholdsvis store tryktab over komponenten, at der min. kræves en ventilator i aftrækket (mekanisk udsugning). Naturligt aftræk er ikke tilstrækkeligt.

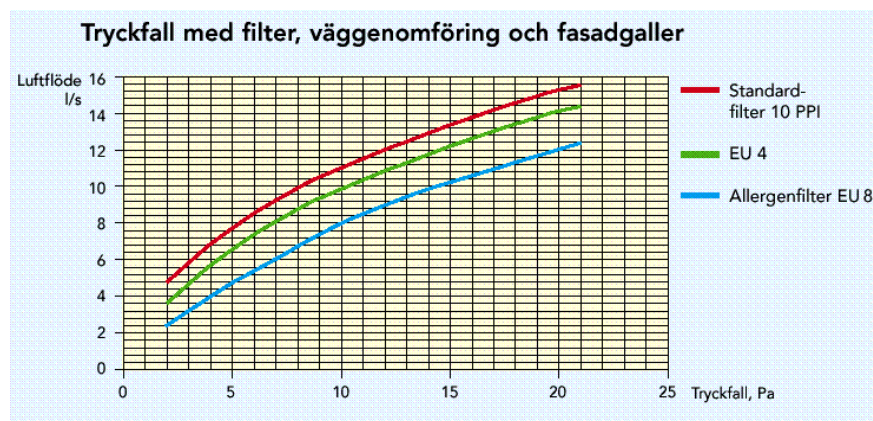
4.4.2 Thermopanel

Samme firma, som markedsfører den ovenfor beskrevne tilluftkonvektor, markedsfører også en kombineret friskluftventil og radiator, svarende til den danske komponent fra Ribe Jernindustri (beskrevet i afsnit 4.3). Se Figur 4.12 nedenfor.

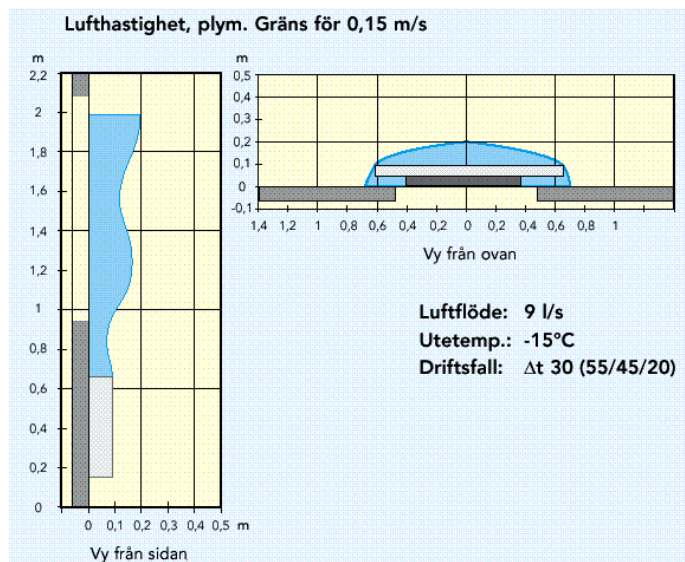


Figur 4.12: Illustration af thermopanel med cirkulær væggenmføring. Kilde: MINERGI[®]/Thermopanel AB /13/.

Ventilationskapacitet, trykfald over og nærzone omkring komponenten svarer ligeledes stort set overens med oplysningerne fra Ribe Jernindustri, se Figur 4.13 og Figur 4.14.



Figur 4.13: Trykfald over thermopanel ved forskellige luftmængder og filtertyper.



Figur 4.14: Nærzone (lufthastighed > 0,15 m/s) foran armatur. Kilde: MINERGIP/Thermopanel AB /13/.

4.5 Sammenfatning

Der er generelt mange erfaringer fra hidtil udførte undersøgelser og forsøg samt fra eksisterende konstruktioner og komponenter, som er relevante i forbindelse med udviklingen af nye lavtsiddende indløbskomponenter til naturlig fortrængningsventilation.

Fra det gennemgåede materiale om naturlig ventilation i al almindelighed (primært via traditionelle, højsiddende vinduesåbninger) er en vigtig erfaring, at der bør skelnes kraftigt mellem ensidig ventilation og tværventilation. I forbindelse med ventilationskonceptet med naturlig fortrængningsventilation via de nye lavtsiddende indløbskomponenter, vil der uvægerligt blive tale om tværventilation, hvor den friske luft tilføres ved lokalets facadevæg via de nye lavtsiddende indløbskomponenter, fordeler sig langsomt i et lag nede ved gulvet, strømmer med konvektionsstrømmene opad mod loftet og forlader lokalet foroven via udløbsåbninger modsat facadevæggen.

Erfaringerne peger desuden på, at det vil være muligt at udvikle modeller og beregningsmetoder til forudsigelse af åbningskoefficienter, luftfordelinger og lufthastigheder i opholdszonen som funktion af komponentens åbningsgrad, samt tryk- og temperaturforholdene. Det skal dog i denne forbindelse understreges, at flere uafhængige undersøgelser har vist, at indløbsforholdene ved naturlig ventilation er langt mere komplicerede og varierende end tilsvarende strømningsforhold i forbindelse med indblæsningsarmaturer til mekanisk ventilation. Som eksempel kan nævnes, at specielt for små vinduesåbninger og små trykforskelle kan åbningskoefficienten variere med op til ca. 40 % som funktion af Reynolds tal (isoterme forhold) eller Archimedes tal (ikke-isoterme forhold), mens den for et mekanisk indblæsningsarmatur er nogenlunde konstant.

Erfaringer fra forsøg med såvel sidehængte vinduer i middelhøjde som højsiddende bundhængte vinduer under ikke-isoterme tværventilationsforhold har vist, at selv med vinduer placeret et godt stykke over gulvniveau er det muligt at etablere den ønskede lagdelte strømning nede ved gulvet, således den friske luft når langt ind i rummet. Det har vist sig, at den etablerede lagdelte strømning svarer til den radiale (eller semi-radiale) strømning fra traditionelle lavhastighedsdiffusorer til (mekanisk) fortrængningsventilation i et rum med forhindringer.

Fra det gennemgåede materiale om fortrængningsventilation kan det fremhæves, at der eksisterer mange forskellige udformninger af lavhastighedsdiffusorer til mekanisk fortrængningsventilation afhængig af det tilsigtede anvendelsesområde. Gulvarmaturer med induktion, gulvarmaturer uden induktion eller tekstilkalener påvirker temperaturgradient og nærzone meget forskelligt, lige såvel som størrelsesordenen af tryktabet over armaturerne er vidt forskellige. Ved valg af armaturer uden induktion bør indblæsningstemperaturen fx

være relativt høj (18-20 °C), idet der foran armaturet stort set ingen opblanding sker. Til gengæld er tryktabet over et armatur uden induktion væsentligt mindre end over et armatur med induktion. Fælles for indblæsningsenhederne til fortrængningsventilation er, at de alle har en eller anden form for et kegleformet element og/eller en indbygget tekstilmåtte med en til formålet passende vævningstæthed med henblik på at opnå en ensartet luftfordeling over armaturet. I forbindelse med udviklingen af den nye indløbskomponent vil det sandsynligvis specielt være erfaringerne fra indblæsning med tekstilkanaler, der vil være relevante, idet tekstilmaterialet i sig selv virker luftfordelende, samtidig med at det har en vis filtreringsevne.

Et beregningseksempel for en situation med plan fortrængningsventilation (fx indblæsning langs en hel facadevæg) viser for et konkret armatur, at der med typiske luftmængder (pr. m. facade) for kontorer, mødelokaler og institutioner kan forventes forholdsvis lave lufthastigheder på omkring 0,02-0,15 m/s. Til opstilling af modeller og beregningsmetoder til forudsigelse lufthastigheder og temperaturer i opholdszonen i forbindelse med naturlig fortrængningsventilation via de nye lavtsiddende indløbskomponenter vil der dog være behov for at undersøge gyldigheden af hidtil benyttede relationer vha. nye laboratorieforsøg, idet der vil være tale om en helt ny situation med elementer fra såvel naturlig ventilation som mekanisk fortrængningsventilation samt en hel ny "armaturudformning".

På Cambridge Universitet i England er der blevet forsket i naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet ved kombination af såvel vind som termisk opdrift (inkl. dynamiske effekter, men uden varmekilder). Det har i denne forbindelse vist sig hensigtsmæssigt at indføre det såkaldte Froude tal (Fr), der beskriver det relative forhold mellem den vind-inducerede og den opdrifts-inducerede (termisk inducerede) hastighed. Det vil sandsynligvis også være relevant at anvende Froude tallet (i en eller anden form) ved opstilling af modeller til forudsigelse af luftfordelinger, lufthastigheder og andre komfortparametre i opholdszonen.

Fra det gennemgåede materiale om relevante konstruktioner, materialer, komponenter og systemer skal det bl.a. fremhæves, at tidens arkitektoniske trends gør, at fabrikanter af vinduessystemer oplever en stigende efterspørgsel efter facader med et ensartet ydre (dvs. samme facadesystem over hele facaden). Med andre ord vil det sige at specielt indenfor anvendelsesområderne kontorbyggeri og institutioner vil den nye indløbskomponents succes i høj grad afhænge af dens ydre æstetiske udtryk samt af, hvorvidt den fremstår som et integreret facadeelement samtidig med, at det fungerer som et installationsteknisk element.

Undersøgelse af produktmateriale fra en dansk fabrikant og leverandør af tekstilkanaler (KE-Fibertec) har vist, at de eksisterende tekstiltyper til indblæsning via tekstilkanaler, har et tryktab, der er relativt højt (5-15 Pa). Det vil givetvis være nødvendigt at udvikle tekstiltyper med en mindre vævningstæthed med deraf følgende lavere trykfald, hvis de skal kunne anvendes i den nye indløbskomponent til naturlig ventilation.

I såvel Danmark som i Sverige findes der allerede forskellige kombinationer af friskluftindtag og radiatorer/konvektorer, hvoraf de fleste dog har en forholdsvis begrænset kapacitet (3-11 l/s) ved en trykforskel på 3-10 Pa (svarende til, at deres anvendelse primært er begrænset til boliger). Enkelte produkter har dog en kapacitet på op til 90-100 l/s ved en trykforskel på 20 Pa. Et trykfald på 20 Pa er så højt, at der min. kræves en hjælpeventilator i aftrækskanalen. Desuden er produkterne afsluttet udvendigt med en tallerkenventil eller et jalousispyld, hvilket af æstetiske årsager ofte gør dem uegnede til anvendelse i moderne kontorbyggeri.

5 Fastsættelse af krav

Afhængig af hvilke anvendelsesområder og systemudformninger de nye lavtsiddende indløbskomponenter til naturlig ventilation (jf. afsnit 3.1) tænkes anvendt til, vil der bl.a. være forskellige krav til indblæsnings-temperaturer, luftmængder samt maksimale tryktab (pga. forskellige drivtryk). Med systemudformninger menes her, om der fx kun anvendes decentrale indtag og afkast, eller om der anvendes decentrale indtag sammen med centralt afkast, om der anvendes en hjælpeventilator i afkast (hybrid ventilation), om der fx etableres luftsolfanger og/eller solskorsten til forøgelse af drivtrykket osv.

I en vintersituation er udetemperaturen typisk -5 til +5 °C og ventilationsmængden vil her være bestemt af friskluftbehovet. I en forårssituation er udetemperaturen typisk 5-20 °C, og ventilationsmængden er som regel ligeledes bestemt af friskluftbehovet. Sommersituationen er derimod karakteriseret ved høje udetemperaturer (> 17-20 °C) og ventilationsmængden vil i reglen være bestemt af kølebehovet. Når udetemperaturen er større end ca. 17 °C, vil der i de fleste bygninger ikke være noget opvarmningsbehov, og varmegenvinding bør derfor undgås.

Det kan diskuteres, om det er nødvendigt at stille krav om, at ventilationskonceptet skal kunne virke i alle driftssituationer hhv. vinter og forår/efterår. Det kan være mere hensigtsmæssigt fx at kræve, at systemet skal udformes, så det fungerer i 80 % af de forekommende driftssituationer med naturlig ventilation, eller så det kan fungere i et hybrid ventilationssystem med en lille hjælpeventilator i udløbet. Det er eksempelvis ikke specielt energikrævende at installere en ventilator i udløbet til at hæve drivtrykket til ca. 10-15 Pa, hvorved integrering af specielle faciliteter som filtrering af udeluften, lydreduktion, varmegenvinding mv. bliver mulig i stort set alle driftssituationer.

I det følgende diskuteres forskellige mulige anvendelsesområder og systemudformninger og deraf følgende krav til indløbskomponentens udformning.

5.1 Anvendelsesrelaterede krav

Ved anvendelsesrelaterede krav, menes der i det følgende krav, der relaterer sig til komponenten/konceptets anvendelse, herunder nødvendig ydelse mht. luftmængder, tryktab og indblæsningsstemperatur samt nødvendig luftkvalitet (evt. krav til filtrering) og evt. krav til støjniveau.

Der er jf. afsnit 3.1 flere forskellige områder, hvor anvendelse af den nye lavtsiddende indløbskomponent til naturlig ventilation vil være relevant. Det gælder fx:

- Skoler/institutioner
- Kontorbyggeri (flerrumskontorer, mødelokaler mv.)
- Industrien
- Evt. boliger

De forskellige områder ovenfor indebærer vidt forskellige krav til luftmængder og drivtryk.

Den nødvendige luftmængde, der skal tilføres pr. m facade (dvs. ventilationsbehovet), afhænger af rumdybde, antal personer pr. m² gulvareal og af friskluftbehovet pr. person.

For tre af de forskellige tiltænkte anvendelsesområder (hhv. flerrumskontorer, mødelokaler og institutioner) er der udført en række parametervariationer (se bilag 3 og bilag 4), hvor der er regnet på nødvendige luft-

mængder og opnåelige drivtryk ved typiske udformninger af de pågældende lokaler, dvs. med typiske belastninger, rumgeometrier mv. Hovedresultaterne fra beregningerne er angivet i afsnit 5.1.3 - 5.1.5, mens de anvendte beregningsudtryk kort er angivet i bilag 6.

5.1.1 Ventilationsbehov pr. m facade

Ventilationsbehovet og dermed nødvendig luftmængde, der skal tilføres et rum pr. m facade afhænger af rumdybden, antal personer pr m^2 og af friskluftbehovet pr person. I bilag 3 er ventilationsbehovet udtrykt som tilført luftmængde pr m facade beregnet for rumdybder på hhv. 5 m, 9 m og 12 m, for personbelastninger svarende til hhv. $10 m^2/person$, $15 m^2/person$ og $20 m^2/person$ samt for friskluftmængder på hhv. 7 l/s pr. person, 10 l/s pr. person og 15 l/s pr. person.

Det gennemsnitlige behov er ca. 6 l/s pr m facade stigende til ca. 11-12 l/s i bygninger med høj belastning.

5.1.2 Drivtryk ved naturlig ventilation

Drivtrykket for den naturlige ventilation afhænger af bygningshøjde, højdeforskel mellem åbninger, bygnings placering, læforhold og facadeorientering. Der er jf. bilag 4 regnet på følgende forskellige bygningsudformninger og -beliggenheder:

- Bygningshøjder på hhv. 4 m (en etage), 7 m (to etager) og 15 m (fire-etages bygning).
- Placeringer i hhv. dyrket fladt landskab, forstadsbebyggelse eller bycentrum.
- Læforhold svarende til hhv. en frit eksponeret (ingen lægivere i nærheden), en delvis eksponeret (lægivere med en gennemsnitlig højde på 50 % af bygningshøjden) og en beskyttet bygning (lægivere med en gennemsnitlig højde af samme størrelse som bygningshøjden).
- Facadeorienteringer mod hhv. nord, øst, syd og vest.

Dette resulterer i mere end 100 variationer. For overblikkets skyld er der derfor udvalgt 9 cases, se nedenfor.

Udvalgte cases

Case	Placering	Læforhold	Orientering	Bygningshøjde (m)
1	Fladt land	Frit eksponeret	Syd	4
2	Fladt land	Delvis eksponeret	Syd	4
3	Forstad	Delvis eksponeret	Syd	7
4	Forstad	Delvis eksponeret	Syd	15
5	Forstad	Beskyttet	Syd	4
6	Forstad	Beskyttet	Syd	7
7	Bycentrum	Beskyttet	Syd	15
8	Bycentrum	Beskyttet	Vest	15
9	Forstad	Delvis eksponeret	Vest	7

Beregningsresultaterne viser, at drivtrykket i opvarmningssæsonen gennemsnitlig er af størrelsesordenen 8-14 Pa. Typisk vil kravet være, at en tilstrækkelig luftmængde skal kunne tilføres i 85-90 % af tiden. Det betyder, at tryktabet i indtagssystemet højst må være af størrelsesordenen 3 Pa for en- eller toetages bygninger, dvs. med højdeforskelle mellem indtag og afkast på 3-6 m. For højere bygninger eller for bygninger, hvor højdeforskellen mellem ind- og udløb er større (14 m), kan det accepteres, at tryktabet er af størrelsesordenen 8 Pa.

Generelt er der tale om meget små drivtryk sammenlignet med tryktabene i traditionelle mekanisk ventilerede anlæg. Det kan derfor blive nødvendigt at kunne supplere den naturlige ventilation med ventilatorstøtte i

perioder med lavt drivtryk. Elforbruget til disse vil dog, som tidligere nævnt, være meget begrænset sammenlignet med tryktabene i traditionelle mekanisk ventilerede bygninger.

Der kan ikke registreres betydelige forskelle i det samlede drivtryk i hele opvarmningssæsonen, hvis hhv. brugstiden (kl. 8-17) og hele døgnet sammenlignes.

5.1.3 Kontorer

I kontorbyggeri varierer luftmængderne typisk fra 5-10 l/s pr. person, svarende til luftmængder på 180-360 m³/h pr. kontorafsnit til 10 personer. For cellekontorer med en rumdybde på op til 5 m med ensidig ventilation vil friskluftbehovet være ca. 3-5 l/s pr. m facade, og for storrumskontorer med en rumdybde på 9-12 m med tvær- eller stakventilation vil friskluftbehovet være ca. 6-12 l/s pr. m facade afhængig af personbelastningen.

Det vil være en fordel med stor rumhøjde - dels for at udnytte voluminet som buffer for varme og forurening og dels for at øge højdeforskellen mellem ind- og udløbsåbninger (og dermed drivtrykket). For cellekontorer med ensidig ventilation må tryktabet over indtaget ikke være mere end 2 Pa ved en luftmængde på 3-5 l/s. For storrumskontorer i flere etager med tvær- eller stakventilation kan tryktabet ved en luftmængde på 6-12 l/s være ca. 8 Pa på de nederste etager og ca. 3-4 Pa på de øverste. Da friskluft tilføres ved facaden, vil det være en fordel at placere gangzonerne der. Dette vil forøge nærzonen, og derved kan det accepteres, at den har en størrelse på ca. 2 – 2,5 m.

5.1.4 Mødelokaler

I mødelokaler er belastningen væsentlig højere. Derfor stiger luftmængden pr. m facade ca. med en faktor fem. Kravene vil være 20-60 l/s pr. m facade med et tryktab under 8 Pa. Bemærk, at ensidig ventilation ikke vil kunne tilføre tilstrækkelig luft. Mødelokaler med lang facade og lille rumdybde vil kræve de mindste luftmængder pr. m facade. I mødelokaler bør nærzonen ikke være større end 1 m.

5.1.5 Institutioner

I skoler og børneinstitutioner er luftmængderne typisk 6-10 l/s pr. person, dvs. ca. 450-900 m³/h pr. klasseværelse ved 20-25 elever pr. klasseværelse. Hvis BR95's minimumskrav følges, vil den nødvendige friskluftmængde i børnehaver og skoler være af størrelsesordenen 10-20 l/s pr. m facade. Skoler opføres sædvanligvis i enetagesbygninger, og tryktabet må derfor ikke være højere end ca. 3-4 Pa ved den dimensionerede luftmængde. Udnyttes en stor loftshøjde, kan den kontinuerede luftudskiftning reduceres mod til gengæld at indføre periodevis udluftning. Nærzonen skal være mindre end 1 m.

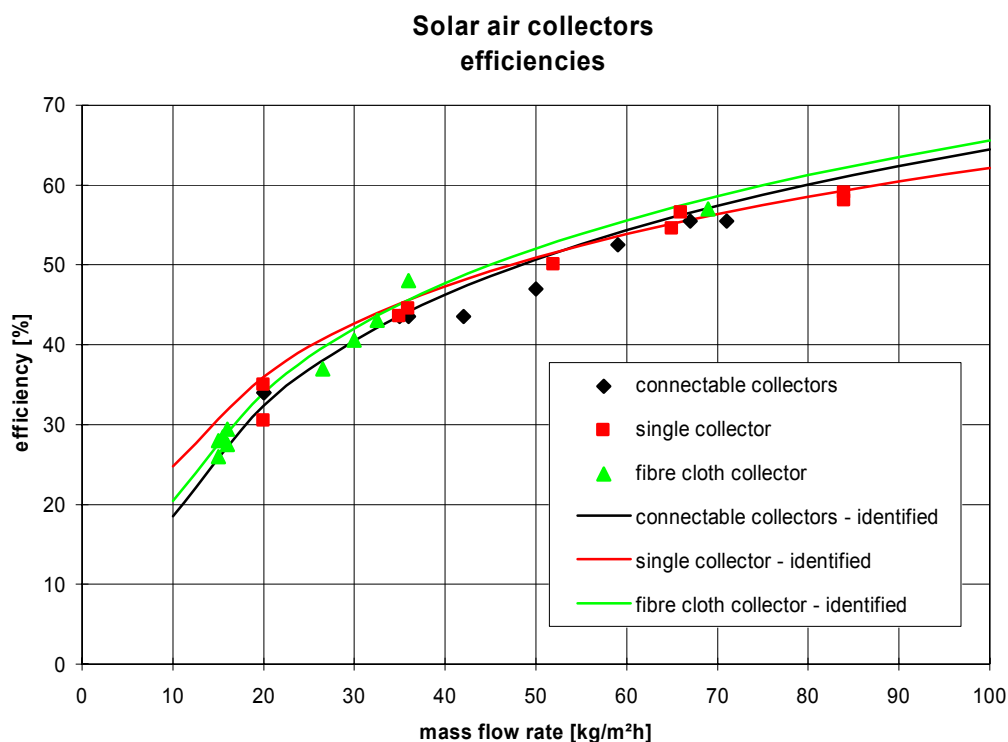
5.1.6 Åbningsarealer

De nødvendige åbningsarealer i facaden afhænger af drivtrykket, der er til rådighed, af luftmængden, der skal tilføres rummet samt af tryktabet i systemet. I bilag 5 er den nødvendige åbningshøjde af et facadebånd langs facaden vist som funktion af drivtryk og luftmængde for fem situationer med forskelligt tryktab i systemet. Den første situation giver åbningsgraden af et almindeligt vindue, mens de øvrige fire situationer angiver åbningsgraden ved forskellige tryktabsniveauer svarende til henholdsvis 2 Pa, 5 Pa, 10 Pa og 15 Pa ved en hastighed på 1 m/s gennem åbningen. Åbningsstørrelserne er indenfor det realistisk mulige. (Åbningsarealet refererer ikke kun til vinduets åbning men til det frie areal igennem alle dele af indblæsningskomponenten, dvs. også frit gennemstrømningsareal gennem varmeplade, spjæld, m.m.) For kontorbygninger i situationen med et luftbehov på 6-8 l/s pr. m facade og et drivtryk på 3-5 Pa vil åbningshøjden være i størrelsesordenen 2-5 cm. Man skal dog være opmærksom på, at der i beregningerne er forudsat, at 80 % af facaden kan benyttes, og at åbningsarealerne vil stige, hvis kun en mindre del af facadens længde kan bruges (fx af praktiske eller økonomiske årsager).

5.1.7 Forvarmning af udeluften

For at undgå problemer med træk i opholdszonen som følge af for lav indblæsningstemperatur vil det være nødvendigt med en form for forvarmning af udeluften.

Hvis indløbsåbningen udformes med et vindue (en lem af transparent glas), så sollyset kan ramme det bagvedliggende tekstil- eller filtermateriale, bliver indløbskomponenten en luftsolfanger til forvarmning af den friske luft til bygningen, idet filteret udgør luftsolfangerens absorber. For at øge effektiviteten af luftsolfangeren bør tekstilmaterialet være mørkt – helst sort. Trykfaldet over filteret bevirker, at luftgennemstrømningen gennem filteret bliver jævnt fordelt. Da overførelsen af solvarmen afsat på filteret sker ved luftens gennemgang gennem filteret, bliver varmeoverføringsevnen mellem absorber (filter/tekstil) og luft meget høj. Da det er frisk (kold) luft, der strømmer ind mellem dæklaget (indløbskomponentens rude) og absorberen, er dette det koldeste sted i solfangeren, hvilket bevirker, at varmetabet fra solfangeren bliver meget lavt. Alt i alt vil denne konstruktion frembringe en luftsolfanger til forvarmning af friskluft med en meget høj effektivitet, som det ses af Figur 5.1, der viser resultatet af afprøvningen af tre luftsolfangere af ovennævnte type. Den ene er en "Fibre cloth collector" af ovennævnte type med en absorber bestående af en sort fildug (denne solfanger er på 3 m²). De andre to er hhv. en "connectable collector" og en "single collector" med absorber af en sort perforeret metalplade med et areal på henholdsvis 9,2 og 3 m². Som det ses, er effektiviteten som følge af den normaliserede massestrøm identisk for de tre typer luftsolfangere.



Figur 5.1: Målte effektiviteter for luftsolfangere med perforerede absorbere til forvarmning af friskluft Kilde: /19/.

Ved en designvolumenstrøm gennem de nye lavtsiddende indløbskomponenter på 5-20 l/s pr. m facade svarende til 36-144 m³/hm² ved 20 °C (eller ca. 40-175 kg/hm²), kan indløbskomponenterne opnå en effektivitet ved forvarmning af friskluft på ca. 50-65 % af det udnyttelige solindfald. (Det udnyttelige solindfald er det totale solindfald på fladen minus den del af solindfaldet, der reflekteres bort i dæklaget).

Den anvendte fiberdug i "fibre cloth" luftsolfangeren fra Figur 5.1 er en forholdsvis kraftig filt med en tykkelse på ca. 2 mm, hvilket medfører et forholdsvis højt tryktab. Til anvendelse i en indløbsåbning til naturlig

ventilation vil det være nødvendigt at anvende en dug/tekstil med større luftgennemtrængelighed og mindre tryktab.

Til håndtering af driftssituationer uden sol kan luften i stedet forvarmes ved integration af en varmeflade eller sammenbygning med bygningens radiatorsystem jf. afsnit 4.3 og 4.4.

Ved integration af en varmeflade (veksler) kan flere funktioner udnyttes på en gang. For eksempel kan varmefladen, som beskrevet og afprøvet i delprojekt II til nærværende projekt, kobles sammen med en tilsvarende varmeflade i det naturlige (eller hybride) ventilationssystem udløb med henblik på etablering af naturlig ventilation med varmegenvinding. I kolde vintersituationer (uden sol) kan veksleren kobles til bygningens varmesystem, således at en tilstrækkelig høj indblæsningstemperatur opnås.

Det skal bemærkes, at selvom komponenten indeholder en varmeflade til forvarmning af udeluften, vil det formentlig stadig være nødvendigt med suppleringsvarme i rummet om natten og i weekenden (dvs. bygningens sædvanlige varmesystem kan ikke undværes).

5.1.8 Filtrering

Der er ingen specifikke krav til filtrering af udeluft i kontorer, skoler eller institutioner, men indførelse af en filtreringsenhed i forbindelse med indløbskomponenten vil selvfølgelig forøge anvendelsesområdet for komponenten. Et filter vil desuden modvirke tilstopning af varmefladen i komponenten. Det foreslås derfor, at der som et minimum gives mulighed for en specialudgave af komponenten indeholdende et pollenfilter el. lign.

Det bør undersøges, om en tekstilflade som absorber og til fordeling af luften over varmefladen/resten af komponenten samtidig kan virke som et filter eller om tryktabet derved bliver for højt. I givet fald er det selvfølgelig nødvendigt, at tekstilfladen er forholdsvis let aftagelig (og gerne vaskbar).

5.1.9 Støjreduktion

Indtagssystemet/-komponenten skal i sig selv være støjsvag i åben tilstand (også i blæsevejr). Uden bidrag fra eksterne støjkluder må den ikke give anledning til et højere støjniveau end 20 dB. På den måde kan komponenten anvendes ligesom andre vinduer. Det skal fx sikres, at der ikke opstår hylelyde som følge af en lille åbningsspalte i tilfælde af et stort drivtryk (stærk vindpåvirkning). Denne konklusion er som tidligere nævnt ikke generel.

I åben tilstand skal lydreduktionen være mærkbart bedre, end tilfældet er for et åbentstående vindue. Hvis der indføres ekstra lydisolering, således at lydniveauet reduceres i forhold til udenfor, vil komponenten desuden bedre kunne anvendes i facader, der vender ud til miljøer med gadestøj el. lignende (modsat almindelige vinduer). Det anbefales således, at der gives mulighed for en specialudgave af komponenten med forøget lydreduktion. Der kan fx stræbes efter samme lydreduktion som for et lukket vindue (dvs. 30-32 dB).

Når indblæsningsenheden er lukket, skal den have en lydreduktion, der modsvarer et alm. vindue, dvs. ca. 30-32 dB.

5.2 Funktionsmæssige krav

Ved funktionsmæssige krav, forstås krav, der skal overholdes for at sikre komponentens funktionalitet i forskellige kritiske driftssituationer.

5.2.1 Filtrering/rengøring

Indløbskomponenten skal kunne åbnes/gøres tilgængelig for rengøring (og evt. filterudskiftning), således tilstopning af tekstil/filter, varmeflade mv. kan imødegås.

Rengøringen af filteret er bl.a. vigtig af hensyn til luftkvaliteten. Hvis komponenten indeholder et filter, kan dette (modsat hensigten) danne grobund for diverse allergener i form af bakterier og virus, hvis det ikke rengøres jævnligt (jf. tidligere erfaringer fra Sverige /16.s62/). Desuden vil tilstopning af filteret medføre øget tryktab, der igen vil medføre nedsat luftmængde.

5.2.2 Slidstyrke/holdbarhed

Armaturet/indblæsningsenheden skal være robust og slidstærk – specielt i forbindelse med institutionsbyggeri. Det vil være rimeligt at stille krav om, at bevægelige dele fx skal kunne holde lige så lang tid som andre vindueselementer.

5.2.3 Frostsikring

For at der ikke skal ske frostsprængninger i komponentens varmefflade, er det nødvendigt med en eller anden form for frostsikring.

5.2.4 Tyverisikring

I henhold til DS 471/Til.1 kan et vindue i ventilationsstilling ikke betragtes som forsvarligt lukket i forsikringsmæssig betydning. Hvis luften tages ind gennem en åbenstående ramme, skal indbrudssikkerhed sikres på en anden måde, f.eks. ved hjælp af tremmer med en max. afstand på 12 cm.

5.2.5 Brand

Indblæsningsenheden skal kunne opfylde de samme brandkrav, som der stilles til andre facadeelementer, herunder elementer der passerer forbi lejlighedsskel og etageadskillelse.

Bygningsreglementet, BR 95 angiver:

- For bygninger med 1 etage er kravet til såvel udvendige som indvendige overflader mindst klasse 2
- For etageboligbyggeri og hoteller op til en højde af 23 m til underkant redningsåbning er kravet til udvendige overflader mindst klasse 1 og til indvendige overflader mindst klasse 2
- For alle andre bygninger er kravet til såvel udvendige som indvendige overflader mindst klasse 1

5.3 Markedsføringsmæssige krav

Ved markedsføringsmæssige krav, forstås krav, der er mere eller mindre nødvendige at opfylde, for at bygherrer og arkitekter i sidste ende kan forventes at ville anvende den nye komponent i konkrete byggerier, og som dermed er nødvendige at opfylde, for at komponentens implementering i praksis gøres mulig.

5.3.1 Geometri

Komponenten må ikke have for stor dybde. Den skal helst svare til tykkelsen af de typiske lette facadeløsninger, hvor komponenten forventes anvendt. Det vil i praksis sige svarende til ca. 120-150 mm.

Hvis indløbskomponenten kommer til at indeholde en forvarmningsenhed, kan der evt. argumenteres for, at den også må fylde lige så meget som en smal radiator, dvs. i alt ca. 150-350 mm.

For at indløbskomponenten skal kunne passes ind i typiske facadesystemer, må højden af komponenten max. være 700 mm.

5.3.2 Styring/regulering

Indløbskomponenten skal kunne fungere automatisk, idet der skal tages hensyn til, at indblæsningstemperaturen skal ligge inden for et forudindstillet interval (i reglen 2-3 °C undertemperatur – dvs. ca. 18-20 °C).

Det er desuden et krav, at indløbskomponenten skal kunne CTS-styres, men en selvregulerende version vil også være anvendelig i mindre kontorbygninger. Der bør dog samtidig være mulighed for decentral/lokal regulering (kun relevant for nogle af anvendelsesområderne).

5.3.3 Økonomi

Indløbskomponentens prisniveau bør ligne prisniveauet for lignende facadesystemer og/eller ventilationsprincipper. Det er således et krav, at m²-prisen for indblæsningsenheden (uden automatik, varmefflade mv.) maksimalt må være 10 % dyrere end et vindue med indbygget spalteventil.

5.3.4 Æstetisk udtryk

Baggrunden for VELFACs interesse i projektet er en stigende efterspørgsel efter facader med et ensartet ydre (samme facadesystem over hele facaden) uanset transparente eller ikke-transparente felter, samtidig med at facaden skal indeholde flere og flere funktioner.

For at arkitekter og bygherrer skal synes om og vælge komponenten (og dermed sørge for dens implementering), er det nødvendigt med et harmonisk synsindtryk. Set udefra skal indblæsningsenheden i æstetisk henseende kunne tilpasses resten af facaden, så den sammen med vinduerne kan indgå i "vinduesbånd" eller "curtain walling".

Set indefra bør indløbskomponenten ligeledes ligne en almindelig indvendig beklædning så meget som muligt (fx gipsvæg, brystningselement el. lign.). Det vil desuden være en fordel, hvis der kommer lys igennem komponenten (translucent). Dette stiller krav til absorbermaterialet (tekstil-/filtermaterialet).

5.3.5 Varmetab

I nogle af de første systemer med naturlig ventilation, har der vist sig at være relativt store infiltrationstab i forbindelse med indtagssystemer, der er afsluttet med spjæld, idet disse har vist sig ikke altid at slutte tæt.

For at undgå unødigt varmetab uden for opholdstiden om vinteren, er det derfor vigtigt, at komponenten slutter tæt i lukket tilstand. Ved den påtænkte udformning af indløbskomponenten med et vindue yderst (oplukkeligt, men tætsluttende), vil isoleringsevnen i lukket tilstand være bedre end resten af glasfacaden, men det foreslås, at den skal kunne opfylde bygningsreglementets isoleringskrav til en tung ydervæg, dvs. $U = 0,30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

5.4 Sammenfatning/projektafgrænsning

I Tabel 5.1 er de forskellige krav ved anvendelse af komponenten til hhv. kontorer, mødelokaler og institutioner (jf. afsnit 5.1.3-5.1.5) angivet:

	Kontorer		Mødelokaler	Institutioner
	Cellekontorer	Storrumskontorer		
Ventilationsprincip	Ensidig ventilation	Tværv ventilation	Tværv ventilation	Tværv ventilation
Rumdybde	~ 5 m	~ 9-12 m	~ 9-12 m	~
Ventilationsmængde pr. m facade	~ 3-5 l/s pr. m	~ 6-12 l/s pr. m	~ 20-60 l/s pr. m	~ 10-20 l/s pr. m
Naturligt drivtryk	< 2 Pa	< 3-8 Pa	< 8 Pa	< 3-4 Pa
Max. nærzone	~ 1 m	~ 2-2,5 m	~ 1 m	~ 1 m

Tabel 5.1: Oversigt over diverse anvendelsesrelaterede krav.

Hvis ovenstående krav sammenfattes, er det opfattelsen, at hvis indløbskomponenten skal kunne drives alene af naturligt drivtryk, skal den kunne:

- håndtere luftmængder i intervallet 5-20 l/s pr. m facade
- have et samlet tryktab på max. ca. 3-8 Pa
- maksimalt have en nærzone på 1-2 m.

Kravet til maksimalt tryktab afhænger af, om indløbskomponenten skal anvendes til ren naturlig ventilation eller evt. til hybrid ventilation. Det er eksempelvis ikke specielt energikrævende at installere en ventilator i udløbet til at hæve drivtrykket til ca. 10-15 Pa, hvorved integrering af specielle faciliteter som filtrering af udeluften, lydreduktion, varmegenvinding mv. bliver mulig.

For at modvirke traditionelle problemer, som kendes fra naturlig ventilation via almindelige vinduesåbninger, vil det være nødvendigt med en form for forvarmning af den friske udeluft, inden den blæses ind i rummet. Her foreslås det bl.a. at udforme komponenten som en form for luftsolfanger ved integrering af et form for tekstilmateriale, der samtidig kan fungere som filter og luftfordeler. Aktuelle testresultater fra luftsolfangere med tekstil- eller filtermaterialer som absorber er gode.

Et andet forslag til forvarmning af luften i komponenten er at integrere en vekslerflade med et lavt tryktab (som er udviklet i delprojekt II til nærværende projekt), som er koblet til en tilsvarende veksler i udløbet og dermed muliggør naturlig eller hybrid ventilation med varmegenvinding.

Der er desuden opstillet en lang række andre krav til komponentens støjreduktion, rengøringsmuligheder, slidstyrke og holdbarhed, frostsikringsmuligheder, tyverisikringsmuligheder, brandbegrænsning, geometriske udformning, styring og regulering, økonomi, æstetiske udtryk samt varmetab (i lukket tilstand).

6 Konklusion

Nærværende forprojekt har generelt vist, at mulighederne for udvikling og anvendelse af nye lavtsiddende indløbskomponenter til naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet ser gode ud.

Undersøgelser af hidtidige erfaringer bl.a. fra naturlig ventilation via højsiddende åbninger samt forskellige eksisterende komponenter og systemer har vist, at det vil være muligt at opnå den ønskede luftfordeling med kølig frisk luft langt ind i opholdszonen og varm forurennet luft oppe under loftet. Erfaringer peger desuden på, at det vil være muligt at opstille modeller og beregningsmetoder til forudsigelse af åbningskoefficienter, luftfordelinger, lufthastigheder og temperaturer nede i opholdszonen mv. som funktion af åbningsgrad samt tryk- og temperaturforhold – dvs. som funktion af driftssituation og anvendelsesområde. Erfaringerne viser dog samtidig, at opstillingen af disse modeller og beregningsmetoder vil kræve grundige laboratorieundersøgelser (eventuelt suppleret med anvendelse af avancerede beregningsværktøjer som fx CFD), idet indløbsforholdene ved naturlig ventilation er langt mere varierende og komplicerede end tilsvarende strømningsforhold i forbindelse med indblæsningsarmaturer til mekanisk ventilation. Som eksempel kan nævnes, at for små vinduesåbninger og små trykforskelle kan åbningskoefficienten variere med op til 40 % som funktion af Reynolds tal eller Archimedes tal, mens den tilsvarende koefficient for et indblæsningsarmatur til mekanisk ventilation er mere eller mindre konstant. Det skyldes bl.a., at strømningsforholdene ved naturlig ventilation i langt højere grad er præget af konvektive strømninger inde i rummet. Dette gælder også indløbsforholdene.

De udførte undersøgelser i projektet har bl.a. vist, at ved anvendelse af den nye indløbskomponent i fx kontorer, mødelokaler og institutioner, skal komponenten kunne levere en luftmængde på ca. 5-20 l/s pr. m. facade. Afhængig af om indløbskomponenten skal anvendes til rene naturlige eller evt. hybride ventilations-systemer (med en lille hjælpeventilator i udløbet), må tryktabet over indløbskomponenten maksimalt være hhv. 3-8 eller 10-15 Pa. Begge dele anses i øvrigt for at være mulige at opnå.

Man skulle umiddelbart tro, at jo flere funktioner komponenten skal indeholde (filtrering, forvarmning og lydreduktion), desto større bliver tryktabet over komponenten. Forprojektet har imidlertid vist, at flere af funktionerne formentlig kan opfyldes af en og samme delkomponent. Det er bl.a. fundet, at regulering af tryktab/luftmængde, fjernelse af vindturbulens og etablering af en ensartet lavturbulent strømning over indløbskomponenten formentlig kan opnås ved anvendelse af en enkelt delkomponent bestående af et tekstilmateriale (som fx kendes fra poseindblæsning). Samtidig kan tekstilmaterialet udnyttes som absorber i en luftsolfanger, således at solindfaldet gennem den ydre transparente del af indløbskomponenten kan udnyttes til forvarmning af indtagsluften. Nogle af de mest effektive luftsolfangere har netop et tekstilmateriale eller en filterdug som absorber, idet denne er med til at skabe en ensartet luftfordeling og optimal varmeovergang mellem absorber og luftstrøm. Indløbskomponenten vil hermed medføre en reduktion i ventilationstab (specielt på solrige dage).

Det er desuden fundet, at der er basis for integrering af en varmeveksler i indløbskomponenten, som kan benyttes til såvel varmegenvinding (ved væskekobling med tilsvarende veksler i udløbet), forvarmning af indtagsluften (ved kobling til bygningens varmesystem) som evt. køling af indløbsluften. Delprojekt II til nærværende projekt har fx vist, at det er muligt at udvikle væskekoblede luft-til-væske varmevekslere med lavt tryktab på luftsiden naturlig ventilation med varmegenvinding gøres mulig. Foreløbige resultater fra delprojekt II har fx vist, at trykfaldet over veksleren ved en volumenstrøm på 500 m³/h kun er ca. 1,2 Pa, svarende til et samlet tryktab over genvindingssystemet på 2,4 Pa. Samtidig er genvindingsgraden for systemet større end 40 %.

Der tegner sig således et billede af, at en ny lavtsiddende, facadeintegreret indløbskomponent til naturlig eller hybrid ventilation kan udformes, så den indeholder flere forskellige funktioner (som fx forvarmning og filtrering af indtagsluften, lydreduktion mv.) og dermed være anvendelig til langt flere anvendelsesområder og i langt flere driftssituationer (fx om vinteren) end almindelige vinduesåbninger, og vil således medvirke til øget anvendelse af naturlig og hybrid ventilation med væsentlige besparelser af elforbrug til ventilation til følge.

7 Referencer

- /1/ : *Hybrid Ventilation and the Consequences on the Development of the Facade.*
Heiselberg P.
Aalborg University, Denmark. 2000.
- /2/ : *Windows, Measurements of Air Flow Capacity.*
Heiselberg P, Svidt K, Nielsen PV.
Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, DK-9000 Aalborg. 2000.
- /3/ : *Characterization of the Airflow from a Bottom Hung Window under Natural Ventilation.*
Svidt K, Heiselberg P, Nielsen PV.
Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, DK-9000 Aalborg. 2000.
- /4/ : *Characteristics of Airflow from open windows.*
Heiselberg P, Svidt K, Nielsen PV.
Elsevier Science Ltd, 2001.
- /5/ : *Improvement of Thermal Comfort in a Naturally Ventilated Office.*
Bjørn E, Jensen J, Larsen J, Nielsen PV, Heiselberg P.
Proceedings of 21st AIVC Conference, Steigenberger Kurhaus Hotel, Den Haag, the Netherlands, 26-29th Sept. 2000.
- /6/ : *Håndbog i industriventilation.*
Sørensen HH
Teknisk Forlag A/S, 1998. ISBN 87-571-2171-0.
- /7/ : *Tekstilkanaler – lavimpuls eller fortrængningsventilation?*
Jespersen C.
Artikel. VVS nr. 8, 2001.
- /8/ : *Displacement ventilation – theory and design.*
Nielsen P. Department of Building
Technology and Structural Engineering, Aalborg University, DK-9000 Aalborg. August, 1993.
ISSN 0902-8002 U9306.
- /9/ : *The fluid mechanics of natural ventilation – displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind.*
Hunt GR, Linden PF.
Building and Environment 34 (1999).
- /10/ : Diverse produktmateriale om vinduer/facadeelementer fra VELFAC. www.velfac.dk

- /11/ : Diverse produktmateriale om tekstilkanaler fra KE-Fibertec.
- /12/ : Diverse produktmateriale om kombineret friskluftventil/radiator fra Ribe Jernindustri (Rio Comfort). www.rio.dk
- /13/ : Diverse produktmateriale om kombineret friskluftindtag/radiator fra MINERGI AB i Sverige.
- /14/ : Produktinformation om pulserende varmeventilator monteret direkte i ydervæg fra TAB Systems AB i Sverige.
- /15/ : *Hälsosam inomhusmiljö med enkla ventilationssystem.*
Harrysson C.
VVS-FORUM nr. 11, november 1996.
- /16/ : *Främtidig för enkla ventilationssystem.*
Harrysson C.
VVS-FORUM nr. 9, september 1999.
- /17/ : *Natural ventilation in non-domestic buildings. Applications Manual AM10: 1997.*
Irving S, Uys E m.fl.
CIBSE (The Chartered Institution of Building Services Engineers). Marts 1997.
ISBN 0900953772.
- /18/ : *Danvak, Varme- og klimateknik, Grundbog.*
Hansen HE, Kjerulf-Jensen P, Stampe OB.
Danvak Aps, 2. udgave, 1998. ISBN 87-982652-8-8
- /19/ : *Connectable solar air collectors*
Jensen SØ, Bosanac M.
Solar Energy Centre Denmark, Danish Technological Institute. February 2002.
1st printing, 1st edition. ISBN: 87-7756-656-4.
- /20/ : *Komponenter til naturlig ventilation – Del II – Luft-til-væske varmeveksler*
Overgaard LL, Nørgaard E, Madsen KB, Jensen SØ, Jacobsen TD
BuildVision, Teknologisk Institut Energi. Juni 2002.
ISBN: 87-7756-662-9.

Bilag

Bilag 1:	Naturlig ventilation via højsiddende indløbsåbninger	30
Bilag 2:	Fortrængningsventilation (primært mekanisk)	36
Bilag 3:	Ventilationsbehov	42
Bilag 4:	Drivtryk	43
Bilag 5:	Åbningsarealer	45
Bilag 6:	Anvendte beregningsudtryk i bilag 3 – 5	46
Bilag 7:	Frisklufttilførsel via tekstilkanaler på Margeretaskolen	49

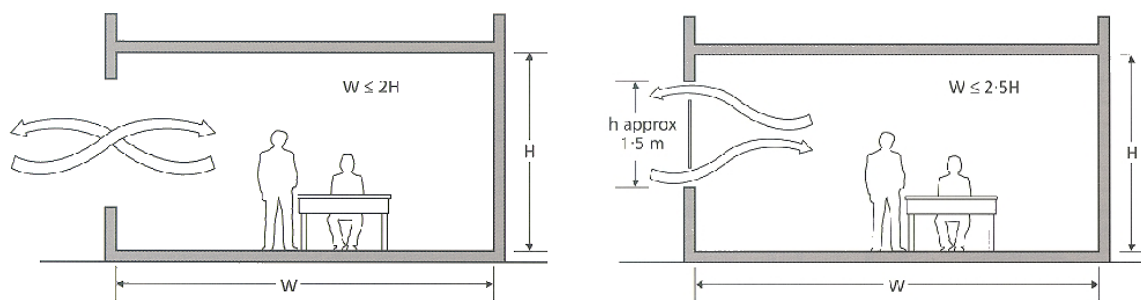
Bilag 1: Naturlig ventilation via højsiddende åbninger

I det følgende er vigtige elementer fra den gennemgåede litteratur om naturlig ventilation via højsiddende åbninger opsummeret og kommenteret i relation til udviklingen af en ny lavtsiddende indløbskomponent.

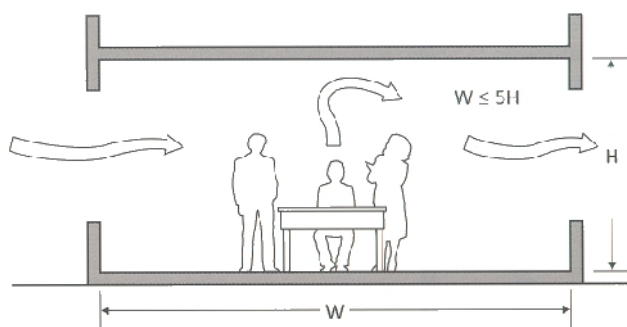
I forbindelse med naturlig eller hybrid ventilation er facaden ofte en vigtig ventilationskomponent. Facaden skal således betragtes som både bygge- og ventilationskomponent. Det stiller øgede krav til facaden, fx i form af krav om:

- Mulighed forvarmning af luft
- Mulighed for filtrering af luft
- Lavt tryktab
- Tilførsel af frisk luft direkte til brugere (opholdszonen)
- Effektiv fjernelse af forureninger

Der skelnes generelt mellem hhv. ensidig ventilation og tværventilation, se Figur 2 og Figur 3.



Figur 2: Illustration af ensidig ventilation vha. hhv. en og to åbninger. Kilde: AM10:1997 /17/.



Figur 3: Illustration af tværventilation. Kilde: AM10:1997 /17/

Ensidig ventilation

Ved ensidig ventilation er der kun åbninger i en side af rummet. Det kan fx være cellekontorer med et smalt vinduesbånd i facadevæggen og lukkede døre i den modsatte væg. Om sommeren vil den primære drivkraft i dette tilfælde være vindskabt turbulens, mens det om vinteren ofte vil være termiske drivkræfter. Hvis der er åbninger i to forskellige højder i facaden (eller vinduerne er høje) vil der desuden ligeledes ofte optræde termiske drivkræfter. De termiske drivkræfter øges ved øget vertikal afstand mellem åbningerne samt med øget temperaturforskel mellem ude og inde.

Drivtryk, ventilationsmængde og indløbshastighed er generelt lavest ved ensidig ventilation. Forsøg har, jf. /1/, vist, at hvis indløbstemperaturen er lavere end rumtemperaturen, vil den friske luft (uanset åbningens højde over gulvet) søge ned til gulvet og skabe en lagdelt strømning som ved fortrængningsventilation.

Tværv ventilation

Tværv ventilation optræder, når der er åbninger på begge sider af et rum, således at luften kommer ind gennem åbningerne i den ene side af lokalet, strømmer tværs gennem lokalet og ud gennem åbningerne i den anden side af rummet. Tværv ventilation er ofte drevet af vindkræfter. Den kan også være drevet af termiske kræfter (eller en kombination heraf), hvis indløbsåbningen er placeret lavt og udløbsåbningen højt, eller hvis udløbsåbningen fører ud til en skakt eller et atrium med højere placerede udløb.

Ved tværv ventilation er drivtryk, ventilationsmængde og dermed indløbshastighed meget højere end ved ensidig ventilation, hvilket bevirker, at der kan dannes en indblæsningsstråle som ved opblandingsventilation.

Ved anvendelse af en lavtsiddende indløbskomponent, som ikke blot er et vindue (skarpkantet åbning), men som indeholder flere andre elementer som fx grovfilter samt evt. forvarmingsenhed og måske en trykregulerende tekstilenhed til udjævning af vindens turbulenseffekter, vil tværv ventilation formentlig være den eneste mulighed for at skabe tilstrækkeligt drivtryk til at overvinde tryktabet over indløbskomponenten. Næste skridt bliver at udtænke en udformning, hvor en bestemt ventilationsmængde kan opnås ved varierende drivtryk, dvs. et slags variabelt tryktab.

Analyser af måleresultater har jf. /1/ vist, at det er muligt at udvikle et sæt af ligninger, der beskriver luft hastigheden i opholdszonen som funktion af vinduets åbningsareal, tryk- og temperaturforskel. Det er således muligt at forudsige vinduets indvirkning på komfortniveauet i opholdszonen. De opnåede resultater viser desuden, at vinduer ikke giver samme termiske komfortniveau som mekaniske indblæsningsarmaturer.

Ved udformning af indløbskomponenter til naturlig ventilation er udfordringen derfor, at kunne tilføre så meget frisk luft som muligt ved så lav temperatur som muligt, uden at det går ud over komfortniveauet i opholdszonen, således unødvendig energiforbrug til forvarmning af den friske luft kan undgås.

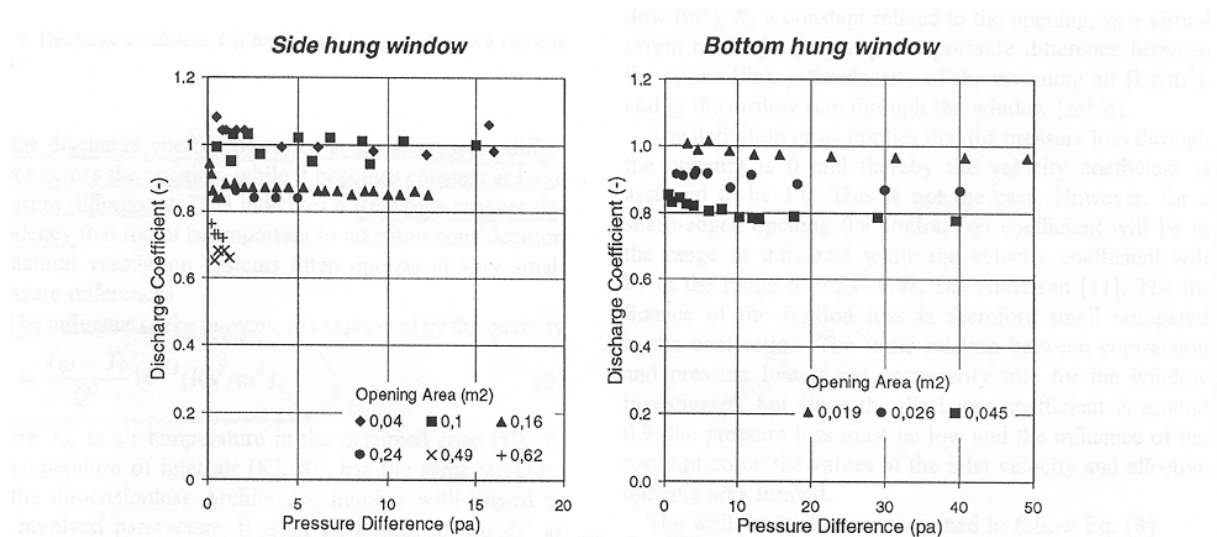
Åbningskoefficienter

Undersøgelser på Aalborg Universitet af strømningsforholdene i forbindelse med vinduesåbninger har jf. /2/ vist, at åbningskoefficienten for vinduer (C_d) ikke er konstant. Den afhænger betydeligt af vinduesåbningsareal, vinduestypen samt temperaturforskellen mellem inde og ude.

Endvidere har indløbsforhold som fx åbningens vinkel i forhold til vindretningen, insektnet, udhæng mv. indflydelse på åbningskoefficienten pga. momentum-effekter på en bygnings luvside.

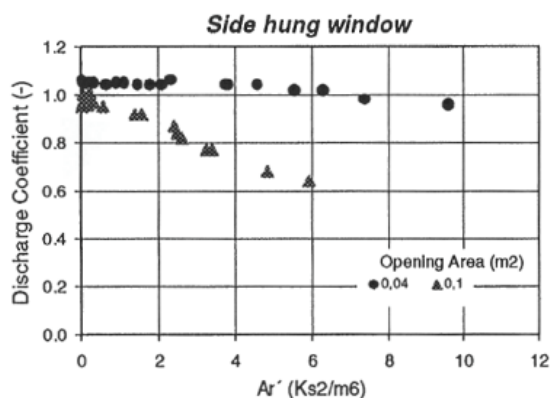
I strømningsretningen kan flader tæt på åbningen og parallelt med strømningen (gulve/vægge/bordplader mv.) desuden have tilsvarende stor indflydelse på strømningsforløbet.

Oftest bruges en åbningskoefficient for vinduer på $C_d = 0,6$ svarende til åbningskoefficienten for en skarpkantet åbning. Forsøgsresultater har imidlertid vist, at kun ved store trykforskel over åbningen ($> ca. 10 \text{ Pa}$) er åbningskoefficienten for en bestemt vinduestype med bestemt åbningsareal konstant. Afhængig af vinduestype og åbningsareal varierer den fx for de to undersøgte vinduestyper i /2/ mellem $C_d = 0,78 - 1,0$. Det har vist sig, at åbningskoefficienten er enten Reynolds-afhængig (ved isotermske forhold) eller Archimedes-afhængig (ved ikke-isotermske forhold). Se Figur 4:



Figur 4: Åbningskoefficient C_d som funktion af trykforskel over åbningen for hhv. sidehængte og bundhængte vinduer med forskellige arealer. Kilde: /4.s5/.

Under ikke-termiske forhold kan der argumenteres for at anvende et dimensionsafhængigt Archimedes tal Ar' ved illustration af strømningens afhængighed af de konvektive forhold, fordi forskellige former for konvektive strømninger herved kan sammenlignes uden at skulle inddrage længdeskalaerne i betragtningen /4.s6/. Afbildning af åbningskoefficienten som funktion af Ar' viser, at åbningskoefficienten falder betydeligt ved store temperaturforskelle (stor Ar'), dog især ved store vinduesåbninger. Se Figur 5:



Figur 5: Åbningskoefficient (C_d) som funktion af Ar' for et sidehængt vindue. Kilde: /4.s6/.

Det anvendte dimensionsløse Archimedes tal, Ar' er givet ved:

$$Ar' = \frac{T_{oc} - T_0}{q_{v0}^2} \cdot 10^{-3} \text{ (K} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^6 \text{)}$$

T_{oc} : luftens temperatur i opholdszonen [K]

T_0 : indblæsningsluftens temperatur [K]

q_{v0} : luftmængden ind gennem åbningen [m^3/s]

Alle ovenstående forhold vedrørende åbningskoefficienter er særdeles relevante at have for øje ved udviklingen af den nye indløbskoefficient, der netop tænkes afsluttet udvendigt med et vindueselement med mulighed for forskellige åbningsgrader. Såfremt indløbskomponenten udformes med delkomponenter som

filter, varmeplade mv. vil åbningskoefficienten for vinduet umiddelbart være uden den stor betydning, idet tryktabet i stedet primært vil ligge over varmeplade eller filter. Det er imidlertid højst sandsynligt, at luftmængden gennem åbningen skal reguleres ved regulering af vinduets åbningsareal/åbningsgrad, hvorved åbningskoefficienten også i dette tilfælde må bestemmes som en funktion af indløbskomponentens åbningsgrad.

Indblæsningens retning

Undersøgelser af strømningsforholdene i forbindelse med tværventilation via et bundhængt vindue placeret oppe ved loftet viser jf. /3/, at der under ikke-isotermiske forhold genereres en indblæsningsstråle oppe under loftet med karakteristika som en ikke-isotermisk vægstråle. Dog afhænger indtrængningslængden af vinduesåbningens størrelse (spaltens højde), selvom denne indgår i udtrykket for indtrængningslængden. Som en mulig forklaring nævnes det, at ikke kun åbningsarealet ændres med vinduets åbningsgrad - også indblæsningsstrålens vinkel ændres.

Det tyder således på, at en indblæsningsstråles retning i et naturligt ventileret rum (ligesom ved mekanisk ventilation) kan påvirkes ved udformningen af indløbskomponenten. Sidstnævnte faktum kan være særdeles relevant i forbindelse med styring af indblæsningsstrålen ved fortrængningsventilation via lavtsiddende indløbskomponenter til naturlig/hybrid ventilation.

Luftfordeling og lufthastigheder i naturligt ventilerede rum

Ved naturlig ventilation vil luftstrømningen ind gennem et vindue ofte være det dominerende strømningsselement i rummet (sammen med evt. kraftige konvektive strømme).

Walker og Kiel har vist /3/, at luftfordelingen i et rum ventileret (ensidigt) vha. store åbninger er god. Tidligere undersøgelser af Dascalaki har desuden jf. /4.s1/ vist, at målte indløbshastigheder gennem store vinduesåbninger (ved ensidig ventilation) dels varierer meget, og dels er større end de teoretiske indløbshastigheder beregnet vha. en multizone model. Det skal her bemærkes, at det ikke er sikkert men derimod sandsynligt, at det samme gør sig gældende i forbindelse med tværventilation (som er mere sandsynlig i forbindelse med den påtænkte indløbskomponent).

Andre undersøgelser (af Eftekhari og Zeidler & Fitzner) har jf. reference /4.s2/ vist, at under ikke-isotermiske forhold strømmer den kolde indblæsningsluft ned til og henover gulvet som ved lagdelt strømning (dvs. som ved fortrængningsprincippet). Eftekhari har (ved ensidig ventilation) fx påvist lave temperaturer og høje lufthastigheder (op til 0,4 m/s) nede ved gulvet, og modsatte forhold i hovedhøjde, hvilket selvfølgelig ikke er optimalt. Zeidler & Fitzner har desuden vist, at strømningsforholdene i disse situationer kan beregnes jf. beregningsmetoderne ved mekanisk fortrængningsventilation.

Sammenligning af billeder fra røgforsøg i rum ventileret ved hhv. ensidig ventilation og tværventilation (med samme vinduestype, åbningsgrad og temperaturforskel) viser imidlertid jf. /4.s4/, at der opnås vidt forskellige indtrængningslængder. Der bør således udvises stor forsigtighed mht. overføring af erfaringer fra ensidigt ventilerede rum til tværventilerede rum.

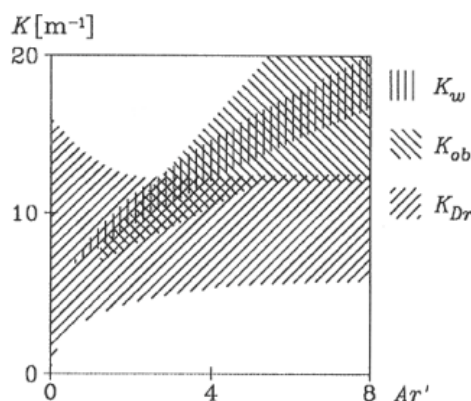
Forsøg med et sidehængt vindue (i middelhøjde) under ikke-isotermiske tværventilationsforhold resulterer i en 3D fristråle, der rammer gulvet i en afstand fra vinduet på 0,5-1,5 m /4.s7/. Luftstrømningen langs gulvet er radial som en strømningen fra lavhastigheds-diffusor til fortrængningsventilation eller som kuldene-faldet fra en kold væg. Målinger viser, at strømningens medrivning af omgivende luft er lille pga. temperaturgradienten i rummet, samt at tykkelsen af strømningen δ er konstant ved høje Archimedes tal (dvs. stor temperaturforskel mellem ude og inde). I denne sammenhæng bør det anføres, at maksimalhastigheden (u_x) i afstanden (x) fra en lavhastigheds-diffusor til fortrængningsventilation er givet ved /4.s8/:

$$u_x = q_{v0} \cdot K_{Dr} \frac{1}{x + x_0} \text{ (m / s)}$$

- q_{v0} : luftmængden fra armaturet [m^3/s]
- K_{Dr} : variabel, der afhænger af armaturtype og Archimedes tal [m^{-1}] - stort Ar medfører mindre tykkelse δ og dermed større lufthastighed). For typiske armaturer til mekanisk fortrængningsventilation er K_{Dr} 4-10 m^{-1} .
- x_0 : afstand fra forside af armatur til strømningens udgangspunkt [m] - strømningens udgangspunkt vil ofte være placeret en anelse bagved armaturet, hvorved x_0 bliver en positiv størrelse.

Forsøg har vist, at strømningen nede ved gulvet fra et sidehængt vindue (i middelhøjde) kan beskrives ved ovenstående ligning, hvis K_{Dr} erstattes af en K -værdi for vinduer (K_w), hvor K_w er en konstant, der afhænger af vinduets geometri og placering i væggen, af åbningsarealet A_0 samt af luftmængden (trykforskellen) og temperaturforskellen. Forsøgene har desuden vist, at strømningen nede ved gulvet er semiradial, samt at x_0 altid er negativ, fordi strømningen altid rammer gulvet i en vis afstand foran vinduet. Afstanden afhænger af luftmængden (trykforskellen) samt temperaturforskellen.

I de aktuelle situationer er der målt K_w -værdier på omkring 10-20, dvs. af samme størrelsesorden som for andre typer af lagdelte strømninger. Det svarer desuden nogenlunde til K -værdierne for de første generationer af lavhastighedsdiffusorer til mekanisk fortrængningsventilation, hvor strømningen var rettet direkte mod opholdszonen. Ved grafisk sammenligning af de målte K -værdier for det sidehængte vindue (K_w) med K -værdier for forskellige typer af radiale og semiradiale strømninger fremgår det, at strømningen fra et åbent vindue minder om strømningen i et fortrængningsventileret lokale med forhindringer. Se Figur 6:



Figur 6: K -værdier for forskellige typer af radiale strømninger. K_{Dr} : strømning fra væghængt diffusor. K_{ob} : strømning i et fortrængningsventileret rum med forhindringer. K_w : strømning fra et åbent vindue. Kilde: /4.s9/.

Ovenstående erfaringer viser, at det er væsentligt at have for øje, at der er stor forskel på luftfordelingen og lufthastighederne i hhv. ensidigt og tværventilerede rum. Desuden viser de, at det er muligt at opbygge modeller/beregningsmetoder til forudsigelse af åbningskoefficienter, luftfordelinger, lufthastigheder og dermed de vigtige komfortparametre i opholdszonen ved naturlig ventilation med lagdelt strømning (fortrængningsprincippet). Der kan fx indføres et dimensionsløst Archimedes tal Ar' .

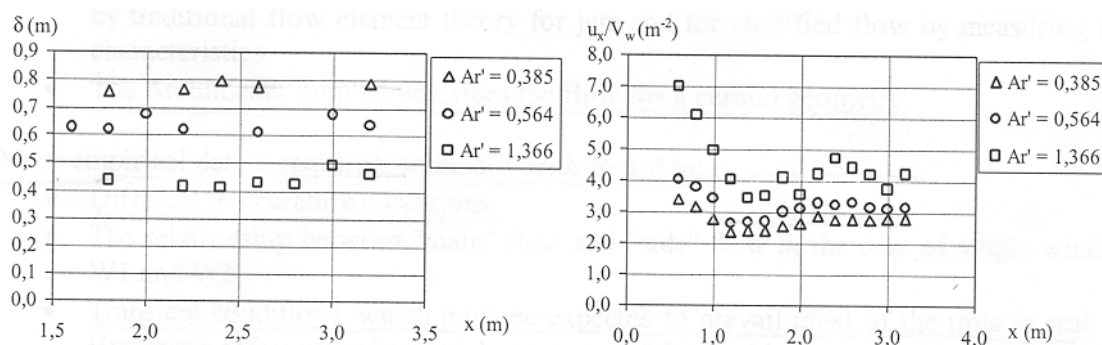
Lagdelt strømning vha. højsiddende åbninger

Som tidligere nævnt, er tværventilation den oftest forekommende situation i praksis i kontorlokaler (fx et kontor, der vender ud mod et atrium med store åbninger foroven).

Forsøg med højsiddende åbninger i et tværventileret rum har i tilfælde af meget lave tryktab over åbningen på 0,1 – 0,2 Pa (situation 1) vist, at der kan opstå en lagdelt strømning ved gulvet som følge af, at indblæsningsluften er lavturbulent og kryber ned langs væggen og ned på gulvet /5.s4-5/.

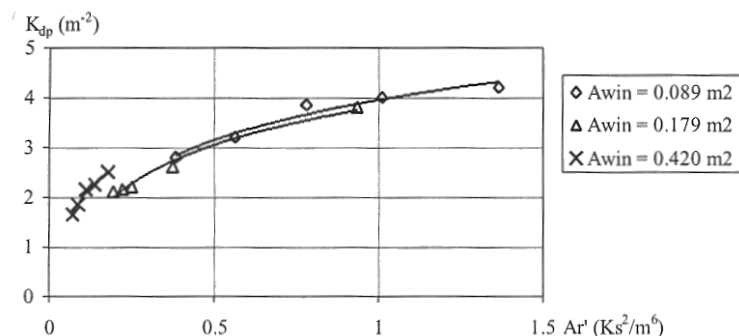
Ved lidt større trykforskel over åbningen, kan der dannes mere turbulens og en recirkulerende strømning under vinduet (situation 2), der medfører at luften rammer gulvet i en vis afstand fra væggen, hvorefter den danner en radial (eller semiradial) strømning svarende til en lagdelt strømning mellem forhindringer i et fortrængningsventileret lokale. (En indikator af, at der optræder lagdelt strømning er, at tykkelsen af strømmingen langs gulvet (δ) er konstant).

Dette er ikke en generel konklusion, men skabt af laboratorieopstillingen og forsøgsbetingelserne, og gælder derfor kun i denne situation. Andre resultater fra forsøg med vinduesåbninger i hele facadens bredde har vist, at der for dimensionsløse Archimedes tal på $Ar' = 0,38-1,37 \text{ K}\cdot\text{s}^2/\text{m}^6$ opstår en plan lagdelt strømning med en (næsten) konstant tykkelse på ca. 0,4-0,8 m hen gennem rummet /5.s10/. Tykkelsen afhænger stort set kun af Ar' , idet større Ar' medfører mindre lagtykkelse (og større maksimalhastighed). For hvert Ar' er maksimalhastigheden (u_x/q_w) endvidere stort set konstant (ca. 2,5-4,2 m^2). Se Figur 7:



Figur 7: Måleresultater ved vinduer i hele facadens bredde. Tykkelse af strømning langs gulvet (δ) og den relative hastighed i afstanden x vist for tre forskellige Ar' ved et åbningsareal på $A_{\text{vindue}} = 0,089 \text{ m}^2$. Kilde: /5. s12/.

Ved afbildning af K_{Dp} som funktion af Ar' fremgår det (se Figur 8), at K_{Dp} øges med Ar' pga. øget lodret acceleration af luften ned langs væggen. Bemærk, at dette ikke ville være tilfældet, hvis åbningen var placeret nede ved gulvet.



Figur 8: K_{Dp} -værdier som funktion af Ar' for åbningsarealer på hhv. $0,089 \text{ m}^2$, $0,179 \text{ m}^2$ og $0,420 \text{ m}^2$. (Vinduer i hele facadens bredde). Kilde: /5.s13/.

Selvom der i visse situationer dannes en lagdelt strømning nede ved gulvet i forbindelse med tværventilation via højsiddende åbninger under ikke-isoterme forhold, kan forsøgserfaringerne fra disse situationer ikke direkte overføres til situationer med lagdelt strømning via lavtsiddende indløbskomponenter, idet accelerationen af den kolde indblæsningsluft ned langs ydervæggen jf. ovenstående erfaringer har betydning for K -værdien for vinduet. Ovenstående erfaringer er alligevel relevante, specielt hvad angår forsøgene med vinduer i hele facadens bredde. Det kan fx komme på tale at placere de nye lavtsiddende indløbskomponenter langs hele facadens i forbindelse med naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet.

Bilag 2: Fortrængningsventilation (primært mekanisk)

I forbindelse med mekanisk fortrængningsventilation indblæses luften traditionelt vha. gulvarmaturer eller tekstilkanaler. Gulvarmaturer til passiv termisk fortrængning (mekanisk) kan opdeles i to hovedtyper, nemlig hhv. /6.s82/:

- Armaturer uden induktion (dvs. uden opblanding med rumluft i/lige uden for armatur)
- Armaturer med induktion (dvs. med opblanding med rumluft i/lige uden for armatur)

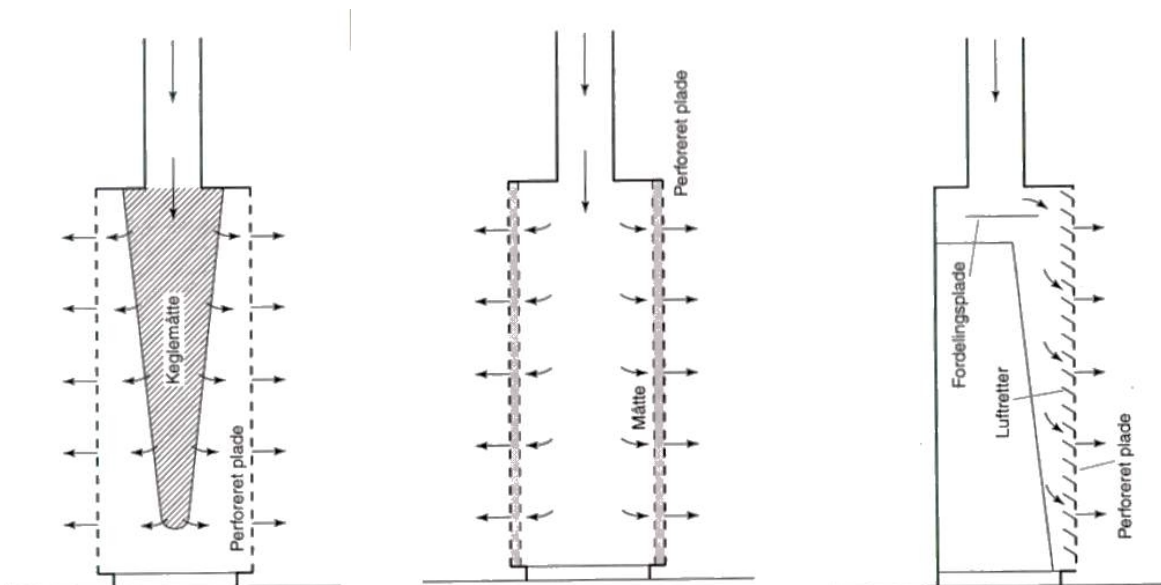
De to typer armaturer påvirker såvel temperaturgradient som nærzone meget forskelligt /6.s82/.

Armaturer uden induktion

Ved valg af armaturer uden induktion bør indblæsningstemperaturen være relativt høj (18-20 °C), idet der foran armaturet stort set ikke sker nogen opblanding af indblæsningsluften med rumluften. Fordelen ved armaturer uden induktion (set i sammenhæng med naturlig ventilation) er, at tryktabet over armaturet er relativt beskedent.

Armaturer uden induktion (til konstant volumenstrøm) opbygges ofte på en af følgende tre måder /6.s86/:

- Med en keglemåtte, der fordeler luften, så der opnås en ensartet fordeling af luften gennem armaturets frontplade, der er forsynet med en til formålet egnet perforeringsgrad, se Figur 9 t.v.
- Med en fordelermåtte lige bagved frontpladen, der kan være med perforering eller blot være erstattet med et net, se Figur 9 m.f.
- Med en fordelingsplade umiddelbart efter indløbet samt en kegle, der fordeler luften, hvorefter luften via en luftretter siver ud gennem den perforerede frontplade, se Figur 9 t.h.



Figur 9: T.v.: Armatur med kegle. M.f.: Armatur med måtte. T.h.: Armatur med luftretter. Kilde: /6.s87/.

Det skal bemærkes, at nærzonen generelt er større for armaturer uden induktion end for armaturer med induktion /6.s85/.

Princippet med at anvende en eller anden form for måtte eller fordelingsplade til at etablere en tilfredsstillende luftfordeling kan sandsynligvis også med fordel anvendes til den nye lavtsiddende indløbskomponent.

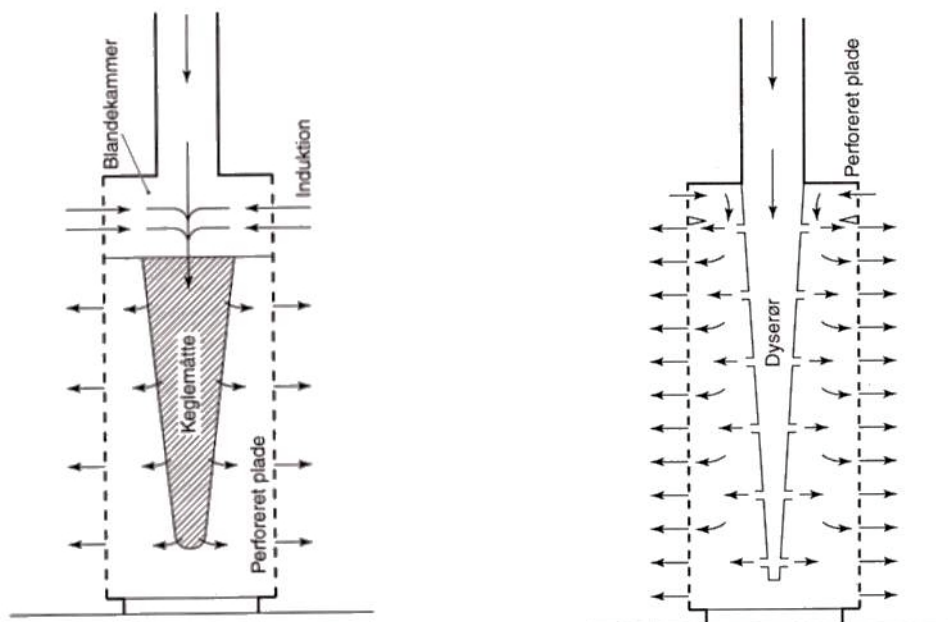
Armaturer med induktion

Armaturer med induktion er karakteriseret ved, at indblæsningsluften i en eller anden grad opblandes med rumluften umiddelbart udenfor armaturet, hvorved luftens temperatur stiger. Der kan således tillades en lavere indblæsningstemperatur og hermed en større temperaturforskel ved armaturer med induktion sammenlignet med armaturer uden induktion /6.s84/.

Endvidere gælder det, at der ved en given belastning kræves en mindre indblæst volumenstrøm jo større temperaturforskel, der kan etableres ved at sænke indblæsningstemperaturen.

Armaturer med induktion opbygges ofte på en af følgende to måder /6.s86/:

- Med et blandekammer, hvor indblæsningsluften ved hjælp af en ejektordyse bliver opblandet med rumluft fra opholdszonen i lokalet se Figur 10.
- Med et fordelerrør med dyser inde i armaturet, der ligeledes sørger for opblanding af indblæsningsluften med rumluft fra opholdszonen i lokalet. Rumluften tilføres foroven i armaturet, se Figur 10.



Figur 10: T.v.: Armatur med blandekammer og ejektor. T.h.: Armatur med blandekammer og dyser. Kilde: /6.s87-88/.

Tekstilkanaler

Tekstilkanaler kan anvendes til ventilation efter såvel lavimpuls- som fortrængningsprincippet. Forskellen består i, at ved lavimpulsprincippet placeres tekstilkanalen over varmekilden, mens ved fortrængningsprincippet placeres tekstilkanalen under varmekilderne (i opholdszonen) /7.s14/. Ved lavimpulsprincippet sker der en opblanding af luften og som hovedregel bliver temperaturgradienten i lokalet lille - modsat ved fortrængningsventilation, hvor temperaturgradienten kan komme op på 2 K/m. Ved disse former for passive sy-

stemer vil luft hastigheden accelereres, hvis temperaturforskellen ΔT mellem indblæsningsluften og rumluften øges. Der kan herved blive en decideret nærzone lige under/ved tekstilkanalen.

Indblæsningsluften fra tekstilkanalerne siver langsomt ud gennem tekstiloverfladen med en lav og ensartet hastighed, som normalt er under 0,1 m/s. Herefter siver den kolde indblæsningsluft nedad mod gulvet, hvor den spredes ud over gulvet /6.s93/.

Det statiske tryk i kanalen bestemmer, hvor stor indblæsningshastigheden bliver. Ved at øge tekstiloverfladen falder indblæsningshastigheden, hvorved det er muligt at indblæse med større undertemperatur (dog maks. 5 °C) /6.s93/. Det bør overvejes, om dette princip evt. kan udnyttes i forbindelse med udviklingen af den nye lavtsiddende indløbskomponent.

Indblæsning vha. tekstilkanaler anvendes ofte i slagterier og mejerier, hvor formålet er at skabe et optimalt termisk indeklima ved en temperatur på 8-12 °C /6.s93/.

Ved ventilering med tekstilkanaler opnås en stor mikrobiologisk filtrering, idet tekstilkanaler fremstillet af polyester effektivt frafiltrerer svampesporer, der passerer tekstilkanalens overflade. Herved sikres en effektiv beskyttelse af produkter, hvilket især er relevant i levnedsmiddelbranchen. Ved luftpassage gennem overfladen angiver fabrikanterne af filterposer, at der tilbageholdes helt op til 60 % af partikler under 1 µm. På grund af denne filtreringsevne anbefales det at benytte et forfilter for at undgå unødigt vedligehold /6.s94/.

OBS: Det er praktisk taget umuligt at tilføre luften så meget impuls, at man kan opnå effektiv spredning væk fra nærzonen uden at indføre aktive dyser /7.s14/.

Det er KE-Fibertec's opfattelse, at fortrængningsprincippet kun er fordelagtigt (frem for lavimpulsprincippet), når der er tale om større lokaler (rumhøjde > 4,5 m) med store konvektive varmekilder placeret i opholdszonen, såsom maskiner og lign /7.s16/. Lavimpulsprincippet er derimod bedst egnet ved spredt placerede varmekilder (blanding af lys, mennesker, maskiner etc.).

To-dimensional fortrængningsventilation

To-dimensional (mekanisk) fortrængningsventilation adskiller sig bl.a. fra traditionel tre-dimensional fortrængningsventilation ved det at, hvis Archimedes tal er tilstrækkeligt højt, er hastigheden i strømmingen uafhængig af afstanden fra armaturet (udenfor nærzonen). Hastigheden er udelukkende en funktion af luftmængde, temperaturforskel samt armaturets udformning /8.s31/:

$$\frac{u_x}{u_f} = K_{dp}$$

u_x : maksimalhastighed i strømmingen (i afstanden x fra armaturet) [m/s]

u_f : volumenstrøm i forhold til åbningens areal (indløbshastighed) [m³/s pr. m²]

K_{dp} : koefficient, der afhænger af armatur og Archimedes tal [-]

Resultater fra forsøg med et konkret armatur har resulteret i følgende sammenhæng mellem hastighed og luftmængde (som dog i princippet kun gælder for det pågældende armatur):

$$\frac{u_x}{u_f} = K_{dp} = 2,56$$

Nedenfor er vist et par taleksempler, hvor resultatet for det konkrete armatur er anvendt:

Eksempel for storrumskontor:

Med $u_f = 6-12$ l/s pr. m facade opnås en konstant hastighed på $u_x = 0,02-0,03$ m/s

Eksempel for mødelokaler:

Med $u_f = 20-60$ l/s pr. m facade opnås en konstant hastighed på $u_x = 0,05-0,15$ m/s

Eksempel for institutioner:

Med $u_f = 10-20$ l/s pr. m facade opnås en konstant hastighed på $u_x = 0,03-0,05$ m/s

For indblæsningsstråler gælder det, at der er analogi mellem hastighedsforløb og temperaturforløb. Dvs. det kan antages, at indblæsningsstrålens temperaturforløb kan beregnes af /18.s215/:

$$\frac{\Delta t_x}{\Delta t_0} = \frac{t_R - t_x}{t_R - t_0} \approx \frac{u_x}{u_0}$$

t_x : mindste temperatur i strålen i afstanden x fra armaturet [°C]

t_R : omgivende temperatur i rummet (kan sættes lig den midlede indetemperatur i rummet) [°C]

t_0 : indblæsningsstemperatur [°C]

Indblæsningsluftens temperatur i opholdszonen kan således bestemmes ud fra:

$$t_x = t_R - (t_R - t_0) \cdot \frac{u_x}{u_0}$$

Det skal her anføres, at analogien mellem hastighedsforløb og temperaturforløb kun gælder for indblæsningsstråler, dvs. for strømningselementer, hvor de termiske kræfter kun spiller en mindre rolle for strømmingen (lille Arkimedes tal) /Danvak98.s214n/. Inden anvendelse af ovenstående relationer i forbindelse med naturlig fortrængningsventilation via lavtsiddende indløbsåbninger, bør gyldigheden heraf derfor først undersøges ved forsøg.

Naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet

På Cambridge Universitet i England har der i 1999 været forsket i naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet ved kombination af vind og termisk opdrift (inkl. dynamiske effekter med uden varmekilder).

Teoretiske betragtninger er blevet sammenlignet med modelforsøg af strømningssituationer i et fortrængningsventileret rum med lavtsiddende indløbsåbninger i luvsiden og højtsiddende udløbsåbninger i den modsatte side (læsidens). Kun situationer uden varmekilder i rummet er betragtet, dvs. situationer hvor rummet til starttidspunktet er fyldt med let (varm) luft, der efterhånden fortrænges af tungere (koldere) luft.

Der har været eksperimenteret med forskellige kombinationer af termisk opdrift og vindpåvirkninger, karakteriseret ved det såkaldte Froude tal (Fr), der er givet ved, /9.s710/:

$$Fr(t) = \sqrt{\frac{\Delta}{g \cdot \Delta\rho \cdot h(t)}} = \sqrt{\frac{\Delta}{\rho \cdot g' \cdot h(t)}}$$

Δ : forskel i vindtryk mellem ind- og udløb [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$]

ρ : densitet, eksterne forhold [kg/m^3]

$\Delta\rho$: forskel i densitet mellem ude og inde [kg/m^3]

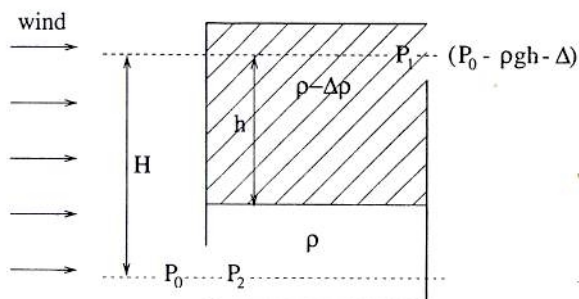
g : tyngdeacceleration [m/s^2]

g' : reduceret tyngdeacceleration, $g' = g \cdot \Delta\rho / \rho$ [m/s^2]

$h(t)$: lagdelingshøjde (til tidspunktet t) [m]

Froude tallet beskriver det relative forhold mellem den vind-inducerede og den opdrifts-inducerede hastighed /9.s710/.

Resultaterne har vist, at hastigheden, hvormed luften udskiftes i rummet, forøges med stigende vindpåvirkning og stigende densitetsforskel mellem ude og inde, samt at der for de fleste Froude tal opstår en stabil lagdeling i højden $H-h(t)$, se Figur 11. For begyndelses-Froude tal fra $Fr(0) = 0$ til omkring $Fr(0) = 2,5$ vil der dannes (og fastholdes) en lagdelt strømning i rummet. For begyndelses-Froude tal mellem 2,5-3,3 sker der i starten et omslag fra lagdelt strømning til opblanding, hvorefter den lagdelte strømning genetableres, mens for begyndelses-Froude tal større end 3,3 bliver strømningen ved med at være opblandet /9.s716-717/.



Figur 11: Illustration af model og anvendte størrelser ved forsøg med naturlig ventilation efter fortrængningsprincippet på Cambridge Universitet. Kilde: /9.s709/.

Et vigtigt resultat fra de udførte undersøgelser på Cambridge er påvisningen af den ikke-lineære sammenhæng mellem termisk opdrift og vindpåvirkninger. Det er bl.a. vist, at der er en pythagoræisk sammenhæng mellem den kombinerede opdrifts- og vind-drevne hastighed og den opnåede hastighed ved hhv. termisk opdrift og vindpåvirkning hver for sig, idet /9.s720/:

$$u \approx \sqrt{u_w^2 + u_b^2}$$

u : total fluidhastighed under påvirkning af såvel vind som termisk opdrift

u_w : vind-induceret hastighed (induceret hastighed under påvirkning af vind alene)

u_b : opdriftsinduceret hastighed (induceret hastighed under påvirkning af opdrift alene)

Den ikke-lineære sammenhæng opstår, fordi strømningshastigheden gennem en åbning er en ikke-lineær funktion af tryktabet over åbningen /9.s708/. Som eksempel nævnes det, at den opdrifts-inducerede hastighed ved en temperaturforskel mellem inde og ude på 10 K i en 5 m høj bygning er $U_b \approx 1,3 \text{ m/s}$ /9.s708/. Typiske vindhastigheder er til sammenligning ca. 4 m/s.

Ved konstant vindhastighed og densitetsforskel vil Froude tallet stige efterhånden som den lette (varme) luft i rummet fortrænges. Vinddrivkraften vil blive mere og mere dominerende efterhånden som tykkelsen (h) af den lette luft reduceres. Vinden vil være dominerende, når /9.s711/:

$$h < \frac{\Delta}{\rho \cdot g'}$$

En anden interessant påvisning i undersøgelserne er, at for en given geometri og givne startværdier for densitetsforskel og vindpåvirkning er tømmetiden bestemt af det effektive åbningsareal A^* . Det effektive åbningsareal A^* afhænger primært af den mindste af ventilationsåbningerne, dvs. at ventilationen i et rum er bestemt af ventilationsmængden (volumenstrømmen) gennem den mindste af hhv. ind- og udløbsåbningerne /9.s719/. Dette har bl.a. betydning i forbindelse med naturlig ventilation med brugerindflydelse. En bruger kan således (i teorien) åbne en lokal ventilationsåbning, uden at det går ud over den overordnede ventilationsstrategi for det pågældende rum, hvis bare den mindste (kontrollerende) ventilationsåbning ikke berøres.

Det skal bemærkes, at de undersøgte forhold på Cambridge Universitet svarer fx til forholdene i forbindelse med natkøling af en bygning vha. naturlig ventilation. Det kunne være særdeles interessant at udbygge forsøgene med forsøg, hvor mere eller mindre konstante varmekilder i rummet inddrages i modellen.

Bilag 3: Ventilationsbehov

Parametre med betydning for ventilationsbehov

Rumdybde (m)	5	9	12
Ant. m2 pr person	10	15	20
Kvalitetsniveau (l/s)	7	10	14

Luftmængde behov pr m facade

Rumdybde	m2/pers	Luftmgd/pers (l/s)	Luftmængde/m facade (l/s)	Luftskifte (/h) (Rumhøjde 2,5 m)
5	10	7	3,5	1,0
5	10	10	5,0	1,4
5	10	14	7,0	2,0
5	15	7	2,3	0,7
5	15	10	3,3	1,0
5	15	14	4,7	1,3
5	20	7	1,8	0,5
5	20	10	2,5	0,7
5	20	14	3,5	1,0
9	10	7	6,3	1,0
9	10	10	9,0	1,4
9	10	14	12,6	2,0
9	15	7	4,2	0,7
9	15	10	6,0	1,0
9	15	14	8,4	1,3
9	20	7	3,2	0,5
9	20	10	4,5	0,7
9	20	14	6,3	1,0
12	10	7	8,4	1,0
12	10	10	12,0	1,4
12	10	14	16,8	2,0
12	15	7	5,6	0,7
12	15	10	8,0	1,0
12	15	14	11,2	1,3
12	20	7	4,2	0,5
12	20	10	6,0	0,7
12	20	14	8,4	1,0
Minimum			1,8	0,5
10% fraktil			2,9	0,6
25% fraktil			3,9	0,7
Middelværdi			6,5	1,1
75% fraktil			8,4	1,3
90% fraktil			11,5	2,0
Maximum			16,8	2,0

Bilag 4: Drivtryk

Parametre med betydning for drivtryk

Bygningstype	Kontor			
Bygningsplacering	Fladt land	Forstad	By-centrum	
Læforhold	Frit eksponeret	Delvis eksponeret	Beskyttet	
Facadeorientering	Nord	Øst	Syd	Vest
Bygningshøjde (m)	4	4	7	15
Højdeforskel mellem åbninger (m)	0	3	6	14

Vindfaktor

Placering	k	a	Bygningshøjde (m)	Vindfaktor
Fladt land	0,68	0,17	4	0,86
Fladt land	0,68	0,17	7	0,95
Fladt land	0,68	0,17	15	1,08
Forstad	0,35	0,25	4	0,49
Forstad	0,35	0,25	7	0,57
Forstad	0,35	0,25	15	0,69
Bycentrum	0,21	0,33	4	0,33
Bycentrum	0,21	0,33	7	0,40
Bycentrum	0,21	0,33	15	0,51

Trykkoeficient

	Vinkel/vindretning	Frit eksponeret	Delvis eksponeret	Beskyttet
Facade, syd	0	0,5	0,26	0,06
	45	0,25	0,06	-0,12
	90	-0,5	-0,35	-0,2
	135	-0,8	-0,6	-0,38
	180	-0,7	-0,5	-0,3
	225	-0,8	-0,6	-0,38
	270	-0,5	-0,35	-0,2
	315	0,25	0,06	-0,12
Tag		-0,7	-0,6	-0,45
Forskel	0	1,2	0,86	0,51
	45	0,95	0,66	0,33
	90	0,2	0,25	0,25
	135	-0,1	0	0,07
	180	0	0,1	0,15
	225	-0,1	0	0,07
	270	0,2	0,25	0,25
	315	0,95	0,66	0,33

Drivtryk Sept-Apr (pa)

Cases	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Placering	Fladt land	Fladt land	Forstad	Forstad	Forstad	Forstad	Bycentrum	Bycentrum	Forstad
Læforhold	Frit eksponeret	Delvis eksponeret	Delvis eksponeret	Delvis eksponeret	Beskyttet	Beskyttet	Beskyttet	Beskyttet	Delvis eksponeret
Facadeorientering	Syd	Syd	Syd	Syd	Syd	Syd	Syd	Vest	Vest
Bygningshøjde	4	4	7	15	4	7	15	15	7

Hele døgnet

Minimum	-13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5% fraktil	1,3	1,7	2,9	6,5	1,5	2,9	5,8	5,8	2,7
10% fraktil	2,0	2,3	3,7	7,9	1,9	3,5	6,9	7,1	3,6
15% fraktil	2,5	2,7	4,2	9,1	2,2	4,1	7,9	8,2	4,2
25% fraktil	3,1	3,3	5,1	11,0	2,6	4,8	9,6	9,8	5,0
Median	5,1	5,3	6,4	13,8	3,3	6,1	12,4	12,6	6,3
Middel	8,7	7,8	7,0	14,2	3,6	6,3	12,1	12,4	7,9
75% fraktil	10,3	9,6	8,1	16,7	4,2	7,5	14,6	14,7	8,4
95% fraktil	28,9	22,0	13,1	23,6	6,7	10,6	18,1	19,1	19,6
Maksimum	160,5	112,0	51,6	78,5	19,9	27,5	28,3	44,3	78,2

8-17

Minimum	-13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5% fraktil	1,0	1,7	2,7	5,9	1,5	2,7	5,1	5,1	5,1
10% fraktil	2,2	2,4	3,6	7,3	1,9	3,3	6,1	6,3	6,3
15% fraktil	2,6	2,9	4,2	8,4	2,2	3,9	6,9	7,5	7,5
25% fraktil	3,3	3,6	5,1	10,7	2,6	4,8	9,0	9,2	9,2
Median	6,2	6,3	6,6	13,8	3,4	6,2	11,9	12,1	12,1
Middel	10,0	9,0	7,2	14,2	3,8	6,4	11,6	12,0	12,0
75% fraktil	12,7	11,7	8,4	16,7	4,4	7,5	14,1	14,4	14,4
95% fraktil	30,5	24,4	13,9	24,2	7,3	11,2	17,6	19,0	19,0
Maksimum	160,5	112,0	51,6	78,5	19,9	27,5	27,4	44,3	44,3

Bilag 5: Åbningsarealer

Beregning af åbningsareal

Tabellerne viser nødvendig åbning af et facadebånd (m). Der er regnet med at 80% af facaden udnyttes

Tryktab i åbning svarende til et almindeligt vindue

Cd= 0,7

Drivtryk over åbning (pa)	Luftmængde gennem åbning (l/s pr m facade)								
	3	5	7	10	15	20	30	40	60
0,5	0,006	0,010	0,014	0,020	0,029	0,039	0,059	0,078	0,117
1	0,004	0,007	0,010	0,014	0,021	0,028	0,041	0,055	0,083
2	0,003	0,005	0,007	0,010	0,015	0,020	0,029	0,039	0,059
3	0,002	0,004	0,006	0,008	0,012	0,016	0,024	0,032	0,048
5	0,002	0,003	0,004	0,006	0,009	0,012	0,019	0,025	0,037
7	0,002	0,003	0,004	0,005	0,008	0,010	0,016	0,021	0,031
10	0,001	0,002	0,003	0,004	0,007	0,009	0,013	0,017	0,026
15	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007	0,011	0,014	0,021
20	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005	0,006	0,009	0,012	0,019

Tryktab i åbning svarende til 2pa ved hastighed på 1m/s

Cd= 0,36

Drivtryk over åbning (pa)	Luftmængde gennem åbning (l/s pr m facade)								
	3	5	7	10	15	20	30	40	60
0,5	0,011	0,019	0,027	0,038	0,057	0,076	0,114	0,152	0,228
1	0,008	0,013	0,019	0,027	0,040	0,054	0,081	0,108	0,161
2	0,006	0,010	0,013	0,019	0,029	0,038	0,057	0,076	0,114
3	0,005	0,008	0,011	0,016	0,023	0,031	0,047	0,062	0,093
5	0,004	0,006	0,008	0,012	0,018	0,024	0,036	0,048	0,072
7	0,003	0,005	0,007	0,010	0,015	0,020	0,030	0,041	0,061
10	0,003	0,004	0,006	0,009	0,013	0,017	0,026	0,034	0,051
15	0,002	0,003	0,005	0,007	0,010	0,014	0,021	0,028	0,042
20	0,002	0,003	0,004	0,006	0,009	0,012	0,018	0,024	0,036

Tryktab i åbning svarende til 5pa ved hastighed på 1m/s

Cd= 0,23

Drivtryk over åbning (pa)	Luftmængde gennem åbning (l/s pr m facade)								
	3	5	7	10	15	20	30	40	60
0,5	0,018	0,030	0,042	0,060	0,089	0,119	0,179	0,238	0,357
1	0,013	0,021	0,029	0,042	0,063	0,084	0,126	0,168	0,253
2	0,009	0,015	0,021	0,030	0,045	0,060	0,089	0,119	0,179
3	0,007	0,012	0,017	0,024	0,036	0,049	0,073	0,097	0,146
5	0,006	0,009	0,013	0,019	0,028	0,038	0,056	0,075	0,113
7	0,005	0,008	0,011	0,016	0,024	0,032	0,048	0,064	0,095
10	0,004	0,007	0,009	0,013	0,020	0,027	0,040	0,053	0,080
15	0,003	0,005	0,008	0,011	0,016	0,022	0,033	0,043	0,065
20	0,003	0,005	0,007	0,009	0,014	0,019	0,028	0,038	0,056

Tryktab i åbning svarende til 10pa ved hastighed på 1m/s

Cd= 0,16

Drivtryk over åbning (pa)	Luftmængde gennem åbning (l/s pr m facade)								
	3	5	7	10	15	20	30	40	60
0,5	0,026	0,043	0,060	0,086	0,128	0,171	0,257	0,342	0,513
1	0,018	0,030	0,042	0,061	0,091	0,121	0,182	0,242	0,363
2	0,013	0,021	0,030	0,043	0,064	0,086	0,128	0,171	0,257
3	0,010	0,017	0,024	0,035	0,052	0,070	0,105	0,140	0,210
5	0,008	0,014	0,019	0,027	0,041	0,054	0,081	0,108	0,162
7	0,007	0,011	0,016	0,023	0,034	0,046	0,069	0,091	0,137
10	0,006	0,010	0,013	0,019	0,029	0,038	0,057	0,077	0,115
15	0,005	0,008	0,011	0,016	0,023	0,031	0,047	0,063	0,094
20	0,004	0,007	0,009	0,014	0,020	0,027	0,041	0,054	0,081

Tryktab i åbning svarende til 15pa ved hastighed på 1m/s

Cd= 0,13

Drivtryk over åbning (pa)	Luftmængde gennem åbning (l/s pr m facade)								
	3	5	7	10	15	20	30	40	60
0,5	0,032	0,053	0,074	0,105	0,158	0,211	0,316	0,421	0,632
1	0,022	0,037	0,052	0,074	0,112	0,149	0,223	0,298	0,447
2	0,016	0,026	0,037	0,053	0,079	0,105	0,158	0,211	0,316
3	0,013	0,022	0,030	0,043	0,065	0,086	0,129	0,172	0,258
5	0,010	0,017	0,023	0,033	0,050	0,067	0,100	0,133	0,200
7	0,008	0,014	0,020	0,028	0,042	0,056	0,084	0,113	0,169
10	0,007	0,012	0,016	0,024	0,035	0,047	0,071	0,094	0,141

Bilag 6: Anvendte beregningsudtryk i bilag 3 - 5

Beregning af ventilationsbehov

$$\text{Luftmængde pr. m facade: } \frac{q_v}{L} = \frac{D \cdot q_p}{A_p}$$

q_v : luftmængde pr m facade [l/(s·m)]

L : facadelængde [m]

D : rumdybde [m]

q_p : luftbehov pr. person [l/(s·person)]

A_p : areal pr. person [m²/person]

Beregning af drivtryk

Vindhastighed

Vindhastigheden varierer med terrænforhold og med højden over terræn. Ud fra den meteorologiske middelhastighed kan middelhastigheden i en anden højde og i et andet terræn bestemmes af:

$$v_h = v_{10} \cdot k \cdot h^\alpha$$

v_h : vindhastigheden i højden h [m/s]

v_{10} : meteorologiske hastighed i 10 meters højde og i åbent land [m/s]

h : aktuelle højde over terræn [m]

α : eksponent, der afhænger af terrænet - se nedenstående tabel [-]

k : faktor, der sammenkobler de to indgående terrænformer - se nedenstående tabel [-]

Terræn	k	α
Opdyrket fladt land	0,68	0,17
Åbent landskab	0,52	0,20
By	0,35	0,25
Bycentrum	0,21	0,33

Drivtryk

Drivtryk for naturlig ventilation består af både termisk drivtryk og vindtryk. Det samlede drivtryk bestemmes af:

$$\Delta p = \Delta p_w + \Delta p_T = \frac{1}{2}(C_{p1} - C_{p2})\rho_u v_h^2 + \frac{\rho_u(T_i - T_u)}{T_i} g(H_2 - H_1)$$

Δp : samlet drivtryk [pa]

Δp_w : vindtrykket [pa]

- Δp_i : termisk drivtryk [pa]
 C_{p1}, C_{p2} : trykkoefficienter for de bygningsdele, hvor hhv. indtags- og afkaståbning er placeret i [-]
 ρ_u : udeluftens massefylde [kg/m^3]
 v_h : vindhastigheden i referencehøjden (bygningens højde) [m/s]
 T_i, T_u : hhv. den absolutte inde- og udetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 H_1, H_2 : åbningens højde over terræn [m]
 g : tyngdeaccelerationen [m/s^2]

Beregning af åbningsarealer

Den nødvendige åbningsgrad er bestemt som åbningsbredden af facadebåndet. Åbningsarealet kan der efter bestemmes som åbningsbredden multipliceret med facadelængden. Åbningsbredden er bestemt af:

$$b = \frac{A}{L} = \frac{q_v}{C_d L \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_u}}}$$

- b : åbningsens bredde [m]
 A : åbningsens areal [m^2]
 L : facadens længde [m]
 q_v : luftbehovet pr. m facade [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m facade})$]
 C_d : karakteristisk koefficient for åbningen, der tager hensyn til kontraktion og tryktab [-]
 Δp : samlet drivtryk [pa]
 ρ_u : udeluftens massefylde [kg/m^3]

Åbningskoefficient

C_d er en udstrømningskoefficient (engelsk: discharge coefficient) defineret ved:

$$C_d = C_v C_k$$

- C_k : åbningsens kontraktionskoefficient ($C_k = 0,65$) [-]
 C_v : hastighedskoefficienten [-]

I små åbninger kan friktionen karakteriseres af et modstandstal ζ , og der er følgende sammenhæng mellem hastighedskoefficient og modstandstal:

$$C_v = \frac{1}{(1 + \zeta)^{1/2}}$$

Forudsættes det, at det samlede tryktab i afkastsystemet er 5 pa ved en strømningshastighed gennem åbning, varmeplade mm. på 1 m/s kan modstandstallet og udstrømningskoefficienten beregnes til:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_c^2 (1 + \zeta) \quad \Leftrightarrow \quad (1 + \zeta) = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_c^2} = \frac{5 \text{ pa}}{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot (1,0 \text{ m} / \text{s})^2} = 8,33$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{(1 + \zeta)}} = \frac{0,65}{\sqrt{8,33}} = 0,23$$

For de fem gennemregnede situationer fås følgende koefficienter

Tryktab (pa)	-	2	5	10	15
C _k	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
C _v	1,1	0,55	2,83	0,24	0,20
C _d	0,7	0,36	0,23	0,16	0,13

Bilag 7: Frisklufttilførsel via tekstilkanaler på Margeretaskolen



Tekomo Byggnadskvalitet AB

[11]

KE FIBERTEC

C 4 Teknik
Claes-Uno Widerfors
Västra Boulevarden 13
291 32 Kristianstad

1997-06-05

Undersökning av strömningsbild, ventilationseffektivitet, filtrering samt temperaturförhållandena i klassrum med ACP -tilluftsdon av textil (sk. textilstrumpa)
Margeretaskolan i Helsingborg

Bakgrund

Undersökningen har utförts i syfte att utgöra ett ytterligare underlag för systemlösningen och användningen (placeringsunderlag) av densamma på Centralskolan i Kristianstad.

Tidigare har på samma objekt utförts "Mätningar av två klimatvariabler av betydelse för upplevelsen av drag" (1997-02-09) omfattande variablerna temperatur och lufthastighet.

Denna undersökningen utfördes i klass 3 B (lärare: Lena Tryggmo) med 25 elever och 1 lärare. Röktestet (för undersökning av strömningsbilden på luften från ACP-donet) utfördes i slutet av sista lektionen före lunch.
Beträffande övriga undersökningar utfördes dessa i slutet av första lektionen efter lunch i samma sal.

Objektsbeskrivning

Skolbyggnad uppförd på 70-talet i ett plan med skolsalar orienterade i ett antal paviljongliknande byggnader med atriumgårdar.

Ventilationssystemet för salarna har förändrats och byggts om, till nu bestående av mekanisk frånluft och tilluft via ACP-textildon, ett sk. passivt tilluftssystem med luftintag i gavelfasad ca 4 m över mark.

Spjäll styrs via frånluftsfläkt vilket bl.a. innebär att när frånluftsfläkten stängs av stänger även tilluftsspjället.

Frånluftsflödet styrs för övrigt manuellt och steglöst med tyristor

Textilstrumpan (blå) är placerad i tak (takhöjd ca 4 m) längs fönsterfasad ca 50 cm ut från densamma
Strumpans diameter/längd : 630 mm/ 6 m

Värmesystemet bestod av vattenradiatorer med överliggande fönsterbänk (ca 40 cm över golv) placerade längs fönsterpartiet med avbrott för terrassdörr i vardera ände.

Adress: Kontor och laboratorium:	Telefon	Fax	Mobiltel	Bankgiro	Reg.nr
Ernst Kustroddares Gränd 3	040 - 47 23 20	040 - 47 23 60	070 - 547 23 20	124 - 6446	556297 - 8550
239 35 Skanör	040 - 47 26 86 bostad		010 - 201 43 45		

Resultat

Röktest

Rökampullen placerades från utsida i luftintaget. Efter antändning av ampullen påbörjades rökalsstringen som iakttogs och videofilmades inne i klassrummet.

Därvid framkom följande:

Röken spreds i hela donets (strumpans) längd och mer från delen närmast luftintaget.

Fördelningen av luften var m.a.o. snedfördelad vilket syntes tydligt i skillnad mellan rökspridningen från strumpans början och övriga delen av strumpan.

På den första metern av strumpan föll röken (= luften) rakt ner och drogs sedan nära golvet ut mot rummet.

På resten av strumpan gjorde röken en karakteristisk och något uppåtående rörelse och följde taket (sk. Coandaeffekten) ca 1,5 m för att sedan långsamt fall nedåt och sprida sig in i rummet.

Den del av strumpan där luften föll rakt ner i vistelsezon sammanföll med den del av fönsterfasaden som inte hade radiatorer under fönster p.g.a. terassdörr.

Trycket i strumpan (3 m från strumpans början) uppmättes till 10 Pa vid 250 m³/h och 12 Pa vid 400 m³/h. Undertrycket i salen uppmättes till ca 1 Pa

De slutsatser man kan dra av detta test är att radiatorerna spelar stor roll för spridningsbilden framförallt genom värme konvektionen som hindrar den undertempererade luften att falla direkt ner och som även bör kunna minska effekterna av snedfördelningen av luftflödet från donet
Det är m.a.o. viktigt att framförallt under intagsdelen av strumpan placera radiatorer.

Radiatorsystemet bör vid val av denna typ av tilluftsdon, utan förvärmning av luften, vara väl instuderat samt ha god kapacitet och styrning.

Ventilationseffektivitet

En approximering av ventilationseffektiviteten gjordes genom beräkning av lokalt ventilationsindex baserat på mätningar mitt i rum vid fyra olika tillfällen. Avklingningen studerades genom fortsatta mätningar i enbart vistelsezon.

Koldioxid producerad av brukarna (elever och lärare) har används som spårgas vid dessa mätningar. Lektionen påbörjades 12.30 och avslutades 13.30.

Koldioxidmätningarna påbörjades 12.25 och avslutades 14.25

Koldioxidmätningar (CO₂, ppm)

	13.25	13.35	13.45	13.55	14.00	14.10	14.25
Frånluft	800	730	640	550	485	460	430*
Vist.zon	775	740	690				
Utomhus	390	390	390				

*Koldioxidhalt m. en person (= utredaren) närvarande.

Ventilationsindex under lektion beräknades till 1,1 vilket vittnar om mycket god ventilationseffektivitet för ett s.k. omblandande system.

Efter lektion då inga elever (= inga levande konvektorer) fanns i klassrummet beräknades ventilationsindexet till i genomsnitt 0,9 vilket också är bra.

Beträffande avklingningen av koldioxid till utelufts nivå tog denna 1 timma efter lektionens slut vilket speglar den tid som luften innehåller föroreningar från eleverna och deras aktivitet.

Det kan också utgöra underlag för den tid som ventilationen bör vara igång efter sista lektion.

Filtrering

KE FIBERTEC

Baserat på partikelmätning vid don samt utomhus beräknades strumpans reningsgrad av totalantalet partiklar större än 0,5 µm. Partikelhalten (ant. milj./m³luft) uppmättes vid don till 76,3 och ute till 124,1. Beräknad reningsgrad var ca 40% vilket är relativt bra om reningen inkluderar allergena ämnen typ pollen och svampsporer.

Temperaturförhållanden

Lufttemperaturen (Temp °C) i vistelsezon uppmättes enligt följande

	Golv	1 m ö. golv	1,6 ö. golv	2 m ö.golv	2,5m ö.golv	vid tak
Mitt i sal	17,7	18,2	18,6	18,8	19,0	19,5
Bänklats v.fönster u.strumpa	18,2	18,4	18,6	18,7	18,7	18,7
Vid kateder u.strumpa	18,4	18,2	18,0	17,9	17,8	17,3
3 m fr.fönster och kateder	18,0	18,2	18,2	18,4	18,6	18,9

Vid frånluftsdon uppmättes 18,7°C. Uteluftstemperaturen var vid mättillfället 8,5 °C.

Temperaturskillnaden mellan huvud och fot är fullt acceptabel (< 1°C) i samtliga mätpunkter. Den mest kritiska platsen är vid katedern där tilluften från strumpan inte fångas upp av de termiska luftströmlarna p.g.a. att radiator inte finns mot denna del av fönsterfasad p.g.a. terrassdörr. Luftflödet är dessutom större här p.g.a. snedfördelningen vilket ytterligare påverkar temperaturen i denna mätpunkt.

Temperaturen i vistelsezon som var mellan 18-19 °C var något låg (dock ej anmärkningsvärt låg), skulle kunna varit i intervallet 20-21°C om radiatorsystemet haft en högre kapacitet och varit bättre injusterat.

Övrigt

Frånluftsfläkten hade förhöjd ljudnivå vad avser fr.a. det lågfrekventa området vilket kan verka störande på undervisningen och medverka till att fläkten i värsta fall stängs av vilket är av stor betydelse för den kontinuerliga luftväxlingen av klassrummet.

Slutord

Ventilationslösningen omfattande tilluftsdon -ACP-textilstrumpa med intagsspjäll samt frånluftsfläkt synes fungera tillfredsställande under förutsättning

- att rummen har väl fungerande radiatorsystem och
- att radiatorytan i längdriktning täcker hela den del av fönsterfasaden som motsvaras av ACP-donet.

1997-06-05

TEKOMO Byggnadskvalitet AB

E va Nyman