

Velfungerende løsninger til ventilationssystemer i skoleklasser

Februar 2014



ALECTIA

ALECTIA A/S Teknikerbyen 34 Tlf.: +45 88 19 10 00
2830 Virum Fax: +45 88 19 10 01
Denmark www.alectia.com

KONTAKTPERSON Christian A. Hviid
Tlf.: +45 22 20 90 03
crh@alectia.com

Forord

Det er videnskabeligt bevist at evnen til at absorbere, bearbejde og anvende viden er direkte forbundet til kvaliteten af indeklimaet.

Energistyrelsen har udgivet denne rapport som led i et større fokus på ventilation og indeklima i skoler.

Formålet med rapporten er at få klarlagt hvilke ventilationssystemer der bedst kan integreres i eksisterende klasselokaler, samt hvilke ventilationssystemer der giver den nødvendige luftkvalitet samtidig med der ses på de økonomiske-, vedligeholdelsesmæssige- og æstetiske perspektiver.

Rapporten er et værktøj som skal kvalificere kommuner, teknisk forvaltning, skoleledelser, rådgivere og politikere til at få igangsat undersøgelser og forbedringer af ventilationssystemerne og indeklimaet på de eksisterende skoler.

Det er de danske skolers elever, der skal sikre konkurrenceevnen i fremtiden og vi skylder dem de bedste betingelser for at lære af undervisningen.

Lars D. Christoffersen

Direktør for DTU Diplom

Forhenværende forskningschef ALECTIA

Adjungeret professor DTU

Indholdsfortegnelse

Resumé	6	4.2	Graduering	28
Læsevejledning	7	4.3	Evalueringsparametre	29
Afgrænsning	9	5	Ventilationsprincipper	34
1 Introduktion	10	5.1	Central balanceret mekanisk ventilation	34
2 Baggrund	11	5.2	Decentralt balanceret mekanisk ventilation.....	36
2.1 Indeklima	11	5.3	Mekanisk udsugningsventilation	36
2.2 Energiforbrug.....	12	5.4	Mekanisk udsugningsventilation med forvarmning (evt. via varmepumpe).....	37
2.3 Generelle mindstekrav til ventilationsanlæg i Danmark... 13		5.5	Naturlig ventilation med manuelt opluk	37
2.4 Påkrævet luftmængde.....	15	5.6	Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk, kombineret tvær- og opdriftsventilation	38
2.5 Definition af 'velfungerende' ventilationsanlæg.....	17	5.7	Hybrid ventilation	39
3 Anbefaling	18	6	Skolebygningstypologier	41
3.1 Ventilationsguide.....	22	6.1	Landsbyskolen, 1720-1880	42
4 Evaluering	27	6.2	Etageskolen, 1880-1930	43
4.1 Objektiv evaluering.....	27	6.3	Aulaskolen, 1930-1945	44
		6.4	Kamskolen, 1945-1970.....	45
		6.5	Åbenplanskole eller Fynsplan skole, 1970-1980.....	46

6.6	Projektarbejdsskolen, 1990-2012	47	9.3	Samlet energiforbrug	72
6.7	Opsummering	48	9.4	Evaluering af SEL-værdi	73
7	Æstetik	50	9.5	Evaluering af varmegenvinding	74
7.1	Synlige installationers æstetik	50	10	Praktiske erfaringer	75
7.2	Integrerede installationers æstetik	51	10.1	Interviews	75
7.3	Usynlige installationers æstetik	52	10.2	Central balanceret ventilation	76
7.4	Evaluering af æstetik	57	10.3	Decentral balanceret mekanisk ventilation	80
8	Indeklimamålinger	58	10.4	Udsugningsventilation	82
8.1	CO ₂ -koncentration	59	10.5	Udsugningsventilation med forvarmning i facade	83
8.2	Luftkvalitet	61	10.6	Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk	84
8.3	Temperatur	63	10.7	Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk, kombineret opdrift- og tværv ventilation	86
8.4	Supplerende indeklimakilder	64	10.8	Hybrid ventilation	88
8.5	Evaluering af luftkvalitet	65	10.9	Evaluering af træk	92
8.6	Evaluering af temperaturer	67	10.10	Evaluering af støj	93
8.7	Evaluering af køling vha. natventilation	68	10.11	Evaluering af filtrering	94
9	Energiforbrug til ventilation	69	10.12	Evaluering af etableringsomkostninger	95
9.1	Elforbrug	70	10.13	Evaluering af vedligeholdelsesomkostninger	96
9.2	Varmeforbrug	71			

11	Markedsmodenhed	97	Skole D – Oprindelig skolebygning	130
11.1	Central balanceret mekanisk ventilation	98	Skole D – Genopbygning efter brand	131
11.2	Decentral ventilation	99	Skole E	132
11.3	Udsugningsventilation evt. med forvarmning i facaden ...	99	Skole E – tilbygning til lokaler	133
11.4	Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk	100	Skole F	134
11.5	Hybrid ventilation, mixed mode	100	Skole G	135
11.6	Hybrid ventilation, two-mode	100	Skole H	136
11.7	Nye teknologier på det danske marked	101	Skole I	137
12	Referencer	107		
12.1	Online kilder	113		
13	Begrebsforklaring	115		
Bilag A	- Projektdeltagere	122		
	Interviewpersoner	123		
Bilag B	- Skolebygninger	125		
	Skole A	127		
	Skole B	128		
	Skole C	129		

Resumé

ALECTIA A/S har for Energistyrelsen foretaget en kortlægning af hvilke ventilationsløsninger, som er velfungerende til renoveringsopgaver i skoler.

De undersøgte ventilationsprincipper er overordnet beskrevet sammen med de skolebygningskategorier, som i sidste ende vil have indflydelse på det bedste løsningsvalg.

For flere af principperne er indeklimaet blevet målt i et større antal skoler. Målinger kobles sammen med praktiske erfaringer fra pedeller, forvaltninger og bygningsejere. Erfaringer og viden suppleres med udenlandske og indenlandske akademiske kilder.

På baggrund af løsningskvalificeringen anbefales tre former for ventilationsprincipper, når alle evalueringsparametrene tages i betragtning og luftkvalitet, energiforbrug og samlede omkostninger er fokusområder.

- centrale mekaniske ventilationsanlæg
- decentrale mekaniske ventilationsanlæg
- two-mode hybrid anlæg, hvor naturlig ventilation om sommeren kombineres med mekanisk ventilation om vinteren

Sidstnævnte kræver dog specielle overvejelser omkring træk og støj fra åbentstående vinduer samt den resulterende luftkvalitet.

[En forkortet udgave af denne rapport findes som praktisk vejledning.](#)

Læsevejledning

Grafisk er rapporten layoutet i to rum. Et rum foroven med tekst og et rum forneden, som anvendes til at placere illustrationer, billeder eller forklarende tekstbokse. For at bryde tekstrummet i mindre bidder er det opdelt i to kolonner.

Det er ambitionen, at rapporten i store træk formidler budskabet alene ved illustrationsrummet, og at teksten skal fungere sekundært.

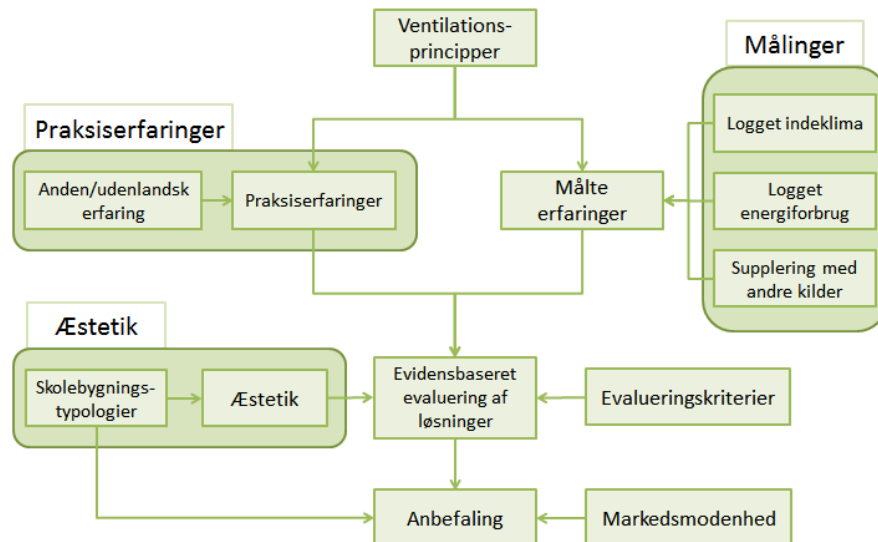
Rapporten er inddelt i en rækkefølge, som starter med at give baggrund (kapitel 2) - herunder definitionen af et velfungerende ventilationssystem - og den endelige anbefaling af det/de bedst egnede ventilationssystemer i kombination med den pågældende skolebygning

(kapitel 3). Med andre ord bringes konklusionen som noget af det første.

Analyserne starter derefter med evalueringskriterier (kapitel 4) og en beskrivelse af de undersøgte ventilationsprincipper (kapitel 5) samt en analyse af de eksisterende skolebygningstypologier, hvor ventilationssystemerne skal implementeres (kapitel 6).

I forbindelse med skolebygningstypologierne behandles æstetikken i kapitel 7.

Dernæst følger analyserne af indeklimaet (kapitel 8), af det registrerede energiforbrug (kapitel 9) samt den indsamlede praksiserfaring for forskellige systemer (kapitel 10).



Figur 1 Rapportstruktur. Rapporten indeholder tre hovedemner: praksiserfaringer, målinger og æstetikvurdering. Dertil kommer nogle hjælpeafsnit såsom ventilationsprincipbeskrivelser og beskrivelser af skolebygningstypologier.

Analyserne anvendes sammen med en æstetisk vurdering (kapitel 7).

Til slut afrundes med en vurdering af markedsmodenhed, dels på de undersøgte systemer i rapporten, dels på nye teknologier på det danske marked (kapitel 11).

Generelt i rapporten betegner termen *ventilation* udskiftning af brugt luft og tilvejebringelse af frisk luft i et lokale. *Ventilationsprincip* betegner metoderne, hvormed luften kan udskiftes. Principperne kan være med forceret luftmængde eller med naturligt drevet luftmængde eller blandinger. *Ventilationsanlæg* betegner generelt mekaniske balancerede ventilationssystemer.

Bagerst i rapporten er indsat en ordforklaring (kapitel 13) samt bilag.

Alle opgivne priser er estimerede og ekskl. moms.

Afgrænsning

Skolerenovering er et meget stort felt, som kræver at de involverede aktører tænker i helheder for at det bedste resultat opnås. Denne rapport præsenterer *ikke* en helhedsorienteret design- eller renoveringsstrategi, men repræsenterer et fagligt input til den helhedsorienterede designproces som skoleledelse, rådgivere, teknisk forvaltning og entreprenører kan benytte sig af.

Skoler omfatter, udover klasselokaler, typisk også en række andre lokaler, herunder kontorer, faglokaler, sportshaller, gangarealer, kantiner etc.

I rapporten fokuseres hovedsageligt på de ventilationstekniske aspekter i forbindelse med renoveringer af *klasselokaler*. For andre lokaler er ventilationsforholdene meget anderledes end for et klasselokale og de kræver ofte helt specielle overvejelser.

Med ventilationstekniske aspekter forstås indbygning, føringsveje, fleksibilitet, energiforbrug, pris, vedligehold og indeklima i relation til nogle generaliserede skolebygningskategorier.

Selvom rapportens fokus ligger på renovering er der ingen hindring for at analyserne ikke også kan anvendes i overvejelserne omkring nybyg.



Figur 2 Fritliggende fagfløj (t.v.) for Science, Skovgårdsskolen Gentofte.

1 Introduktion

Dybe rum og lavt til loftet. Det er karakteristiske kendetegn som går igen i meget skolebyggeri. Luftkvaliteten afhænger dermed helt af et velfungerende ventilationsanlæg.

Energistyrelsen ønsker et katalog over velfungerende ventilationsløsninger til renovering i eksisterende skoler. I opgaven indgår en kortlægning af eksisterende viden, analyse og kvalificering af forskellige løsninger samt konkret anbefaling af de løsninger, som bedst opfylder en række kriterier, så som indeklima, energiforbrug, omkostninger og æstetik.

I opgaven indgår også idéer og anbefalinger af fremtidige løsninger og teknikker, som kan forudses at få væsentlige markedsdele og derigennem at vurdere behovet for yderligere udvikling.



Figur 3 Halloween forberedelse, Rytterskolen i St. Rørbæk. I dag forsamlingshus i Frederikssund kommune.

2 Baggrund

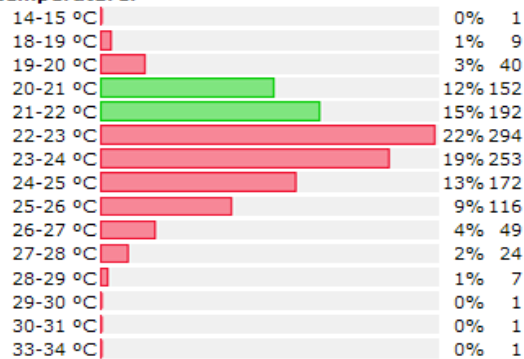
Ventilationsforholdene på en tredjedel af de danske skoler opfylder ikke bygningsreglementets krav til frisk luft. Det giver tit hovedpine, irriterede slimhinder, træthed og koncentrationsbesvær.

2.1 Indeklima

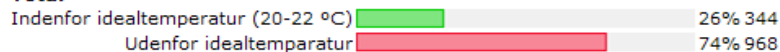
Baseret på en stor nordisk undersøgelse i 2009 (Masseeksperiment, 2009) er mere end 50 % af skoleeleverne i de danske folkeskoler udsat for et dårligt indeklima. Det kommer til udtryk ved for høje koncentrationer af CO₂. Kuldioxid genereres via skoleelevernes stofskifte og høje koncentrationer i indeluften indikerer utilstrækkeligt luftskifte. Lavere luftskifte medfører generelt højere koncentrationer af

Figur 4 Temperaturniveau i forskellige skoler. Den ideelle temperatur (20-22 °C) afhænger reelt af elevernes påklædning. (Kun) om sommeren kan tillades op til 26 °C. Kilde: Masseeksperiment (2009)

Fordeling i forskellige temperaturer



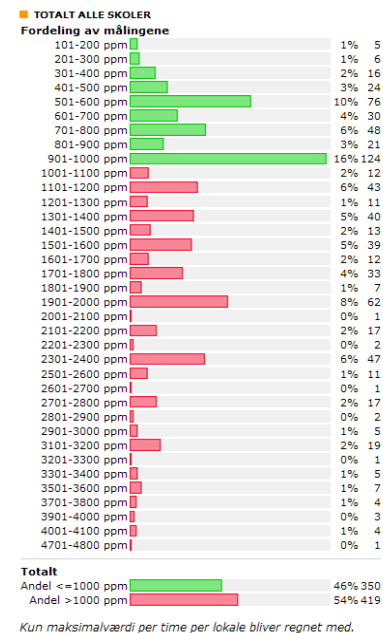
Total



mange andre forureninger i indeluften, men CO₂ er ikke i sig selv en forurening.

I Masseeksperimentet (2009) er der registreret værdier på helt op til 4000 ppm. Til sammenligning opererer Arbejdstilsynet med en grænseværdi for påbud på 0,2 % (svarende til 2499 ppm) og betragter godt indeklima som max. 1000 ppm i kontormiljøer.

Dataindsamlingen fra 2009 giver et godt grundlag til at sammenligne danske skoler med skoler fra de lande, vi normalt sammenligner os med. Figur 4 og Figur 5 viser det totale billede for alle skoler, der deltog (ca. 13 % af landets skoler).

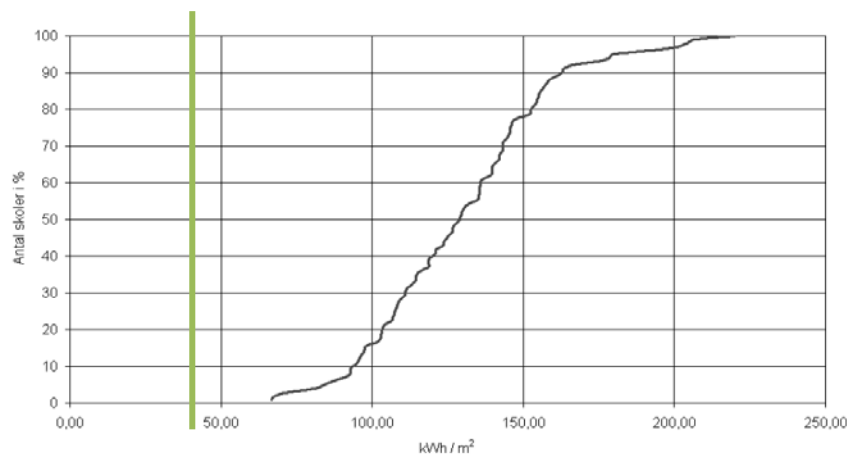


Figur 5 Luftkvalitet målt ved CO₂-indhold i forskellige skoler. Kilde: Masseeksperiment (2009)

Figur 4 viser, at det termiske indeklima i størstedelen af skolerne ligger uden for idealtemperaturen i den målte periode, og at luftkvaliteten kan betegnes som uacceptabel i mere end halvdelen af skolerne.

Lignende undersøgelser er også udført i Sverige og Norge med væsentligt mindre CO₂ niveauer, hvilket ganske simpelt skyldes højere ventilationsrater i lokalet.

International Centre for Indoor Environment and Energy (ICIEE) fra DTU har gennemført detaljerede indeklimate målinger over længere perioder, som dokumenterer indeklimatekvaliteten på 85 skoler. Disse langtidsmålinger med 2 ugers varighed støtter konklusionen fra korttidsmålingerne (øjebliksmålinger) foretaget i indeklimateundersøgelsen i 2009.



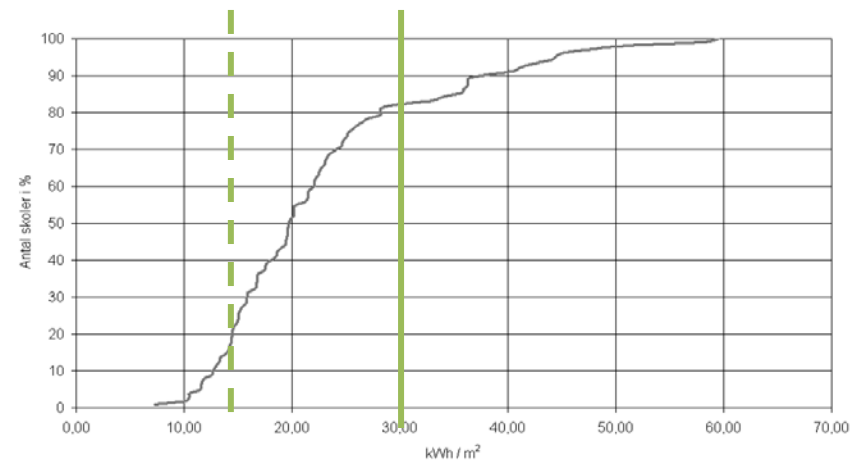
Figur 6 Kumuleret, målt varmekonsum i danske skoler (Gunnarsen et al., 2001). En ny skole opført efter BR10 vil have et varmekonsum under 40 kWh/m² pr. år.

En anden undersøgelse af ICIEE indikerer, at fordobling af ventilationsrater (som resulterer i mindre koncentration af forureninger) forøger præstationen på de typiske skoleopgaver med op til 15 % (Wargocki & Wyon, 2006).

Skolerne har altså ofte et arbejdsmiljø, hvor elever og lærere hver dag skal yde en optimal indsats i utilstrækkeligt ventilerede lokaler, som, målt på CO₂-niveau, drastisk overskrider Arbejdstilsynets anbefalede grænser og som dermed koster op til 15 % af indlæringen.

2.2 Energiforbrug

Ud over problemer med indeklimatekvaliteten, har mange skoler også unødvendigt høje energiomkostninger, se Figur 6 og Figur 7. Det



Figur 7 Kumuleret, målt elforbrug i danske skoler (Gunnarsen et al., 2001). En ny skole opført efter BR10 med central mekanisk ventilation vil have et elforbrug til ventilation og belysning på 14 kWh/m² pr. år. IT og diverse bidrager med yderligere 16 kWh/m² (tal er beregnet som gennemsnit af 7 skoler i Gunnarsen et al. (2001)). Det samlede elforbrug er 30 kWh/m² pr. år.

unødvendige ligger i, at energiomkostningerne kan reduceres væsentligt med tiltag, der giver rentable energibesparelser med det samme. Energirenoveringer kan derfor meget hurtigt frigøre midler i skolernes driftsbudget – midler, der kan bruges til at forbedre skolernes kerneaktiviteter.

2.3 Generelle mindstekrav til ventilationsanlæg i Danmark

I Bygningsreglementet 2010 (BR10) er specificeret både generelle og specifikke krav til ventilationsanlæg. For læserens skyld nævner vi de mest betydende krav til ventilationsanlæg her, så det er lettere at perspektivere rapportens resultater.

DER FINDES IKKE DÅRLIGE VENTILATIONSSYSTEMER

DER FINDES DÅRLIG OVERENSSTEMMELSE MELLEM FORVENTET OG REEL PERFORMANCE

DÅRLIG OVERENSSTEMMELSE MELLEM FORVENTET OG REEL PERFORMANCE KAN SKYLDES:

- dårligt design (uddannelse af designer er nødvendig)
- dårlig installationsudførelse (uddannelse af montør er nødvendig)
- mangelfuld testperiode (bør fremgå af tidsplanen)
- mangelfuld overlevering (bør fremgå af kontrakten)
- dårlig drift og styring (opkvalificering af personel)
- dårligt vedligehold (procedure fastlægges)

Udover kravene indeholder bygningsreglementet en vejledningstekst og referencer til en række normer og standarder. Både vejledning og normer betragtes i praksis ofte som gældende lovgivning, men det ligger uden for rapportens rækkevidde at beskrive disse krav i detaljer.

I BR10 er specificeret to lavenergiklasser, benævnt 2015 og 2020. Det forventes, at disse lavenergiklasser konverteres til gældende Bygningsreglement i år 2015 og 2020 henholdsvis. Kravet i 2020 forventes dog at træde i kraft for offentlige bygninger, fx kommunale skoler, allerede i 2018.

ENHEDEN PPM BETYDER 1 UD AF EN MILLION.

I EN KUBIKMETER LUFT KAN DER VÆRE 1 MILLION SPILLETERNINGER.

1000 PPM BETYDER AT DE 1000 ER FYLDT MED REN CO₂.

Et generelt gældende krav for BR10 er:

Kap 8.3 stk. 5

Ventilationssystemer skal renses, drives og vedligeholdes, så de holdes i en teknisk og hygiejnisk forsvarlig stand.

De specifikke krav for BR10 lyder:

Kap 6.3.1.3 stk. 2

Undervisningsrum i skoler og lignende skal ventileres med et ventilationsanlæg, der omfatter såvel indblæsning som udsugning og varmegenvinding.

Ved benyttelse af særlige byggetekniske tiltag, som f.eks. større rumvoluminer pr. person, brug af flere udluftningsmuligheder, herunder muligheder for tværventilation, kan kravet om mekanisk ventilation fraviges under forudsætning af, at der kan opretholdes et sundhedsmæssigt tilfredsstillende indeklima.

Kap 8.3 stk. 9

For ventilationsanlæg med konstant luftydelse må elforbruget til lufttransport ikke overstige 1800 J/m³ udeluft.

For anlæg med variabel luftydelse må elforbruget til lufttransport ikke overstige 2100 J/m³ udeluft ved maksimal ydelse og tryktab.

Tabel 1 Opsummering af Bygningsreglementets (BR10, 2012) mindstekrav til ventilation i skoler gennem tiden.

	BR82	BR95	BR08	BR10	Energikl. 2015	Energikl. 2020
SEL-værdi, CAV	-	2500 J/m ³	2100 J/m ³	1800 J/m ³	1800 J/m ³	1500 J/m ³
SEL-værdi, VAV	-	3200 J/m ³	2500 J/m ³	2100 J/m ³	2100 J/m ³	1500 J/m ³
SEL-værdi, udsugning	-	-	1000 J/m ³	800 J/m ³	800 J/m ³	800 J/m ³
Mindste varmegenvinding	'Eff. genvinding'	'Eff. genvinding'	65 % (kun mek)	70 % (kun mek)	70 % (kun mek)	75 % (kun mek)
Lufttæthed ved 50 Pa	-	-	1,5 l/s pr. m ²	1,5 l/s pr. m ²	1,0 l/s pr. m ²	0,5 l/s pr. m ²
Ventilationskrav i skoler og institutioner	-	5 l/s pr. pers. + 0,4 l/s pr. m ²	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ²	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ² eller 1500 ppm CO ₂	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ² eller 1500 ppm CO ₂	900 ppm CO ₂
Termisk indeklima	Ingen spec. krav	Ingen spec. krav	Ingen spec. krav	Ingen spec. krav	Få timer >26 °C	Få timer >26 °C

For udsugningsanlæg uden mekanisk udelufttilførsel må det specifikke elforbrug til lufttransport ikke overstige 800 J/m^3 .

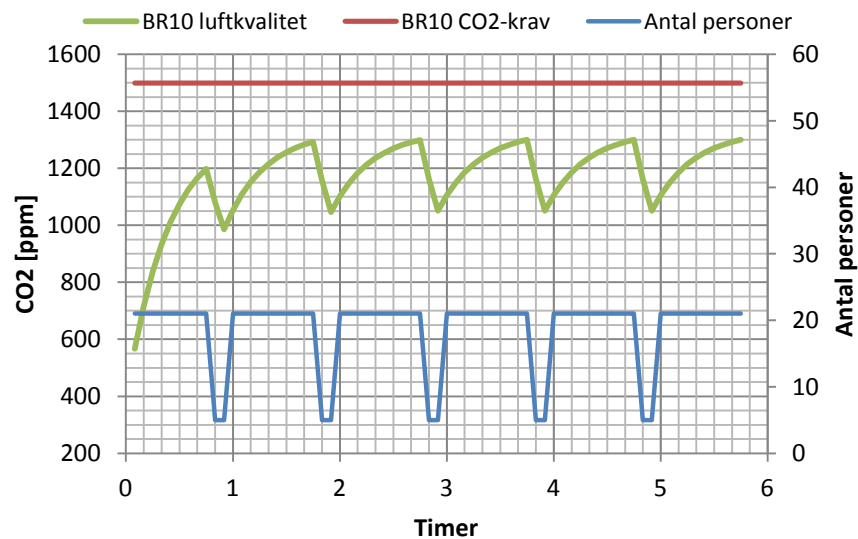
Kap 8.3 stk. 6

Ventilationsanlæg skal udføres med varmegenvinding med en temperaturvirkningsgrad på mindst 70 %.

Bestemmelser specielt gældende for bygningsklasse 2020:

Kap 7.2.5.1 stk. 8

Ventilationsanlæg skal udføres med varmegenvinding med en tør temperaturvirkningsgrad på mindst 75 %.



Figur 8 Udviklingen af CO₂-koncentrationen i klasselokale beregnet med ventilationskravet i BR10 (6 l/s pr. pers). Lektionernes varighed er 45 min. med 10 min. pauser

Kap 7.2.5.1 stk. 9

Specifikt elforbrug til ventilation må ikke overstige 1.500 J/m^3 .

Kap 7.2.5.1 stk. 11

I kontorer, skoler og institutioner skal det sikres, at indeluftens CO₂ indhold ikke overstiger 900 ppm i længere perioder.

2.4 Påkrævet luftmængde

Den krævede luftmængde til et normalklasselokale er specificeret i BR10:

BYGNINGSREGLEMENTETS KRAV TIL VENTILATION AF KLASSELOKALER ER 5 L/S PER PERSON + 0,35 L/S PER M². SAMTIDIG MÅ CO₂-KONCENTRATIONEN IKKE OVERSTIGE 0,1 % I LÆNGERE PERIODER, MEN DER GODTAGES KORTVARIGE OVERSKRIDELSER I LØBET AF DAGEN.

0,1% CO₂ KAN TOLKES SOM BÅDE 1000 PPM og 1500 PPM (reelt: 1499)

I PRAKSIS ER DEN FØRSTE TOLKNING (1000 PPM) OFTE DEN DIMENSIONSGIVENDE.

VED EFTERVISNING MED MÅLINGER TILLADES OP TIL 1500 PPM

Kap 6.3.1.3 stk. 2

Indblæsningen med udeluft og udsugningen skal i normalklasserum være mindst 5 l/s pr. pers., samt 0,35 l/s pr. m² gulv, samtidig skal det sikres, at CO₂ indholdet i indeluften ikke i længere perioder overstiger 0,1 % CO₂.

Bemærk at 0,1 % CO₂ kan tolkes som 1500 ppm (reelt: 1499). Se i øvrigt tekstboks i afsnit 2.3.

Størrelsen af et normalklasselokale er angivet i BR10:

Kap 3.4.2 stk. 2

Normalklasserum i skoler og lignende skal, når der etableres effektiv ventilation, have et rumindhold på mindst 6 m³ pr. pers.

I Tabel 2 beregnes den påkrævede luftmængde efter BR10 og BR20 i et omtrentligt normalklasselokale med henholdsvis 21 (svarer til gennemsnit af skoler i kapitel 8 Indeklimamålinger) eller 28 elever og 1 klasselærer (Klassekvotienter i grundskolen, 2011, 2012). Aktivitetsniveau er lidt mere end stillesiddende: 1,2 Met. Lokalets gulvareal er 60 m² med en rumhøjde på 3,0 m, hvilket giver et rumindhold på 6,2-8,2 m³ pr. pers., lidt højere end BR10-krav til nybyggeri.

Lokaledimensionerne svarer til gennemsnittet af skolerne i kapitel 7.

Til sammenligning er nogle nabolandes ventilationskrav opstillet i Tabel 3. Danmark ligger p.t. blandt de nederste, men hvis 2020 kravene bliver gennemført i deres nuværende form, vil vi ligge i toppen.

Tabel 2 Ventilationsmængder udregnet efter forskellige krav. Luftmængden under termisk komfortkrav er påkrævet for at fjerne elevernes varmeafgivelse og kræver mindst 6 °C forskel mellem inde- og udetemperatur, dvs. andre tiltag, fx natventilation er nødvendige om sommeren.

21 elever + 1 lærer		Luftmængde m ³ /h	Luftskifte gange i timen (volume: 180 m ³)	Luftmængde pr. m ² (60 m ²)	Luftmængde pr. pers. (22 pers.)
BR10/BR15	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ²	470 m ³ /h	2,6 h ⁻¹	2,2 l/s pr. m ²	6,0 l/s pr. pers.
BR20	Under 900 ppm	840 m ³ /h	4,6 h ⁻¹	3,9 l/s pr. m ²	10,6 l/s pr. pers.
Termisk komfort	Mulig op til en udetemp. på 18 °C	1120 m ³ /h	6,2 h ⁻¹	5,2 l/s pr. m ²	14,1 l/s pr. pers.
28 elever + 1 lærer		Luftmængde m ³ /h	Luftskifte gange i timen (volume: 180 m ³)	Luftmængde pr. m ² (60 m ²)	Luftmængde pr. pers. (29 pers.)
BR10/BR15	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ²	600 m ³ /h	3,3 h ⁻¹	2,8 l/s pr. m ²	5,7 l/s pr. pers.
BR20	Under 900 ppm	1130 m ³ /h	6,3 h ⁻¹	5,2 l/s pr. m ²	10,8 l/s pr. pers.
Termisk komfort	Mulig op til en udetemp. på 18 °C	1380 m ³ /h	7,7 h ⁻¹	6,4 l/s pr. m ²	13,2 l/s pr. pers.

2.5 Definition af 'velfungerende' ventilationsanlæg

Det primære formål med at etablere ventilation i skoler er at sikre luftkvaliteten. Det sekundære formål er at sikre det termiske indeklima mod for stor overophedning.

Et nyinstalleret ventilationsanlæg må forventes at have en ydeevne som mindst svarer til lovkrav og nyeste normer/standarder. Det gælder korrekt luftmængde med god ventilationseffektivitet, lavt støjniveau og lavt varme- og elforbrug.

Et velfungerende ventilationssystem defineres som et anlæg, som overholder mindstekravene.

Et velfungerende ventilationssystem bør i renoverede skoler:

- Have evnen til at sikre luftkvaliteten, her målt som CO₂-niveau
- Bidrage til opretholdelse af den termiske komfort, f.eks. ved at undgå træk (fortrinsvist et problem i kolde perioder) og temperere lokalet med natventilation i varme perioder
- Have lavt støjniveau

Systemet skal kunne yde som nævnt under forudsætning af at:

- Energiforbruget er lavt
- Anlægsomkostningerne er rimelige
- Serviceomkostningerne er rimelige

Tabel 3 Krævede ventilationsrater i klasselokaler i andre lande.

	Danmark, BR10	Danmark, BR20	Sverige	Norge	Holland	Belgien
Formelt ventilationskrav	5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ²	900 ppm	7 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m ²	7 l/s pr. pers. + 0,7 l/s pr. m ²	8,5 l/s pr. pers.	6,1 l/s pr. pers.
Omregnet til l/s pr. pers	6,0 l/s pr. pers.	10,6 l/s pr. pers.	8,0 l/s pr. pers.	8,9 l/s pr. pers.	8,5 l/s pr. pers.	6,1 l/s pr. pers.

3 Anbefaling

I kapitel 4 er det beskrevet, hvordan ventilationsprincipperne evalueres på baggrund af de opstillede kriterier. Begrundelsen for evalueringsgradueringen er et resultat af de analyser, som den samlede rapport repræsenterer. På baggrund af gradueringen mellem forskellige principper, kan de enkelte principper sammenlignes på et transparent og formelt grundlag.

Tabel 4 opsummerer evalueringsparametrene med angivelse af hvilke kriterier, der foranlediger graduering mellem fremragende, acceptabel og uacceptabel performance.

Tabel 4 Opsummering af evalueringskriterier med tre gradueringsniveauer.

	Uacceptabelt	Acceptabelt	Fremragende
Luftkvalitet, CO ₂	Over 1500 ppm	1000-1500 ppm	Under 1000 ppm
Temperatur	Jævnligt udenfor 20-26 °C	Indenfor 20-26 °C	20-23 °C
Køling vha. natventilation	-	Evt. mulighed for natventilation	Natventilation indbygget
Træk	Forekommer	Lav risiko	Forekommer ikke
Støj, teknisk (trafik)	Større end 30 (33) dB(A)	27-30 (30-33) dB(A)	Under 27 (30) dB(A)
Æstetik	-	(Meget) synlig	Integreret eller usynlig
Filtrering	-	Evt. mulighed for filter	Filterklasse F7
Specifikt elforbrug, SEL	Over 2100 J/m ²	1000-2100 J/m ²	Under 1000 J/m ²
Varmegenvinding	Mindre end 70 %	70-85 %	Højere end 85 %
Etablering	-	Central mekanisk ventilation	30 % billigere
Vedligehold	-	Central mekanisk ventilation	30 % billigere

Tabel 5 viser rapportens hovedresultat, hvor de analyserede ventilationsprincipper er tildelt en graduering på de forskellige evalueringsparametre. Mørkegrøn markerer fremragende performance, lysegrøn acceptabel og skraveret rød uacceptabel performance. Sidstnævnte bundes i minimumskrav, som et velfungerende ventilationssystem, jf. afsnit 2.5, side 17, må forventes at kunne opfylde. Uacceptabel performance tildeles, hvis rapportens analyser problematiserer eller sandsynliggør at det pågældende ventilationsprincip reelt performer under niveau i virkelige klasseundervisningslokaler.

Parametrene er ikke vægtet på nogen måde. Det overlades til læseren, hvis vedkommende synes at nogle parametre skal tillægges større vigtighed end andre. Her præsenteres evalueringsparametrene

ligeværdigt, fordi alle er særdeles relevante for ethvert velfungerende ventilationsprincip til klasselokaler.

Hovedkonklusionen at centrale eller decentrale balancerede mekaniske ventilationsanlæg, som via CO₂ og temperatursensorer styres efter behovet i de enkelte klasselokaler, må betragtes som de to principper, som tilfredsstiller flest evalueringsparametre med størst margen og som har den bedste markedsmodenhed.

Hybrid ventilation, hvor automatisk styret naturlig og mekanisk ventilation kombineres, performer også fremragende på mange parametre. Two-mode hybrid er en kombination af det bedste fra begge verdener, og det er forfatterens opfattelse, at denne type har det største potentiale til at sikre maksimal brugertilfredshed for mindst muligt energi-

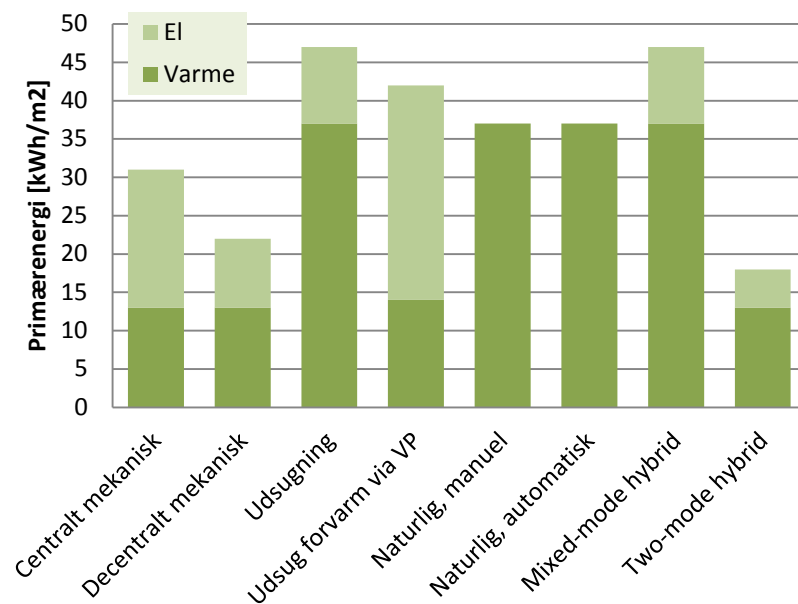
forbrug. P.t. kræves dog nogle specifikke overvejelser, som er relateret til sommerdriften:

- træk fra vinduerne forekommer også om sommeren
- filtrering af udeluft for specielt pollen
- støj fra gående/kørende trafik
- åbentstående vinduer om natten, af hensyn til nedkølingen af bygningen, inviterer til indbrud eller hærværk

Desuden er markedsmoden driftsstyring kun i sin vorden, se dog afsnit 11.7.6.

Med hensyn til energiforbruget er det uddybet på Figur 9, som viser det samlede energiforbrug til ventilation for et klasselokale for alle ventilationsprincipperne. Central mekanisk har et lavt energiforbrug (SEL: 1500, varmegenvinding: 85%), mens varmetabet ved systemer uden varmegenvinding er ganske betydeligt. Selvfølgelig under forudsætning af at alle systemer yder den samme luftkvalitet.

Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk skiller sig ud, for selv om det er billigt at etablere og servicere, siger målinger og praktisk og akademisk erfaring, at det ikke kan yde tilfredsstillende på seks vigtige parametre: luftkvalitet, temperatur, natventilation, træk, støj og varmegenvinding.



Selv naturlig tværv ventilation med automatisk styring, som er billigt at etablere, har svært ved at opnå det rigtige luftskifte uden at generere brugerne med træk i og imellem timerne. Hvis man omvendt har midler til at designe sit klasselokale, så krav til rumdimensioner og åbningsplacering følger alle retningslinier, så er tværv ventilation acceptabelt på flere parametre.

Elbesparelsen ved den manglende ventilator kan dog ikke helt opveje varmetabet, som opstår uden varmegenvinding, se Figur 9 side 20.

Princippet bør dog ikke anvendes i områder med dårlig udeluftkvalitet, såsom i bycentrum eller tæt på intensivt trafikerede veje. Trafik nødvendiggør også specielle overvejelser vedr. støjgener og støjløsninger.

Figur 9 Overslag over årligt varme- og elforbrug i et klasselokale fra 1970'erne med nye vinduer og ved forskellige ventilationsprincipper. Simuleret med iDbuidl (www.idbuidl.dk). El og varme er vejet samme iflg. BR10 med varmefaktoren 1,0, og elfaktoren 2,5. VP: varmepumpe. Forudsætninger i afsnit 9.3, side 72. Luftmængde: 2,2 l/s pr. m² (se Tabel 2). Brugstid 8-14

Tabel 5 Evaluering af de forskellige principper til ventilation af klasselokaler ift. de opstillede kriterier. Klassifikationen bygger på de analyser, som den samlede rapport repræsenterer, dvs. **målinger, praktiske erfaringer og fremtidige forventninger**. Mørkegrøn markerer fremragende performance, lysegrøn acceptabel performance, mens skraveret rød markerer uacceptabel performance. Hvid markerer 'ej relevant'.

	Central mekanisk	Decentral mekanisk	Mekanisk udsugning	Mek. udsugn. m. forvarm. via varmpumpe	Naturlig manuel	Naturlig auto., tværv. vent.	Hybrid, mixed-mode	Hybrid, two-mode
Luftkvalitet, CO ₂			a					
Temperatur								
Køling vha. natventilation								
Træk						b	b	
Støj teknik/trafik						c	c	c
Æstetik								
Filtrering			d		d	d	d	e
Specifikt elforbrug, SEL								
Varmegenvinding			f		f	f	f	
Etablering								
Vedligehold								

a) Mek. udsug overholder erfaringsmæssigt kun CO₂-kravet, ikke det strammere 5l/s per pers. + 0,35 l/s per m² krav i BR10

b) Uden specielle tiltag vil træk forekomme. Trækrisikoen skal i hvert konkret tilfælde evalueres med detaljerede simuleringer af luftstrømningerne i rummet

c) Acceptabel performance forudsætter lydsluger (se afsnit 11.7.7), hvis facadeåbningerne er placeret ud til kørende trafik. I praksis kræver gående trafik (skolegårde) lignende støjreducerende overvejelser

d) For ventilationsprincipper med facadeåbninger er filtrering af udeluft ikke et lovkrav

e) Hybrid two-mode benytter sig om sommeren af facadeåbninger, men størstedelen af året filtreres luften i det mekaniske anlæg, derfor acceptabel performance

f) Varmegenvinding er ikke lovkrav i de pågældende ventilationsprincipper

3.1 Ventilationsguide

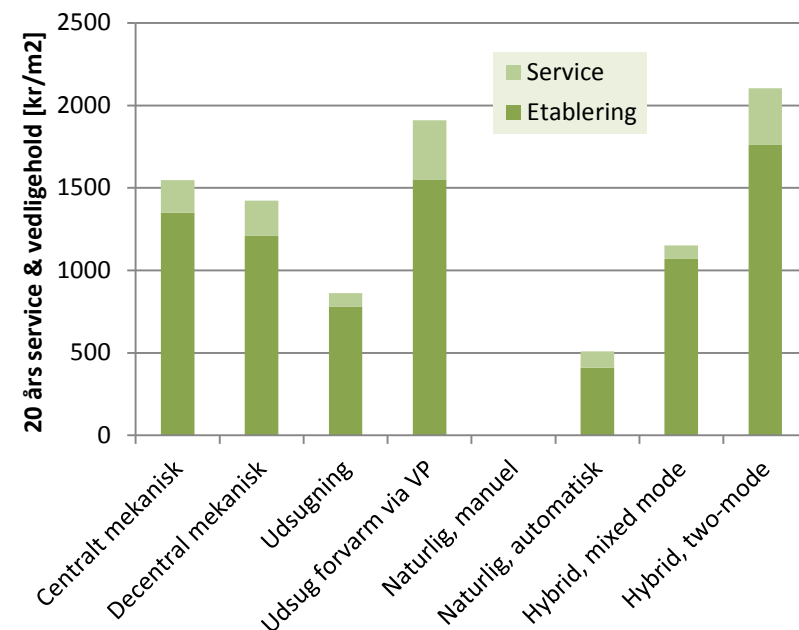
Ovenstående evaluering dækker de fleste aspekter omkring ventilation i klasselokaler, bortset fra et aspekt: bygningens konstruktionsmæssige karakteristika, som har stor betydning i renoveringsprojekter.

Skolebygningens udformning, og især konstruktive princip, er ofte udslagsgivende, når den optimale ventilationsløsning skal anbefales til en given eksisterende bygning, fordi implementeringen vil medføre ændringer i og af bygningen i et vist omfang. Ændringer, som kompromitterer det konstruktive princip er dyre at foretage. Det er f.eks. dyrt, sågar umuligt at installere et centralt balanceret ventilationsanlæg i en bygning med tunge bærende indre vægge. Etableringsomkostningen vil være proportionel med antallet af perforeringer i de

bærende elementer. I dette tilfælde vil en anden løsning være et bedre valg.

I Tabel 6 præsenteres en designguide til valg af ventilationsløsning ud fra nogle bygningskarakteristika.

Figur 10 Opsummering af etablerings- og vedligeholdelsesomkostninger over en 20 års periode.



Tabel 6 Ventilationsguide med fordele og ulemper og anbefalet brug af de forskellige ventilationsprincipper ift. skolebygningstypologi.

	Fordele	Ulemper	Øvrige kommentarer
Central mekanisk	<p>Er i stand til at sikre luftkvaliteten efter nugældende og fremtidige krav. Er den optimale løsning mht. indeklima og energiforbrug.</p> <p>Filtrering er nemt at implementere, inkl. pollenfiltrering.</p> <p>Varmeforbruget er lavt.</p>	<p>Relativt høje etablerings- og serviceomkostninger.</p> <p>God funktion kræver jævnligt vedligehold og rengøring.</p>	<p>Egner sig bedst til skoler med få indre bærende vægge, f.eks. <u>kamskoler, åbenplanskoler og projektarbejdsskoler</u>, hvor det bærende system er præget af søjler og bjælker.</p> <p>Forudsætter at højden til bjælker i korridoren er mindst 3,1 m og helst mere end 3,2 m for at give plads til kanaler.</p> <p>Design på ventilationsskorstene sammentænkes med arkitektur. Valg af design og farve på armaturer, rør og ventiler kan understøtte integration, men kan også have kvaliteter som 'ærlig' synlig installation.</p>
Decentral mekanisk	<p>Er i stand til at sikre luftkvaliteten efter nugældende og fremtidige krav.</p> <p>Filtrering er nemt at implementere, inkl. pollenfiltrering.</p> <p>Med serviceaftale fra producent er serviceomkostningerne ikke markant højere end central mekaniske anlæg. Varmeforbruget er lavt.</p>	<p>Udfordrer æstetikken i lokalet.</p> <p>Relativt høje etablerings- og serviceomkostninger.</p> <p>God funktion kræver jævnligt vedligehold og rengøring.</p> <p>Kan optage gulvplads eller ved placering i facaden reducere dagslyset.</p>	<p>Egner sig bedst til skoler med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbyskoler, etageskoler, aulaskoler</u>, hvor bærende elementer blokerer centralt kanaltræk.</p> <p>Af hensyn til luftfordeling og trækforhold, bør aggregatet placeres højt.</p> <p>Placering af synlige riste i facader skal ske med omtanke i forhold til facadearkitektur. Reduceret areal for lydabsorbende materiale kan kompenseres ved vægabsorbenter.</p> <p>Design på ventilationsaggregat bør overvejes for sammenhæng med helhed.</p>

	Fordele	Ulemper	Øvrige kommentarer
Mekanisk udsugning	I princippet en billig løsning, men praksiserfaringerne er ikke gode. Relativt lave serviceomkostninger.	Er erfaringsmæssigt <i>ikke</i> i stand til at opfylde luftkvalitetskrav sandsynligvis pga. for simpel styring og manglende kontrol af om tilluften er tilstrækkelig. Højt varmeforbrug. Træk forekommer.	Har størst potentiale i skoler med aftræksskorstene, hvor disse kan genanvendes, men luftfordelingen er meget problematisk. Egner sig bedst til skoler med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbysskoler</u> , <u>etageskoler</u> , <u>aulaskoler</u> , hvor bærende elementer blokerer centralt kanaltræk. Design og placering af ventilationsskorstene samt indvendige riste og kanalføringer skal sammentænkes med arkitektonisk udtryk.
Mekanisk udsugning med forvarmning, evt. varmepumpe	Relativt lave serviceomkostninger.	Kan opfylde luftkvalitetskravet når tilluften leveres med ventilatorer i facaden. Træk forekommer erfaringsmæssigt til trods for forvarmningen.	Egner sig bedst til skoler med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbysskoler</u> , <u>etageskoler</u> , <u>aulaskoler</u> , hvor bærende elementer blokerer centralt kanaltræk. Facadeunit kan efterligne lokalets radiatorer. Design og udvendig placering af ventiler i facader skal være velovervejet og integreret.

	Fordele	Ulemper	Øvrige kommentarer
Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk	<p>Ingen serviceomkostninger</p> <p>Intet elforbrug</p> <p>Let at integrere i eksisterende skoler</p> <p>Ingen etableringsomkostninger</p>	<p>Frarådes generelt til klasseventilation.</p> <p>Er <i>ikke</i> i stand til at sikre luftkvaliteten.</p> <p>Har stort varmemeforbrug og giver massive trækgener.</p> <p>Bør ikke anvendes i støjbelastede områder.</p> <p>Rumdybden bør være mindre end 2x rumhøjden (Andersen et al., 2002)</p>	<p>Egner sig til alle skoler, men har størst fordele i klassefløje med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbyskoler</u>, <u>etageskoler</u>, <u>aulaskoler</u>.</p> <p>Kan kun komme på tale i ganske særlige tilfælde, og skal i så fald kombineres med løbende indikation af luftkvalitet samt konstant fokus på brugerinddragelse.</p> <p>Der skal indarbejdes hensigtsmæssige 'diskrete' løsninger for børnesikring.</p> <p>Vinduer/spjæld skal udformes så vejrlig ikke forringer funk.</p>
Naturlig ventilation med automatisk opluk, kombineret opdrift- og tværventilation	<p>Er i stand til at sikre luftkvaliteten efter nugældende krav, hvis en række krav til rum og bygning er opfyldt</p> <p>Intet elforbrug</p> <p>Let at integrere i eksisterende skoler</p> <p>Lave etabl.omk.</p>	<p>Højt varmemeforbrug, og trækgener vil opstå især i vinterperioden.</p> <p>Fungerer bedst i lokaler med rumhøjde over 3,2 m (Andersen et al., 2002)</p> <p>Rumdybden bør være mindre end 5x rumhøjden (CIBSE, 1997)</p> <p>Vinduer/spjæld skal udformes så vejrlig ikke forringer funktionen.</p> <p>Radiatortermostater ej under vinduerne.</p>	<p>Egner sig til alle skoler, men har størst fordele i klassefløje med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbyskoler</u> eller <u>etageskoler</u>, eller i meget åbne skoler med store fællesrum, f.eks. <u>aulaskoler</u> og <u>åbenplanskoler</u>.</p> <p>Egner sig kun til klasselokaler eller klassefløje, hvor der kan skabes ventilation på tværs af lokalet. I praksis fås bedst performance med indtag gennem facadevinduer placeret højt og afkast gennem tag, ovenlys eller lignende.</p> <p>Løsninger må ikke reducere mulighed for at benytte vinduer som redningsåbninger. Design på motoropluk skal passe til vinduer for god æstetisk helhed.</p>

	Fordele	Ulemper	Øvrige kommentarer
Hybrid, mixed mode	<p>Er i stand til at sikre luftkvaliteten efter nugældende krav.</p> <p>Lavt elforbrug</p>	Højt varmeforbrug	<p>Egner sig bedst til skoler med mange bærende vægge, f.eks. <u>landbysskoler</u>, <u>etageskoler</u>, <u>aulaskoler</u>, hvor bærende elementer blokerer centralt kanaltræk.</p> <p>Mht. æstetik, se bemærkninger fra 'Naturlig automatisk' samt 'Mekanisk ud-sugning'.</p>
Hybrid, two-mode	<p>Er i stand til at sikre luftkvaliteten efter nugældende, såvel som efter fremtidige krav.</p> <p>Lavt varme- og elforbrug</p> <p>I nogle henseender kan et mindre og dermed billigere mekanisk anlæg klare opgaven. Det kan bringe etableringsomkostningerne på niveau med mekanisk ventilation.</p>	Højere serviceomkostninger og til dels også højere etableringsomkostninger.	<p>Egner sig bedst til skoler med få indre bærende vægge, f.eks. <u>kamskoler</u>, <u>åbenplanskoler</u> og <u>projektarbejdsskoler</u>, hvor det bærende system er præget af søjler og bjælker som ikke blokerer centralt kanaltræk.</p> <p>Sommerventilationen udnytter bedst åbne skoler med store fællesrum, f.eks. <u>aulaskoler</u> og <u>åbenplanskoler</u>.</p> <p>Forudsætter at højden til bjælker i korridoren er mindst 3,1 m og helst mere end 3,2 m for at give plads til kanaler.</p> <p>Afstanden mellem indtag- og afkaståbningerne bør ikke overstige 4x rumhøjden.</p> <p>Potentialet er stort og tiltalende og i fremtiden vil mange nye skoler anvende to ventilationsprincipper, som understøtter hinanden, komforten, indeklimaet og energiforbruget.</p> <p>Produktet er knapt markedsmodent fordi det kræver specialkompetencer indenfor både naturlig og mekanisk ventilation.</p> <p>Mht. æstetik, se bemærkninger fra 'Naturlig automatisk' samt 'Central mekanisk'.</p>

4 Evaluering

Fokuseres specifikt på ventilation i klasselokaler eller lignende undervisningslokaler er der forskellige kriterier som etableringen nødvendigvis skal opfylde for at overholde definitionen af 'velfungerende', afsnit 2.5. Flere af disse præmisser er formuleret i BR10.

4.1 Objektiv evaluering

Uafhængig og uvildig bedømmelse af et ventilationssystems egenskaber er ikke muligt. Egnetheden af et systemprincip vil altid afhænge af den konkrete situation og ydermere af hvem der ser på problemstillingen. Producent, rådgiver, entreprenør, arkitekt og servicemontør har

som regel kun indsigt i deres eget felt og har dermed deres foretrukne egenskaber.

Ventilationssystemet skal opfylde en række krav, som er fastsat i lovgivningen og i normer/standarder. Nogle krav, f.eks. vedligehold, er først blevet normsat med den reviderede udgave af DS447, men har alligevel betydning for det velfungerende design.

Nogle anlæg yder ud over det forventede mindsteniveau og disse fortjener at blive krediteret herfor

For at sikre en så uvildig individuel bedømmelse indføres en evalueringsgraduering af systemerne efter egenskaber og egnethed målt på forskellige parametre.

DET PRIMÆRE FORMÅL VED AT ETABLERE VENTILATION ER AT SIKRE EN GOD LUFTKVALITET

DET SEKUNDÆRE MÅL ER AT SIKRE DET TERMISKE INDEKLIMA
HOVEDPRÆMISSEN ER AT DET SKAL SKE MED SÅ LAV EN STIGNING I EL- OG VARMEFORBRUG SOM MULIGT

DEN SEKUNDÆRE PRÆMIS ER AT ETABLERINGS- OG SERVICE-OMKOSTNINGER SKAL VÆRE RIMELIGE, DET VISUELLE UDTRYK KAN ACCEPTERES, OG AT VENTILATIONSSTØJEN ER UBETYDELIG

4.2 Graduering

For at sikre en så uvildig individuel bedømmelse indføres et graderet evalueringskriterium afhængig af egenskaber og egnethed.

For at gøre gradueringen så transparent som mulig, indføres *ikke* en relativ graduering, som er proportionel med variabelens størrelse. Det ville f.eks. have den konsekvens, at anlæg som kan holde en bedre luftkvalitet med øget luftmængde ville opnå en god evaluering på et område, men omvendt en dårlig evaluering pga. øget energiforbrug.

Desuden vil en relativ graduering ikke tage højde for at nogle parametre vægtes anderledes end andre afhængig af hvem der ser på det.

Der gennemføres derfor en meget simpel graduering af ydeevnen

indenfor hver parameter med tre niveauer.

Overholder anlægget - på baggrund af rapportens analyser - ikke gældende lovkrav, performer anlægget uacceptabelt på den pågældende parameter.

Overholder parameteren gældende lovgivning, er anlægget acceptabelt.

Har anlægget en egenskab med en påvist ydeevne, som er *markant* bedre end det store gennemsnit – det vil f.eks. være tilfældet hvis anlægget allerede i dag opfylder fremtidige krav i lovgivningen – performer anlægget fremragende på denne variabel.

4.3 Evalueringsparametre

Evalueringen sker ud fra et antal parametre. Her beskrives/begrundes de enkelte parametre. Tabel 7 opsummerer.

- *Luftkvalitet*, målt som mængde CO₂, antages som parameter. Der er specifikke krav i BR10 på 1500 ppm (0,1 %) frem til 2020, derefter falder CO₂-niveauet til 900 ppm.
- *Temperaturen* betyder noget for komforten. Med hensyn til sommerkomfort vejleder DS 474 (1993) om maksimalt 100/25 timer over 26/27 °C i brugstiden, men da skoler kun sjældent anvendes til klasseundervisning i årets varmeste tid, er kravet upræcist. DS/EN 15251 (kategori II) angiver 20-24 °C om vinteren og 23-26 °C om sommeren. Det må formodes at skoler,

Tabel 7 Evalueringsparametre med tre graderingsniveauer.

	Uacceptabelt	Acceptabelt	Fremragende
Luftkvalitet, CO ₂	Over 1500 ppm	1000-1500 ppm	Under 1000 ppm
Temperatur	Jævnligt udenfor 20-26 °C	Indenfor 20-26 °C	20-23 °C
Køling vha. natventilation	-	Evt. mulighed for natventilation	Natventilation indbygget
Træk	Forekommer	Lav risiko	Forekommer ikke
Støj, teknisk (trafik)	Større end 30 (33) dB(A)	27-30 (30-33) dB(A)	Under 27 (30) dB(A)
Æstetik	-	(Meget) synlig	Integreret eller usynlig
Filtrering	-	Evt. mulighed for filter	Filterklasse F7
Specifikt elforbrug, SEL	Over 2100 J/m ²	1000-2100 J/m ²	Under 1000 J/m ²
Varmegenvinding	Mindre end 70 %	70-85 %	Højere end 85 %
Etablering	-	Central mekanisk ventilation	30 % billigere
Vedligehold	-	Central mekanisk ventilation	30 % billigere

idet de ikke er åbne en stor del af sommeren, kan overholde maks. 26 °C. Koncentrationsevnen er afhængig af lufttemperaturen og størst produktivitet fås omkring 20-23 °C. Om vinteren er det nærmere de lave tal og om sommeren (ekskl. sommerferien) er det nærmere det høje tal. Derfor er sidstnævnte temperaturspænd 'fremragende'. Er temperaturen ofte under 20 °C (for koldt) eller over 26 °C (for varmt), er det uacceptabelt.

- *Køling vha. natventilation* måles i 'muligheden for at natventilere'. I skoler er det ventilationsanlæggets primære opgave at sikre luftkvaliteten, ikke ventilere varmen bort. Dertil kræves større luftmængder end dem, der dimensioneres efter i dag,

eller det kræver installation af dyre køleanlæg. Varmen bør – i fremtiden med energirenoverede skoler, hvor overophedning et mere udtalt problem – fjernes med natventilation. Derfor er det vigtigt at måle der, hvor ventilationssystemet kan gøre en forskel på den termiske komfort. Med etablering af natventilation, som køler bygningens konstruktioner ned om natten, kan en køleeffekt på 20 W/m^2 tilvejebringes uden køleanlæg (Hviid & Petersen, 2012).

- *Træk* opstår som følge af kølig luft med høj hastighed. I et lokale er hovedårsagen til træk luftskiftet (hastighed) og indblæsningsformen (evnen til at kølig luft opblandes med rumluft). Da luftskiftet bør være ens for alle systemtyper, er indblæs-

ningsformen udslagsgivende for risikoen for træk. Bemærk at der næsten altid er en risiko for træk ved de konventionelle teknologier, men at ny teknologi som diffus loftsventilation hidtil ikke har givet anledning til konstaterede trækgener, se afsnit 11.7.3.

- *Støjniveauet* for klasselokaler er anbefalet i BR10 til 30 dB(A) fra ventilationsmekanikken og 33 dB(A) fra vejtrafik. 30 dB fra ventilationsmekanikken er muligt med passende lyddæmpning og dimensionering, men det må forventes, at åbne vinduer vil/kan medføre mere end 33 dB i klasselokaler fra vejtrafik eller gående trafik. Bemærk at ny teknologi, som nævnt i afsnit 11.7.7 kan reducere ekstern støj gennem vinduer. 'Fremra-



Figur 11 Synlige, ikke-integrerede ventilationsaggregater og -kanaler på taget af skole fra 1970'erne.

gende' er fastsat til 27 dB, fordi det svarer til en halvering af den oplevede støj, men generelt er baggrundsstøjen fra elever og lærere dog sjældent under 40 dB.

- *Æstetik* er vanskelig at kvantificere, men der kan knyttes nogle begreber til, som kan registreres ved en inspektion. Disse begreber er synlighed, integration og farver. Her måles æstetikken på hvorvidt ventilationssystemet er synligt, integreret på en knap synlig, pæn måde eller uintegreret. Figur 11 illustrerer som eksempel en uintegreret ventilationsløsning. Løsningen på Figur 12 er pænere, men dog stadig iøjnefaldende. Kapitel 7 viser flere eksempler på pæn og mindre pæn integration.



Figur 13 Synlige ventilationskanaler i børnehave.

- *Filtrering* er vigtig fordi udeluften ikke altid er renere end in- deluften. En del børn er plaget af høfeber som følge af pollen og af samme grund er pollenfiltre standard på mange kontor- anlæg i dag. Der er p.t. ikke krav til filtrering af klasselokale- ventilation. DS/EN 13779 (2007) angiver F9 filterklasse (DS 779, 2012) som 'high quality', men i skolesammenhænge an- ser forfatterne installation af et F7 filter ('moderate quality') eller derover som en *markant* forbedring i forhold til nugæl- dende virkelighed. Der er ikke krav til filtrering for naturlige ventilationssystemer.
- *Specifikt elforbrug (SEL)* er en betegnelse for ventilationsan- læggets effektivitet. Parameterens værdi er fastsat i BR10 til



Figur 12. Synligt decentral ventilationsinstallation delvist integreret som endnu en kasse i loftet.

2100 J/m³ frem til 2020, derefter falder den til 1500 J/m³, men der findes systemer i dag, som kan præstere mindre end 1000 J/m³. For udsugningsventilation er kravet i BR10 800 J/m³. Naturligt drevet ventilation vil have en 'uendeligt' høj effektivitet, dvs. en SEL-værdi på nul.

- *Varmegenvinding* forudsætter en varmeveksler, så afkastluftens varme kan overføres til indtagsluften. I BR10 er kravet for varmegenvinding mindst 70 % frem til 2020, derefter er det 75 %. I dag installeres mange steder varmegenvinding på 85 %, og det vil være normen i 2020. Der er ikke krav til varmegenvinding med naturlig ventilation. Disse evalueres derfor som acceptable.
- *Etableringsomkostningerne* er relativt nemme at fastsætte med udgangspunkt i forskellige kilder. Omkostningerne afhænger naturligvis af den enkelte skoles beskaffenhed og i den endelige anbefaling i kapitel 3, tages også udgangspunkt i skolens konstruktionsmæssige beskaffenhed. *Acceptable* etableringsomkostninger tager udgangspunkt i at centrale mekaniske anlæg installeres i næsten alle nyopførte skoler på grund af deres indeklimakvaliteter. Er ventilationssystemet mindst 30 % billigere at etablere, som tilfældet er for naturlig ventilation, evalueres det som godt. Etableringsomkostninger, som er højere, kan ikke accepteres.

- *Vedligehold* er vanskeligt at prissætte og måle. Prissætningen er et resultat af serviceegnhed, pladsforhold, komponentpriser, antal enheder og servicetimepris. *Acceptable* serviceomkostninger tager udgangspunkt i at centrale mekaniske anlæg installeres i næsten alle nyopførte skoler og at serviceprisen i disse tilfælde er alment kendt i branchen. Vurderes serviceomkostningerne at være mindst 30 % billigere, som tilfældet f.eks. er med naturlig ventilation, evalueres det som godt. Serviceomkostninger, som er højere, kan ikke accepteres

5 Ventilationsprincipper

Her beskrives kort de forskellige ventilationsprincipper, som er blevet undersøgt og vurderet i rapporten. De undersøgte systemer dækker efter forfatternes opfattelse op mod 95 % af de typer anlæg, som kan findes i skoler i dag.

- Central balanceret mekanisk ventilation
- Decentral balanceret mekanisk ventilation
- Udsugningsventilation
- Udsugningsventilation med indtag gennem varmeflade i facade
- Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk

VAV STÅR FOR VARIABLE-AIR-VOLUME I MODSÆTNING TIL CAV, CONSTANT-AIR-VOLUME

CAV-SYSTEM VENTILERER MED ÉN STØRRELSE LUFTMÆNGDE SOM OPFYLDER ALLE BEHOV TIL ALLE TIDER

VAV KAN LØBENDE REGULERE LUFTMÆNGDEN EFTER BEHOVETS STØRRELSE

KOMPLEKSITETEN VED VAV ER BETYDELIGT STØRRE OG SOM FØLGE HERAF OGSÅ INSTALLATIONSOMKOSTNINGERNE

ENERGIBESPARELSEN VED VAV ER GANSKE BETYDELIG. EN REDUKTION AF LUFTMÆNGDEN MED SAMLET SET 10%, VIL GIVE VAV DEN BEDSTE SAMLEDE ØKONOMI (HVENEGAARD, 2007)

- Naturlig tværv ventilation med automatisk vinduesopluk
- Hybrid ventilation i to former: ventilator-understøttet naturlig ventilation (mixed-mode) og mekanisk ventilation, som erstattes eller suppleres af naturlig ventilation om sommeren (two-mode)

5.1 Central balanceret mekanisk ventilation

Centrale systemer er karakteriseret ved at et centralt placeret aggregat med ventilatorer forcerer ventilationsluften gennem et netværk af kanaler. Et aggregat forsyner hele bygningen eller adskillige lokaler med luft.

Aggregatet er som regel med filtrering af luften, varmeveksling og VAV på klasselokalniveau, som styrer luftmængden efter behov. VAV-kontrollen styres af rumsensorer, som melder tilbage til ventilationsstyringen om temperatur og luftkvalitet (CO₂-niveau) i hvert rum og ud fra styringsalgoritmer reguleres luftmængden løbende. Ofte ses også en bevægelsesmelder tilføjet.

I centrale systemer reguleres indblæsningstemperaturen for at maksimere komforten. Det sker ved at justere varmebladens ventil. I perioder mellem sommer og vinter sker det ved at justere varmevekslens effektivitet. Om sommeren vil indblæsningstemperaturen være den samme som udetemperatur, dvs. mekanisk køling ses næsten aldrig.

Når kanalerne passerer en brandsektionsvæg, skal et selvkontrollerende brand- og røgspjæld indsættes. Der skal ydermere etableres røgspjæld mellem brandceller, men med etablering af varslingsanlæg kan de dog elimineres. Det afhænger af den enkelte skole, hvilket alternativ der er billigst, men for nogle kommuner kan alene besparelsen på forsikringspræmien betale et varslingsanlæg tilbage på 3-4 år (Interviewnoter, 2012).

Central balanceret ventilation kan udstyres med filtre i forskellige filterklasser, afhængig af hvor store partikler der ønskes fraserteret. F.eks. kan der være et filter, der eliminerer pollen- og dieselpartikler.



5.2 Decentralt balanceret mekanisk ventilation

Decentral ventilation benytter også forceret ventilation, som centrale systemer gør, men aggregatet ventilerer kun det lokale, det er monteret i. Dvs. der er ingen eller kun meget lidt kanalføring. Varmeveksling og filtrering sker på samme måde som centrale systemer og har stort set samme effektivitet. Luftsiftet styres af integrerede CO₂ og temperatursensorer.

Decentrale systemer gennembryder ikke brandcellevægge og de er derfor brandteknisk meget simple end centrale systemer.

Decentral balanceret ventilation kan udstyres med filtre i forskellige filterklasser.

Figur 14 Skolefløje med centralt balanceret ventilation med kanalerne ført på taget.



5.3 Mekanisk udsugningsventilation

Udsugningsventilation er forceret ventilation, hvor indtag typisk sker fra små åbninger i facaden, f.eks. friskluftventiler. Åbningerne er ikke tilstrækkeligt store til at sikre et naturligt luftskifte, men ventilatoren hjælper. Systemet er simpelt og billigt, men varmeforbrugende. Der er ingen varmeveksling og ingen styring. Styring kan dog indkobles med en CO₂ og temperatur-sensor i rummet, så rumventilatoren kun aktiveres, når behovet melder sig. På den måde nærmer princippet sig ventilator-understøttet naturlig ventilation.

Mellem brandsektioner skal der etableres brand- og røgspjæld.

Udsugningsventilation kan ikke udstyres med filtre.

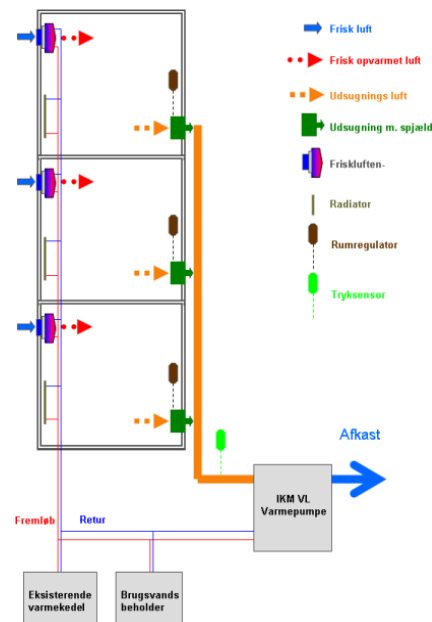
Figur 15 Decentrale ventilationsaggregater monteret i facaden. Kilde: www.Airmaster.dk



5.4 Mekanisk udsugningsventilation med forvarmning (evt. via varmepumpe)

I en variant af udsugningsventilation sker indtaget i facaden gennem varmeblæser (se Figur 18) eller bagved radiatorer, så indtagsluften varmes op og trækgener i princippet undgås. Varmeflader kan være kombineret med en ekstra ventilator.

Varmen til varmeblæseren kommer oftest direkte fra centralvarmesystemet, hvilket betyder at der ikke er varmegenvinding i systemet. Alternativt kan varmen også komme fra udsugningsluften, hvor varmen veksles over i centralvarmesystemet via en varmepumpe, se Figur 17. I dette tilfælde er der en form for varmegenvinding i systemet, men på bekostning af et elforbrug til varmepumpen, som i noget omfang



Figur 16 Decentralt ventilationsaggregat med stor kapacitet udformet som rumdel.

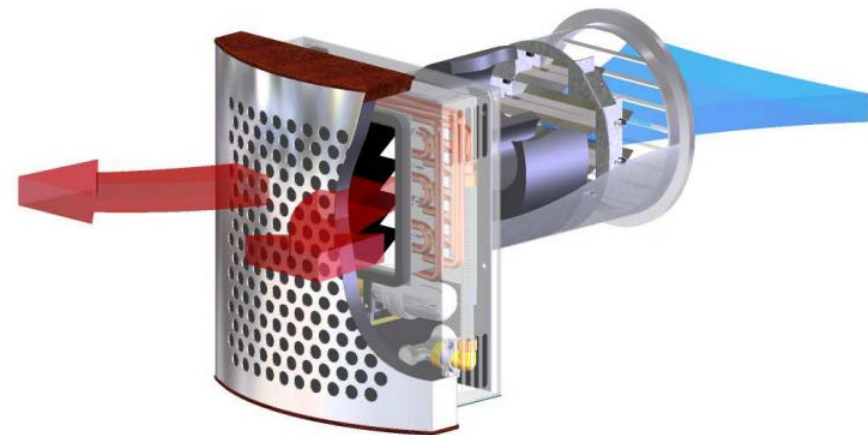
Kilde: www.Airmaster.dk

æder gevinsten ved varmegenvindingen. Overslagsmæssigt udgør elforbruget til varmepumpen 20 % af den genvundne varme når el og varme er sammenvejet som primærenergi.

Udsugningsventilation med forvarmning kan ikke udstyres med komfortfiltre.

5.5 Naturlig ventilation med manuelt opluk

I naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk er vinduerne som regel placeret i én facade og virkemåden betyder at indtag- og afkastluften skal igennem de samme åbninger. Ventilationsprincippet findes i et flertal af danske skoler (Masseeksperiment, 2009), men kan næppe klassificeres som et ventilationssystem. Effektiviteten afhænger helt af



Figur 17 Principskitse af udsugningsventilation med forvarmning i facaden via varmepumpe. Kilde: www.ikm.dk

brugernes forståelse af vigtigheden af at udlufte med jævne mellemrum.

Naturlig ventilation kan ikke udstyres med filtre.

5.6 Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk, kombineret tvær- og opdriftsventilation

Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk har i modsætning til udluftning med manuelt opluk potentialet til langt højere ventilationsrater. Åbningerne skal imidlertid placeres optimalt med åbninger i modstående facader eller tag, så luften strømmer på tværs af lokalet. Højdeforskellen mellem åbningerne giver et bidrag til drivtrykket, som dog er beskedent i klasselokaler. Til gengæld er styringen nemmere,



Figur 18 Varmeflade i facade til forvarmning ifm. udsugningsventilation. Kilde: www.ikm.dk

fordi strømmingen er ensrettet (næsten) uanset vindpåvirkningen, dvs. luftstrømmen går fra lavt placeret åbning mod højt placerede åbninger.

Vinduesopluk og *åbningsgrad* er styret af CO₂-koncentrationen og/eller temperaturen i lokalet. I kolde vintermåneder erstattes optimalt set den kontinuerlige udluftning med pulsventilation, dvs. kraftig udluftning i en kort periode, hvor trækgener kan accepteres, f.eks. i pauser. Pulsen skal dog stemme overens med placering af pausen, f.eks. via ringesystemet.

Andre former for naturlig ventilation behandles/beskrives ikke fordi de, med blik på BR10's luftkvalitetskrav, ikke har relevans.



Figur 19 Indtag med varmemflade i facade, NaVent model. Kilde: Airmaster.dk

Naturlig automatisk ventilation kan ikke udstyres med filtre.

5.7 Hybrid ventilation

Hybrid ventilation kombinerer fordelene ved mekanisk såvel som naturlig ventilation. Termen 'hybrid' dækker principielt over alle kombinationer, men anvendes i praksis i ventilationsindustrien kun om to former:

1. two-mode hybrid, dvs. et mekanisk balanceret ventilation i kombination med naturlig ventilation. Separat installation og separat drift

2. mixed-mode hybrid, dvs. ventilatorunderstøttet naturlig ventilation, d.s.s. udsugningsventilation kombineret med automatisk naturlig ventilation med styring

I førstnævnte er systemerne separerede med egne installationer og styringer og i overgangsperioder skiftes mere eller mindre intelligent fra ét ventilationssystem til et andet. På den måde opnås fordele fra begge systemer. Hvilket system, der kører hvornår, afhænger af balancen mellem fordele og ulemper. P.t. er et integreret markedsmodent styringsprodukt til two-mode hybrid løsninger kun i sin vorden, og systemintegrationen kræver stadig specialkompetencer eller specialistfirmaer.

Sidstnævnte er fuldt markedsmodent. Styringen er som regel relativt simpel med opluk af vinduerne som førsteprioritet. Kan luftkvaliteten (CO₂-niveauet) ikke fastholdes med vinduesopluk alene, f.eks. pga. manglende opdrift eller vindpåvirkning, starter udsugningsventilatoren.

Figur 20 Gennemføringer til varmekilder i facaden.



6 Skolebygningstypologier

I Danmark er der blevet bygget mange skoler i de sidste 150 år. Hver tidsperiode har sine egne karakteristika og mange skoler består af flere bygninger fra forskellige tidsperioder. Af hensyn til evalueringen af egnetheden af ventilationssystemer i forhold til indbygning og virkemåde, kategoriseres de danske skolebyggerier. Kategorien er ofte sammenhængende med tidsperioden, men den påhæftede tidsperiode er kun vejledende. På de følgende sider beskrives bygningskategorierne mere indgående. Plan og snittegninger er lagt i afsnit 6.7. Liste over skolebygningstyper i Danmark ses i Tabel 8.

Figur 21 Mixed-mode hybridventilation med indtag via topvinduer i facaden. Kilde: www.WindowMaster.dk

	Typisk periode	Antal etager	Facademateriale	Klasselokale størrelse	Klasselokale rumhøjde
Landsbyskolen	1720-1880	1	Mursten/puds	-	Op til 3 m
Etageskolen	1880-1930 og 1945-60	3-4	Røde mursten	48 m ²	3,7-4,2 m
Aulaskolen	1930-1945	2-3	Beton/gule mursten	48 m ²	2,9-3,3 m
Kamskolen	1960-1970	1	Beton/gule mursten	50-60 m ²	2,8-3,0 m
Åbenplanskolen	1970-1980	1-2	Forskellige materialer	Forskellige størrelser	2,5 m, etagehøjde 3,7 m
Projektarbejdsskolen	1990-2013	1-3	Forskellige materialer	Forskellige størrelser	2,8 m, etagehøjde 3,4 m

6.1 Landsbyskolen, 1720-1880

Landsbyskolen eller den fritliggende klassebygning, opstår som landsbyskoler, der udbygges og systematiseres i perioden 1721-27, hvor 241 såkaldte 'Rytterskoler' eller 'Kongelige Skoler' opføres i Danmark.

Skolerne blev placeret centralt i landsbyerne hvor ligeledes Kirken lå, og er med de centrale beliggenheder sidenhen udbygget med mere moderne bygningskategorier som bygningerne i dag fungerer sammen med.

Rytterskolerne blev nyopført som grundmurede bygninger, med samme grundplan. Facader er ofte i pudset og kalket teglsten, se Figur 3.

Den fritliggende bygning findes også i nyere skolebyggerier, hvor de fungerer som 'fagfløj' eller 'særlige bygningsafsnit' på moderne skoler, se Figur 2.

I de tilfælde afspejler byggeteknikken resten af skolen, som fagfløjen er opført i sammenhæng med.

Rytterskolernes oprindelige konstruktion er typisk meget tung, med ydervægge og indervægge af mursten. Den bærende del af konstruktionen vil ofte kun være ydervæggene.

Typisk har der i det store klasselokale været indrettet til bolig tidligere, men mange rytterskoler er renoverede og er i den forbindelse blevet omdannet til et ekstra klasselokale.

Ganløse Rytterskole, 1724, Ganløse



Borre Rytterskole, 1727, Borre



Brønshøj Rytterskole, 1721, Brønshøj



6.2 Etageskolen, 1880-1930

Fra 1880 begyndte skolebygninger at få betydelige ændringer i deres form. Fra landbyskolens 1-plans lokale, centraliseres undervisningen nu i større bygninger med flere etager. Disse skoler kaldes centralskoler eller etageskoler, og samlede elever fra et stort område.

Etageskoler blev typisk lavet af massive ydervægge i røde mursten. I bygningerne er der en central indgang og brede trapper, der fører til de øvre etager. Etagerne er modulære og alle klasselokaler ligger langs en korridor. Ofte er lokalet udstyret med et lille podium til læren.

Udendørs områder er ofte dækket med asfalt med plads til cykler og sportsaktiviteter. I denne periode var der behov for at udnytte pladsen

så effektivt som muligt. Variationer er i hovedreglen bestemt af byggeår.

Etageskolernes konstruktion er typisk en meget tung konstruktion, med både ydervægge og indervægge opbygget af mursten og er begge en del af den bærende konstruktion. Ydervæggene vil typisk være fuldmurede murstensvægge.

Katedralskolen, 1889, Aalborg.



Jespersens Gymnasieskole, 1894, KBH Ø.



Nyboder, 1918-1920, KBH K.



6.3 Aulaskolen, 1930-1945

Mest karakteristisk ved skolekategorien er den centrale aula, nærmest et atrium, som får en fremtrædende plads i den nye skolearkitektur: funktionalisme. Den symboliserer modernisternes bevægelse mod lys, luft, sundhed og samspil med naturen. Den udtrykte også et socialpolitisk budskab om, at børn skal have lige adgang til uddannelse, uanset deres baggrund.

Andre karakteristika er de store vinduer i hvert klasseværelse, en klar opdeling i skolernes faciliteter og lyse farver på facaden.

Aulaskolen er som etageskolen typisk opbygget i mursten. Indervægge og ydervægge er en del af den bærende konstruktion. Hulmure,

det vil sige adskilte for- og bagmur med luft imellem, begynder at vinde frem. Efter datidens byggeteknik var luftlaget isolerende til forskel for de eksisterende skolers fuldmurede vægge.

Katrinedal skole, 1935, Vanløse.



Skolen ved Sundet, 1938, Amager.



Husum skole, 1928-31, Brønshøj.



6.4 Kamskolen, 1945-1970

Skoler fra 1960'erne betegnes kamskoler, fordi deres helt særlige form opdeler skolen i en masse grene eller forgreninger i lighed med en kam. Bygningerne er i et plan og som regel med fladt tag. Den fagopdelte organisering af undervisningen reflekteres i den stramt sektionerede bygningsmasse, hvor forskellige dele af skolen tildeles forskellige funktioner, såsom faglokaler, laboratorier, undervisningslokaler mv.

Typisk vil faglokaler være placeret i en 'hovedbygning', hvorfra klasselokaler i grene udstikker fra.

Kamskolens ydervægge er typisk opbygget af en bagmur af let beton eller letklinkerblokke, en formur af mursten og 5 cm isolering imellem.

Indervægge vil typisk være opbygget af mursten, men er ikke en del af den bærende konstruktion.

Munkegårdsskolen, 1947-58, Gentofte.



Nyager skole, 1962-64, Rødovre.



LO-skolen, 1969, Helsingør.



6.5 Åbenplanskole eller Fynsplan skole, 1970-1980

Undervisningspædagogikken er i disse år fokuseret på elevernes læringsproces og inddragelse af de studerende i projektorienteret undervisning. Socialisering er lige så vigtig som viden og indsigt.

Åbenplanskoler tager nogle karakteristika fra kamskoler som f.eks. et-plans formen og beton som vigtigste materiale. Imidlertid bliver rummene tilrettelagt på en måde, så alle studerende har plads til at møde hinanden, socialisere eller have gruppearbejder.

Disse skolebygninger udgør ca. 1/3 af den samlede skolebygningsbestand (www.skolebygger.dk)

Eksempler på nyopførte skoler mellem 1980 og 1990 er meget få på grund af faldende elevtal. I stedet blev der foretaget betydelige forbedringer og moderniseringer af eksisterende skoler.

Åbenplanskolens konstruktion er typisk opbygget af sandwichelementer, eller som kamskolen med formur af mursten, bagmur af letbeton med isolering imellem. Indervægge vil være en kombination af bærende og ikke bærende vægge. Indervæggene kan typisk være opbygget af mursten, i nogle tilfælde med isolering.

Frederiksberg skole, 1971, Sorø.



Kvaglundskolen, 1973, Esbjerg.



HTGymnasium, 1979-81, Høje Tåstrup.



6.6 Projektarbejdsskolen, 1990-2012

I den sidste generation af skoler er børnene i centrum af skolen. Børns og læreres position er ens, og dermed er de fælles steder designet under lige hensyntagen til behovene hos brugerne.

Arkitekter sammen med elever, forældre, lærere og pædagoger kan komme med idéer på skolernes design og krav. Arkitektoniske kendetegn er store vinduer samt højloftede rum og store udendørs arealer. Formen af bygningen kan være meget forskellig fra bygning til bygning.

Projektarbejdsskolens konstruktion kan variere meget i og med der sjældent er to der er ens. Projektarbejdsskolens bærende system vil typisk være et søjle/pladesystem, hvor søjlerne er det bærende ele-

ment for etagedækkene. Derudover vil der typisk være en betonkerne, med elevator og trappeskakter til at optage vindlaster. Derudover vil projektarbejdsskolen typisk have en ikke-bærende facade med en form for facadebeklædning, som kan være med til at skabe forskellige udtryk for de respektive skoler.

Hellerup skole, 2002, Hellerup.



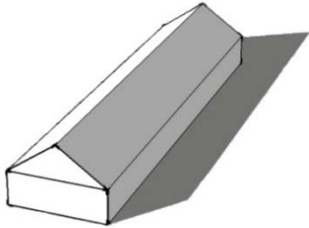

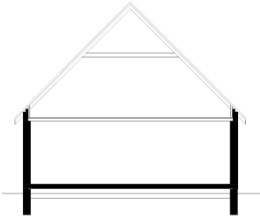

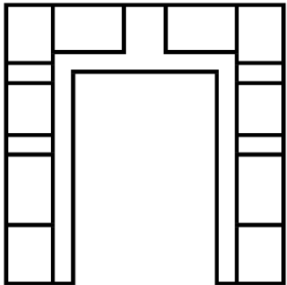
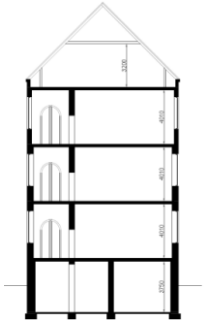
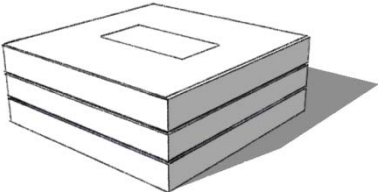
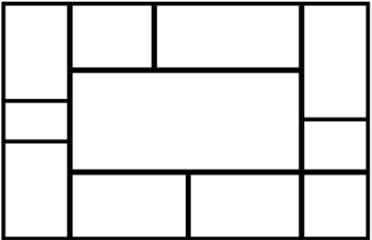
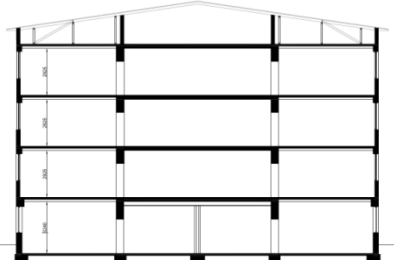
Søgårdsskolen, 2007, Gentofte.



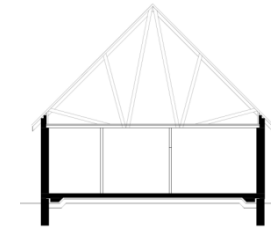
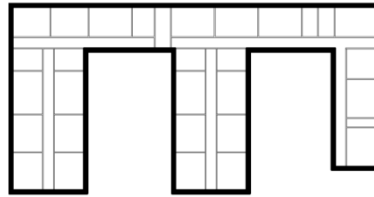
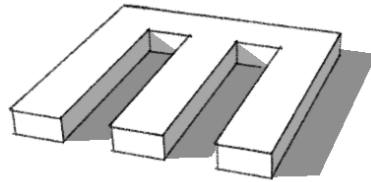
Ørestad Gymnasium, 2008, Amager.



6.7 Opsummering

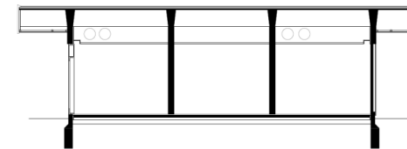
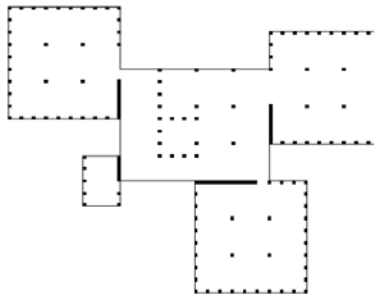
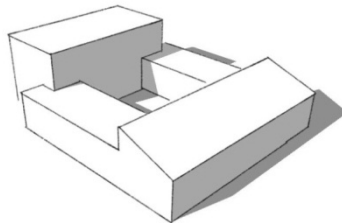
	3D-model	Plantegning	Snittegning	Konstruktionsprincip
Landsbyskolen				<ul style="list-style-type: none">• Bærende ydervægge• Fuldmurede yder- og indervægge
Etageskolen				<ul style="list-style-type: none">• Bærende yder- og indervægge• Fuldmurede vægge yder- og indervægge
Aulaskolen				<ul style="list-style-type: none">• Bærende yder- og indervægge• Hulmure, frem for fuldmurede vægge, vinder frem

Kamskolen



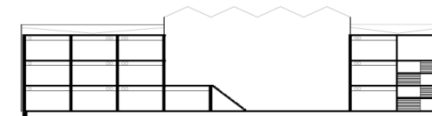
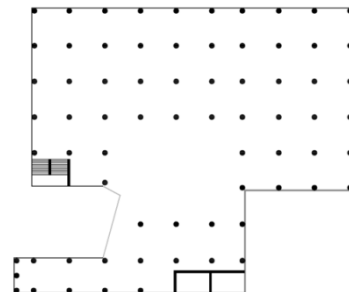
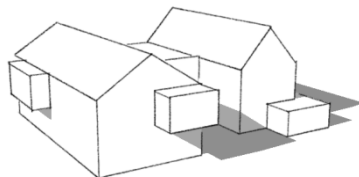
- Bærende ydervægge
- Formur i mursten, bagmur i mursten eller letbeton og ca. 50mm isolering.

Åbenplanskolen



- Bærende ydervægge, samt enkelte indervægge
- Sandwichelement eller som Kamskolen

Projektarbejds-
skolen



- Sjældent to ens skoler, derfor er konstruktionen varierende.
- Typisk søjle/ pladesystem
- Søjler og skakte er bærende.

7 Æstetik

Ventilationssystemers æstetik er kategoriseret som den arkitektoniske kvalitet samt brugernes oplevelse af ventilationssystemet. Derfor er det valgt, at graduere æstetikken så 'meget synlig' er *acceptabelt* og 'integreret/usynlig' er *fremragende*. Der er ingen uacceptable (d.s.s. ulovlige) æstetiske løsninger.

I forhold til de muligheder for den arkitektoniske indpasning der er, afspejler de forskellige ventilationsløsninger generelt de bygningsmæssige forudsætninger - opførelsesår, byggeteknik og detaljering - men med store forskelle i den konsekvens, hvormed udgangspunktet er fulgt op - og dermed med store forskelle i ventilationsløsningernes



Tabel 8 Karakteristika ved skoler fra forskellige perioder

arkitektoniske kvalitet.

7.1 Synlige installationers æstetik

Når der vælges synlige installationer skal disse i særlig grad detaljeres velovervejnet i forhold til drift (rengøring) og æstetik. I forhold til detaljen skal designet have et velovervejnet koncept for udførelsen, både i interiør og udvendigt.

I bevaringsværdige bygninger kan en 'ærlig' og synlig installation i nogle tilfælde foretrækkes frem for en løsning, hvor ventilationssystemet sammentænkes integreret i kompletterende bygningsdele. Samlet set efterlader det et større aftryk i den bevaringsværdige helhed.



Figur 22 Eksteriør. Ventilations-'container' på fladt tag.

Men i forhold til skoler, hvor loftshøjden er 'rigelig' og de akustiske krav til lydabsorberende overflader store, er det oplagt at sammen-tænke løsninger for ventilation.

Udvendigt er det en stor kunst at placere ventiler, ventilationshuse og skorstene synligt, og desværre er der flere eksempler på løsninger, som er udført uden skelen til æstetik, end løsninger med fokus på indpasning.

En rigtigt placeret skorsten som matcher bygningens proportioner, modul og i en stilfærdig udformning er i orden, ligesom et minimeret taghus, som er placeret med omtanke ikke behøver at skæmme bygningen meget.



7.2 Integrerede installationers æstetik

Byggerier, som er opført med tilstrækkelige rummeligheder til at inkludere evt. skjulte føringsveje for mekanisk ventilation – over lofter og via eksisterende lodrette ventilationskorstene (evt. med supplement af nye skakte) - har ofte mulighed for at opfylde et ønske om skjulte installationer.

Etablering af nye skakte i klasserum skal ske med særlig omtanke, idet større frie gulvarealer understøtter klasser med flere elever, og ligeledes understøtter indretninger for forskellige undervisningsmiljøer og læringsstile. Som udgangspunkt bør det prioriteres at placere skakte i depot- eller birum eller i gangarealer og fordelingsområder, hvor skakten kan bruges til at skabe opholdsniche/rum i rummet.

Figur 23 Interiør. Synlige ventilationsarmaturer i klasselokale.

7.3 Usynlige installationers æstetik

Som udgangspunkt består 'usynlige' ventilationssystemer af oplukkkelige partier i facader (vinduer eller spjæld), som er sammentænkt med skolens facadeudtryk. I denne sammenhæng vil skoler med store rumvoluminer have bedre forudsætninger for at fungere med naturlig ventilation end de mere 'knappe' byggerier med lavt til loftet - idet der efter udluftningen i pausen fysisk er mere luft tilstede.

Skoler med de store rum har ofte en egen æstetik af lys, luft og rummelighed, som den usynlige ventilationsfunktion understøtter og som klart kommer til udtryk i aulaskolerne.

De usynlige installationssystemer kan suppleres med automatik, hvorved der ikke stilles de store krav til at huske 'at lufte ud'. Den auto-

matiske løsning er oplagt til højtplacerede vinduer (overpartier) og ventiler, som ellers er vanskelige at nå og betjene – og hvor den mekaniske løsning ofte kan indbygges usynligt. Endvidere vil de højtplacerede løsninger ikke være i vejen for spontan udluftning via de nederste vinduer, redningsåbninger mm.

Med udgangspunkt i de givne bygningskategorier opstår der forskellige 'trends' i forhold til valg af ventilationssystemer, se Tabel 9 hvor der ligeledes er bemærkninger til opmærksomhedspunkter til de enkelte typer.



Figur 24 Bavneshøj Skole er opført i 1930 med stadsarkitekt Poul Holsøe som arkitekt. Den nyklassicistiske skole er opført med en regelmæssig, taktfast facade, hvor de markante ventilationskorstene understreger bygningens lodrette linier.



Figur 25 Eksteriør. Facadegenemførelse med stålrister i samme nuance som omgivelserne.

Tabel 9 Skema over ventilationssystemernes komplettering i eksisterende bygningstyper. Med grønt er markeret ofte anvendte systemer ift. typologi.

	Central mekanisk	Decentral mekanisk	Mekanisk udsugning	Mekanisk udsug., forvarmn.	Naturlig manuel	Naturlig automatisk	Mixed-mode hybrid	Two-mode hybrid
Landsbyskolen	Sjældent brugt	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Ofte anvendt	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig
Etageskolen	Ofte anvendt	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Sjældent
Aulaskolen	Ofte anvendt	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig
Kamskolen	Anvendelig	Anvendelig	Ofte anvendt	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig
Åbenplanskolen	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Ofte anvendt	Anvendelig	Ofte anvendt
Projektarb.skolen	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Anvendelig	Ofte anvendt	Anvendelig	Ofte anvendt
Generelle bemærkninger i forhold til indpasning i arkitektur.	Design på ventilationsskorstene sammentænkes med arkitektur. Valg af design og farve på armaturer, rør og ventiler kan understøtte integration, men kan også have kvaliteter som 'ærlig' synlig installation.	Placering af synlige riste i facader skal ske med omtanke i forhold til facadearkitektur. Reduceret areal for lydabsorberende materiale kan kompenseres ved vægabsorbenter. Design på ventilationsaggregat overvejes for sammenhæng med helhed.	Design og placering af ventilationskorstene samt indvendige riste og kanalføringer skal sammenlægges med arkitektonisk udtryk.	Hvor lokaler opvarmes med flere radiatorer, kan ventilationsunit evt. erstatte en radiator. Design og placering på ventiler i facader skal være velovervejet.	Der skal indarbejdes hensigtsmæssige 'diskrete' løsninger for børnesikring. Vinduer/spjæld skal udformes så vejrlig ikke forringer funktionen.	Løsninger må ikke reducere mulighed for at benytte vinduer som redningsåbninger. Design på motoropluk skal passe til vinduer for god æstetisk helhed. Vinduer/spjæld skal udformes så vejrlig ikke forringer funktionen.	Se bemærkninger fra 'Naturlig automatisk' samt 'Mekanisk udsugning'.	Se bemærkninger fra 'Naturlig automatisk' samt 'central mekanisk'.

Når der træffes valg om etablering af et ventilationsanlæg må det diskuteres, om ventilationssystemets 'usynlighed' altid er den bedste løsning – eller om det på samme måde som læringsrummenes øvrige undervisningsmæssige og trivselsmæssige applikationer, som anlæg for belysning, IKT / smartboard/opbevaring for læringsmaterialer, kan gives et design der gør tilstedeværelsen af ventilationsanlæggene i orden?

Dette synspunkt kan måske ses som relevant i de skoler, der fungerer som integreret institution (Skole hvor der i samme lokaler praktiseres skole og SFO). Her er der som konsekvens af lovgivning krav om større ventilation i SFO områder, hvilket i nogle tilfælde kan opfyldes med hybridløsninger, enten lokalt med to typer ventilation, eller på skolen



Figur 27 Eksteriør. Synlig, uinddækket ventilationsinstallation, Roskilde Universitets Center.

som helhed, hvor nogle lokaliteter (typisk i indskolingsafsnit) etableres med særlig SFO ventilation.

Ventilationsløsningerne kan i forhold til æstetisk udtryk tematiseres i følgende 5 vurderingsområder:

- Den oprindelige ventilationsløsning, og arkitektur
- Den aktuelle ventilationsløsningens visuelle betydning for eksteriør
- Den aktuelle ventilationsløsningens visuelle betydning for interiør
- Den aktuelle ventilationsløsningens visuelle betydning for detalje
- Den aktuelle ventilationsløsningens design.



Figur 26 Interiør. Sort varmeplade (kasse) på bagvæg med synlig tilførsel af varmerør. Ovenlyset kunne med fordel have været anvendt til naturlig ventilation med kombineret opdrift- og tværv ventilation.

I forhold til de enkelte ventilationstyper – central, decentral, mekanisk og naturlig ventilation - giver løsningerne variationer i forhold til den æstetiske grammatik, der repræsenteres i løsningerne.

I de undersøgte skoler er følgende eksempler registreret, og vil med nedennævnte referencebilleder kunne sammenfattes på følgende måde:

7.3.1 De anvendte ventilationsløsningers visuelle betydning for eksteriør

Nogle tekniske løsninger er placeret uafskærmet på taget, og kunne æstetisk forbedres ved at blive samlet i et element, som var designet til bygningens oprindelige arkitektoniske grammatik.



Figur 28 Eksteriør. Synlig, inddækket ventilationsinstallation, Roskilde Universitets Center.

Andre løsninger er indrettet inden for bygningens overordnede skal, og er placeret med særlige teknikrum i kælder eller depotrum. Men selv når teknikrum er placeret inden for bygningen afslører ventiler og skorstene, at en ny funktion er til stede.

7.3.2 Den valgte ventilationsløsningens visuelle betydning for interiør

Nogle løsninger er velintegrerede, med føringsveje over nedhængte lofter, og med armaturer placeret modulært i forhold til lofter.

Andre løsninger er synlige og detaljeret som selvstændige elementer i sin egen æstetik.

7.3.3 Den valgte ventilationsløsnings visuelle betydning for detalje

Nogle løsninger fremtræder som egne designelementer – maskiner designet i et formsprog som i højere grad profilerer ventilationsaggregatets fabrikat end skolens æstetiske helhed.

Disse kan indgå totalt integreret i lokalernes arkitektur og ikke synlige, mens andre er meget synlige.

7.3.4 Den valgte ventilationsløsnings design

De runde armaturer giver mulighed for genkendeligt princip ved forskellige størrelser, da de alle kan holdes inden for bygningens ofte modulære net, som lofterne tegner.

Samlet set viser de undersøgte løsninger, at det er muligt at forholde sig æstetisk bevidst til løsningernes design, og at udviklingen af muligheder for ventilation giver mange metoder til at opfylde de lovmæssige krav til ventilation i skoler.

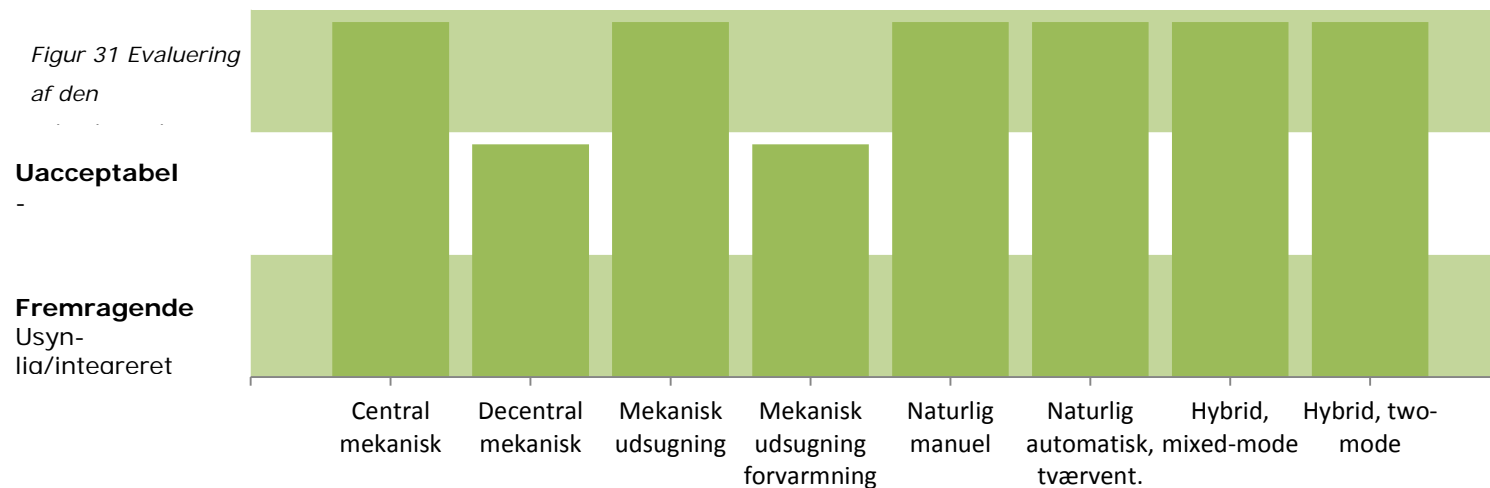


Figur 29 Nye taghætter, som bryder den store tagflade og facadegennemføringer, som bryder ind i murens mønster afslører at nye funktioner er til stede.

7.4 Evaluering af æstetik

Ventilationssystemers æstetik er kategoriseret som den arkitektoniske kvalitet samt brugernes oplevelse af ventilationssystemet, hvilket relaterer de forskellige ventilationsanlægs fremtoning i lokalerne, de ventilerer. Ventilationsanlæggenes æstetik er således relateret til anlæggenes typer, hvorfor alle analyserede ventilationsanlæg vurderes efter den typiske fremtoning som synlig, integreret og usynlig.

Figur 31 Interiør. Selvstændige, synlige ventilationsaggregater med deres egen detaljerede æstetik.



8 Indeklimamålinger

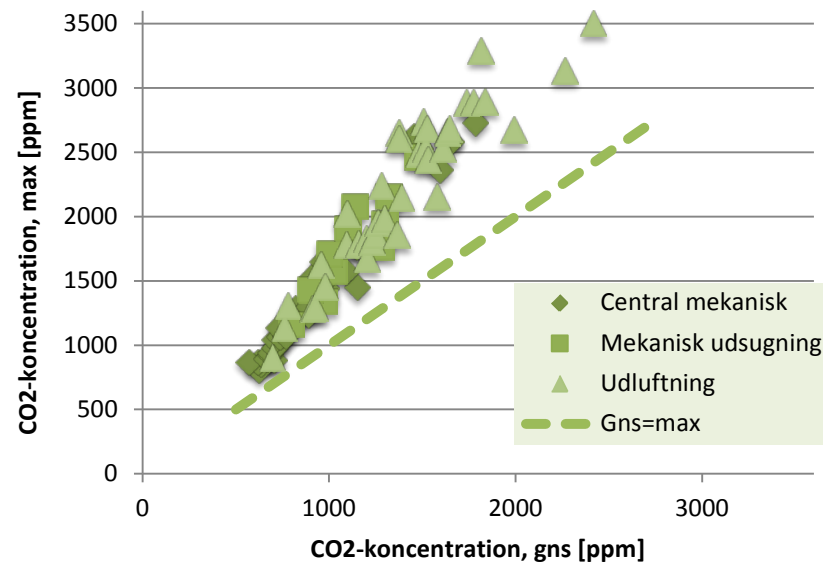
Ventilationen har betydning for indeklimaet, både luftkvalitet og temperaturer. På 85 skoler med forskellige ventilationsløsninger har DTU International Centre for Indoor Environment and Energy foretaget indeklimamålinger. I udvalgte klasselokaler på 5. klassetrin er der logget CO₂-niveau og temperatur ca. hvert 5. minut. CO₂-niveauet anvendes som indikator for luftkvalitet, fordi det er forbundet med menneskelig aktivitet. Resultaterne er præsenteret i afsnit 8.1, side 59.

CO₂ er *ikke i sig selv* en forurening. Der er mange andre forureningsfaktorer, som har indflydelse på luftkvaliteten, f.eks. bioeffluenter,

støv, materialeemissioner og partikler fra trafikken. Det reelle luftskifte (ventilationsrate) er derimod et mål for luftkvaliteten og for forureningseksposeringen i klasselokalet og kan tilnærmet beregnes ud fra CO₂-spidskoncentrationen, når antallet af elever i klassen kendes. I afsnit 8.2, side 61 er ventilationsraten præsenteret.

Måleperioden strækker sig samlet set fra d. 27. oktober 2009 til 16. december 2009 og hver skole er typisk blevet logget i 8-13 dage. Skolerne er anonymiserede, men skolenavn og lokalenummer er forfatterne bekendte.

Målingerne anvendes til at evaluere, ikke den forventede, men den reelle performance for forskellige ventilationsprincipper i klasselokaler. Målingerne er udført på skoler opført eller renoveret i perioden 1876 –



Acceptabel
Meget synlig

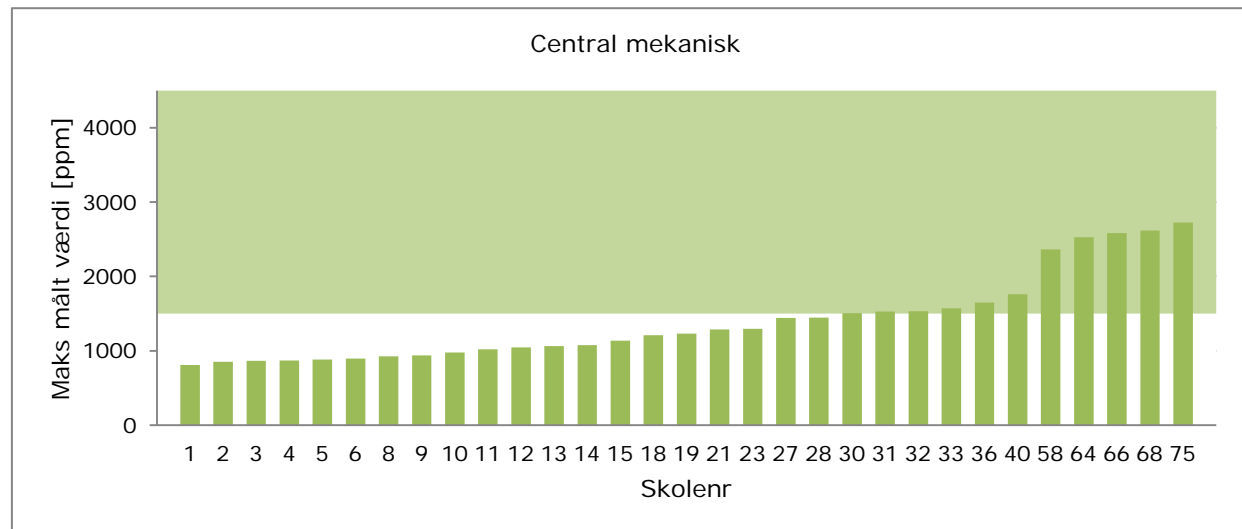
2009, og repræsenterer derfor ikke nye anlæg projekteret efter de nyeste normer. Data repræsenterer derimod praksis og bidrager med evidens til den endelige anbefaling.

Der er ikke udført målinger for alle de beskrevne ventilationsprincipper fra kapitel 5 – for naturlig ventilation med automatisk opluk er der kun udført målinger på én skole – og der suppleres derfor også med andre kilder. Disse fremgår af afsnit 8.4.

De 85 skoler er fordelt som følger:

- 31 med central mekanisk balanceret ventilation
- 11 med mekanisk udsugning
- 42 med manuelt styret naturlig ventilation

Figur 32 Punkterne ligger omtrent på linie for alle ventilationsprincipper, og over den stiplede linie. Sidstnævnte indikerer at CO₂-niveauet fluktuerer, men af samme størrelsesorden for alle tre principper. Dvs.



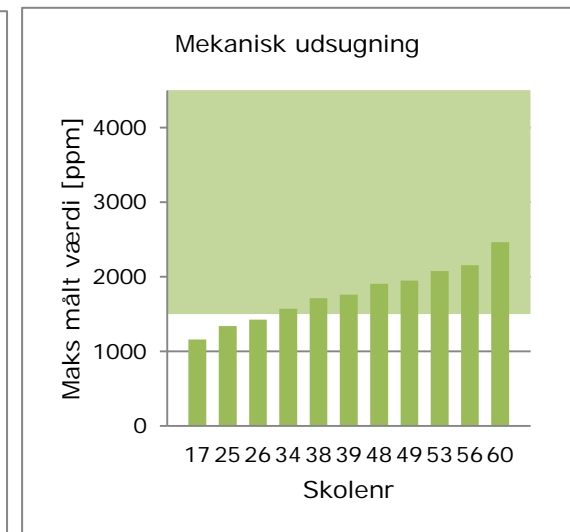
- 1 med automatisk styret naturlig opdrifts/tværventilation

8.1 CO₂-koncentration

Der er beregnet en gennemsnits- og en maks.-værdi hver dag for CO₂-niveauet i spidsbelastningsintervallet, som er kl. 8-14 mandag til fredag for hvert klasselokale. Af de beregnede tal er medianen for alle dage af hhv. gennemsnits- og maks.-værdien fundet. Median er mere robust overfor udsving i tallene end gennemsnit og viser i dette tilfælde en mere reel midlet værdi.

I lokaler med mekanisk ventilation forventes generelt at CO₂-niveauet stiger til ca. 1000-1500 ppm når skoledagen begynder og forbliver på

Figur 33 CO₂-niveau for central mekanisk ventilerede skolelokaler. Bygningsreglementets grænseværdi på maks. 1500 ppm er markeret. 22 klasselokaler opfylder kravet ved at være



dette niveau indtil skoledagens afslutning. Gennemsnitsværdi og maks.-værdi forventes dermed at være næsten lig hinanden.

I naturligt ventilerede skoler forventes et mere broget mønster, fordi vinduerne åbnes og lukkes kontinuertligt, og det skaber fluktuationer i CO₂-niveauet. I dette tilfælde vil gennemsnitsværdien være noget lavere end den maksimale værdi.

Ud fra virkemåden af naturlig ventilation ville det være naturligt at rapportere gennemsnitsværdierne fremfor maks.-værdierne, men 1) gennemsnitsværdien og maks.-værdien er reelt ens (se Figur 32) og 2) BR10 tilsiger at overskridelse af 1500 ppm ikke må ske i længere perioder i løbet af en skoledag. At gennemsnitsværdier og maks.-værdier reelt er ens indikerer få fluktuationer og at vinduerne dermed

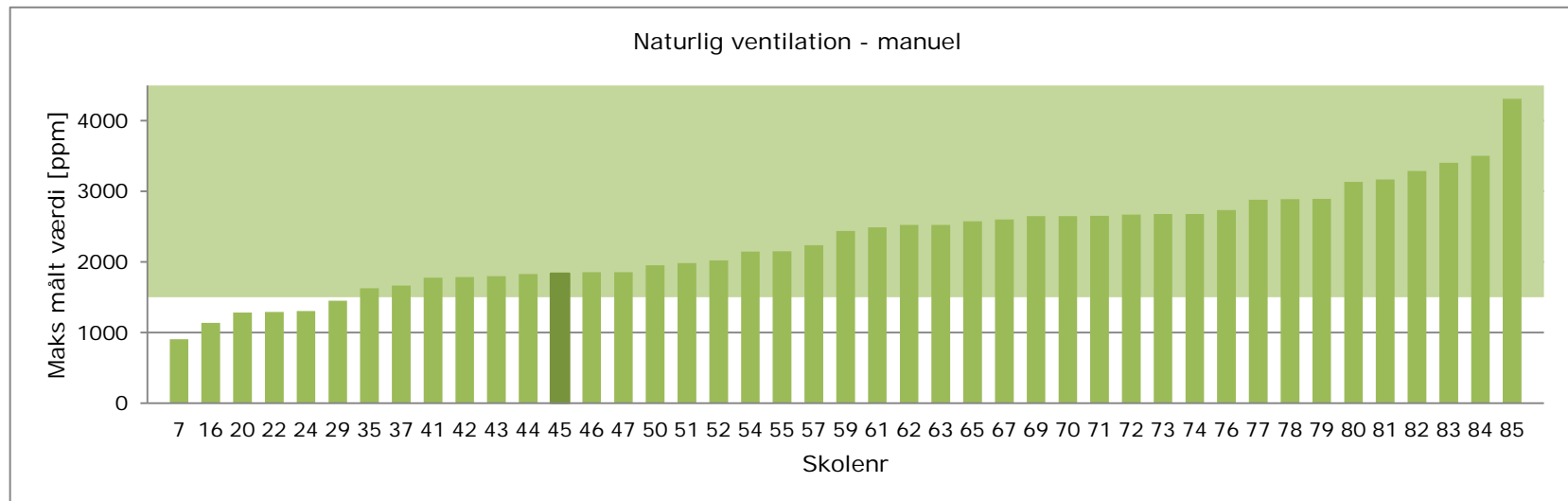
kun sjældent åbnes. Ergo rapporteres kun den maksimale median-værdi forekommende CO₂-koncentration i figurene.

I alle 85 skoler falder CO₂-niveauet tilbage til udeniveauet efter skoledagens afslutning. Det er tegn på at det pågældende lokale ikke anvendes til aftenskole eller SFO.

Indledningsvist rangordnes skolerne efter dataene for CO₂ målingerne. På Figur 33-Figur 35 ses fordelingen af maks.-værdierne for CO₂, der ligger henholdsvis under og over bygningsreglementets grænse på 1500 ppm for de forskellige typer ventilationsanlæg.

Figur 33 viser en fordeling af skolelokaler med målinger over og under grænsen (77 %) for centralt mekanisk ventilation. For mekanisk ud-

Figur 34 CO₂-niveau for central mekanisk udsugede skolelokaler. Bygningsreglementets grænse på 1500 ppm er markeret. Tre skolelokaler opfylder dette krav.



sugning, Figur 34, er 27 % af datamålinger under bygningsreglementets grænse. Tilsvarende problemer ses for manuel naturlig ventilation, Figur 35, hvor kun 14 % er målt inden for bygningsreglementets krav.

8.2 Luftkvalitet

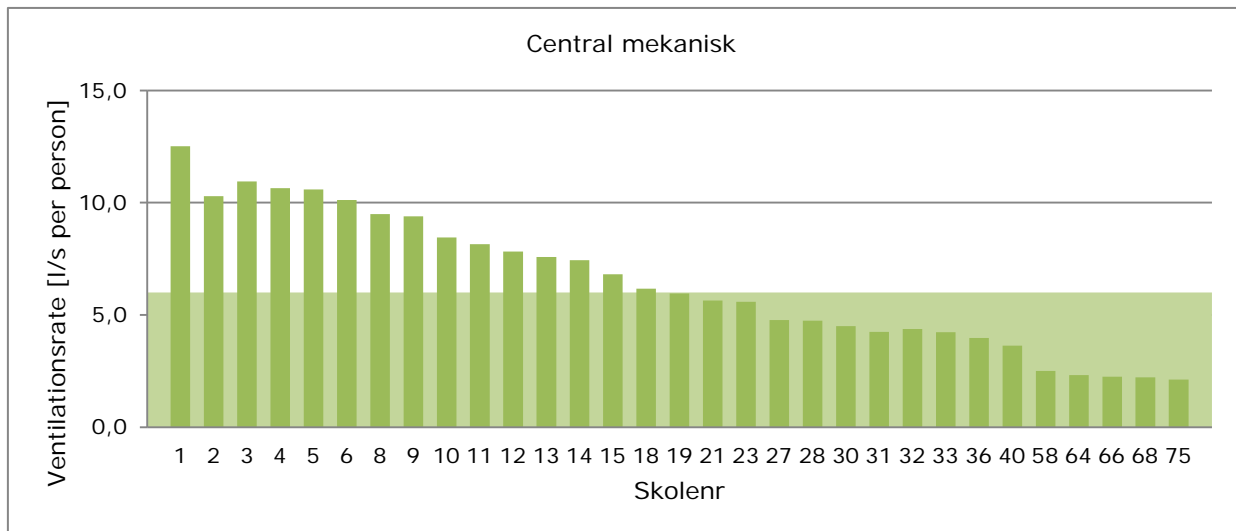
Indeluftens CO₂-indhold kan omregnes til ventilationsrate. Ventilationsraten er et mål for fortyndingen af forureninger i klasselokalet. Ventilationsraten er beregnet ud fra de målte CO₂-niveauer for hvert klasselokale, da der er en direkte sammenhæng mellem CO₂-niveau, personbelastning og ventilationsrate. Den påkrævede minimum ventilationsrate ifølge BR10 og forventet bygningsreglement i 2015 er 5 l/s pr. pers. + 0,35 l/s pr. m², som beskrevet i Tabel 1. Omregnet giver

det 6,0 l/s pr. pers. i en normalklasse med 21 elever og 1 lærer. Denne grænseværdi markerer den acceptable forureningseksposering i et klasselokale.

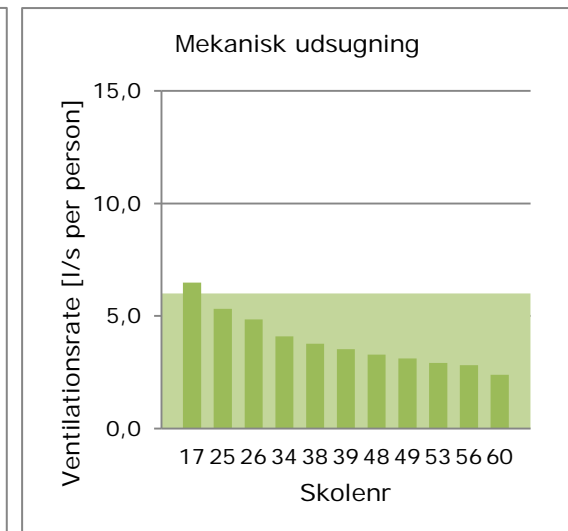
Det målte CO₂-niveau er korrigeret for CO₂-niveauet udendørs og antal personer i lokalet. Det udendørs CO₂-niveau er fundet ved at finde den mindste målte værdi i lokalet over hele perioden. Det er herunder antaget, at den kun kan ligge mellem 380 ppm og 420 ppm. Falder mindsteværdien uden for dette interval, er grænseværdierne benyttet.

Der er brugt samme CO₂-emissionsniveau for børn som voksne, da børns højere aktivitetsniveau gør, at de emitterer tilsvarende CO₂ som voksne. Den gennemsnitlige emissionsrate for CO₂ er 17 l/h pr. pers.

Figur 35 CO₂ niveau for naturligt ventilerede skolelokaler. Grænseværdien på 1500 ppm er markeret. Seks skolelokaler overholder grænseværdien. Den markerede måling, skole 45, er fra en skole med naturlig ventilation



Figur 36 Ventilationsrater for central mekanisk ventilerede klasselokaler. Grænseværdien på 6,0



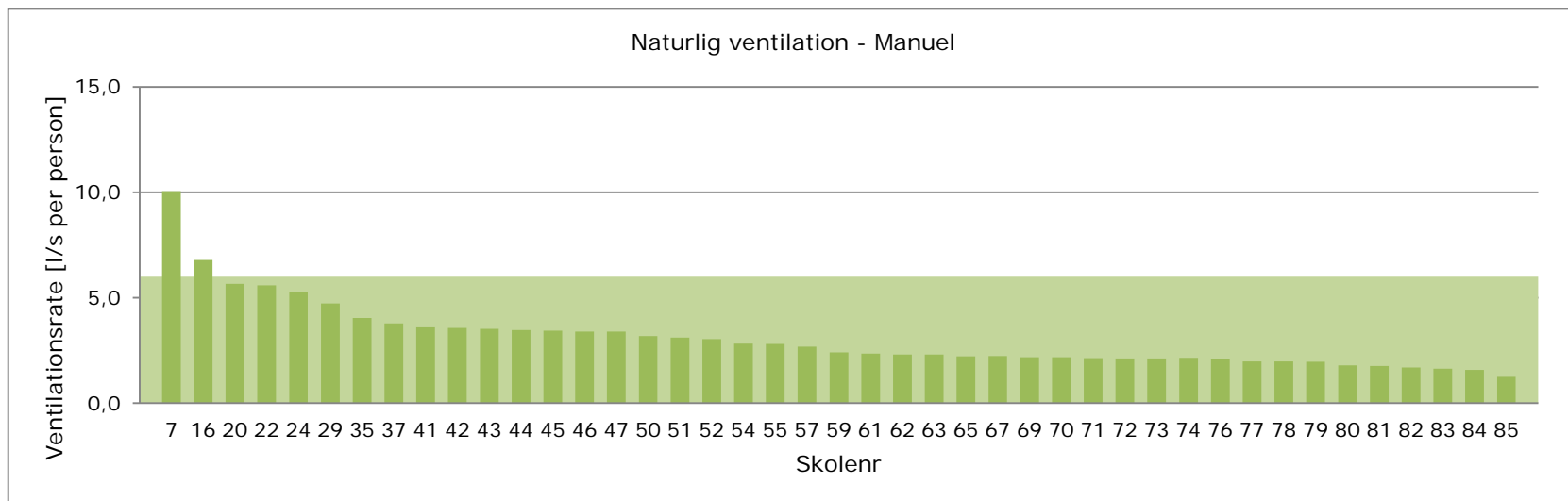
I Figur 36-Figur 38 vises ventilationsraten for de forskellige typer ventilationsanlæg. Mindstekravet på 6,0 l/s pr. pers. er markeret i figurerne som bygningsreglementets mindstekrav.

På Figur 36-Figur 38 ses at færre klasselokaler har en acceptabel ventilationsrate, i modsætning til CO₂-niveau. Årsagen er at kravet til minimum ventilationsrate er strengere end kravet til CO₂-niveau, jf. Figur 8.

Det fremgår af Figur 42 at kun nyere mekaniske ventilationsanlæg i praksis er i stand til at opfylde BR10-kravene, men også at mange, især lidt ældre, anlæg ikke giver den luftmængde, som forventes i BR10. Der er kun et datapunkt for naturlig automatisk ventilation, og der kan derfor ikke drages nogen konklusion ud af Figur 42 for dette

princip. I afsnit 8.4 uddybes hvordan analysen af automatisk naturlig ventilation er foretaget.

Figur 37 Ventilationsrater for mekanisk udsugede lokaler. Et lokale fremstår over grænseværdien.



8.3 Temperatur

Rumtemperaturen har indflydelse på komfort og trækrisiko. Temperaturerne er, tilsvarende CO₂-niveauet, målt i spidsbelastningsperioden kl. 8-14 mandag til fredag. Som nøgletal for temperaturerne er der taget gennemsnit, spredning, minimum og maksimum af observationerne. Logninger for dage hvor et eller flere vinduer har stået åben i mindst to timer i spidsbelastningsperioden, og hvor der samtidig ikke har været undervisning i klasselokalet er ikke medtaget. Dette skyldes hensyn til repræsentativitet for de følgende beregninger af gennemsnit og spredning.

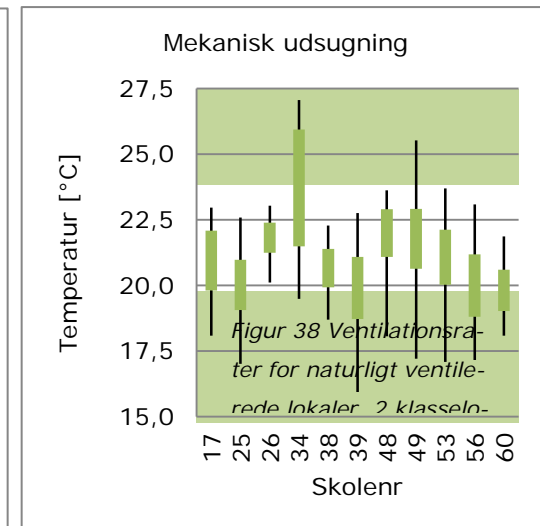
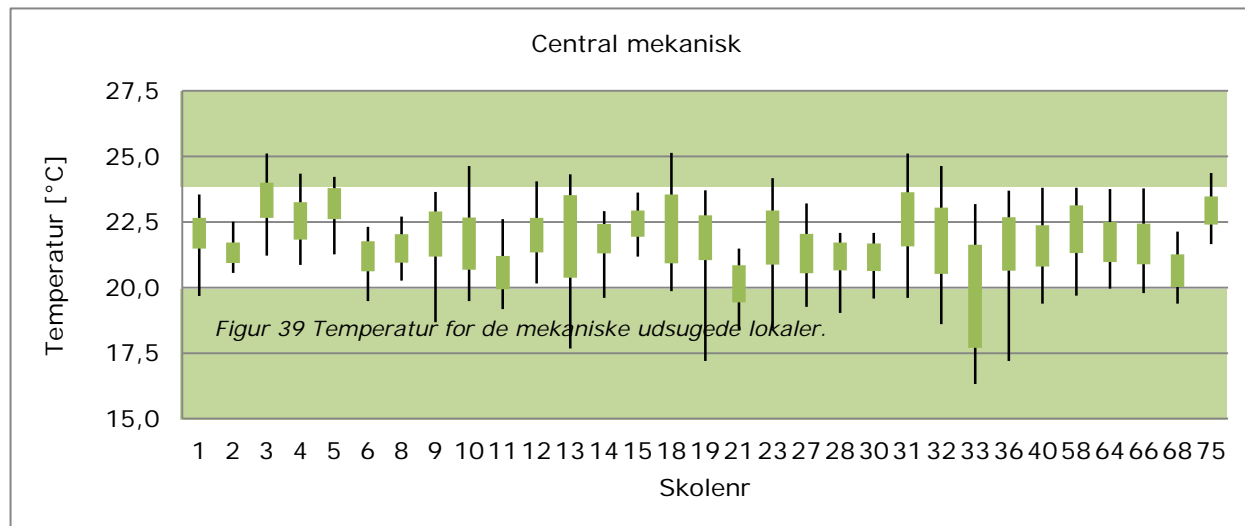
På Figur 40-Figur 41 ses temperaturmålingerne for alle skoler. Minimumstemperatur og maksimumstemperatur er markeret med den

lodrette sorte linje, og det grønne felt markerer 2/3 af temperaturerne, som er målt i spidsbelastningsperioden.

De fleste klasselokalers gennemsnitstemperatur ligger i intervallet 20-24 °C. Der ses ingen gennemsnitstemperatur over 24,0 °C, og minimum- og maksimumtemperaturerne holder sig for de fleste lokalers tilfælde indenfor 18 og 24 °C.

Målingerne er foretaget i efteråret over en periode med nogenlunde ens dagstemperaturer. Udetemperaturen over den målte periode i Danmark er ca. 8-12 °C.

Kolde udendørstemperaturer forventes at forårsage udsving i temperaturerne særligt for naturlig ventilation, mens varme udendørstempe-



raturer forventes at forårsage overtemperaturer for særligt naturlig ventilation samt skoler med central mekanisk ventilation og mekanisk udsugning uden natventilation.

På figurerne ses for minimumstemperaturerne lavere værdier for naturlig ventilation og udsugning end for central mekanisk. Procentuelt opleves også markant oftere lave værdier. Udsvingene forårsages af det temperaturfald, der opstår når vinduerne åbnes ved udluftning eller når udsugningsventilatoren uden tilstrækkelig styring trækker kold luft ind gennem friskluftsventilerne i vinduerne.

Ud fra de gennemsnitlige temperaturer kan der ikke tydes en sammenhæng med de forskellige typer ventilationsanlæg. Ydermere ses heller ingen tydelig forskel på temperaturen mellem de højst- og la-

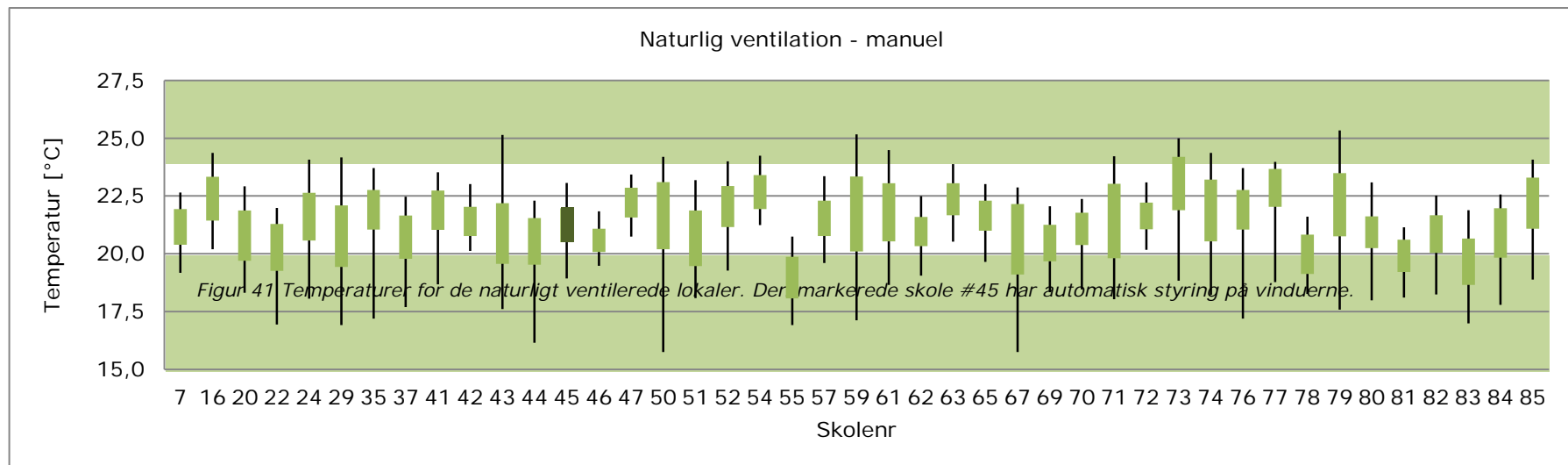
vest rangerede skoler i forhold til ventilationsrate. Bortset fra at skole 1-10 med de nyeste mekaniske ventilationsanlæg har både bedste luftkvalitet og de mest komfortable temperaturer.

8.4 Supplerende indeklimakilder

De præsenterede indeklimamålinger indeholder store mængder data for visse ventilationsprincipper, men især naturlig ventilation med automatisk opluk af vinduerne er ikke tilstrækkeligt dokumenteret med blot et datapunkt.

For at underbygge konklusionen om automatisk naturlig ventilation inddrages målinger udført på Sønder sø skolen i Værløse. Skolen har forskellige ventilationsprincipper i de forskellige dele af skolen og

Figur 41 Temperaturer for de central mekanisk ventilerede lokaler.



Wargocki & Silva (2012) har lavet direkte sammenlignelige studier af disse ventilationsprincipper. Disse resultater er præsenteret sammen med praksiserfaringerne i afsnit 10.7.

8.5 Evaluering af luftkvalitet

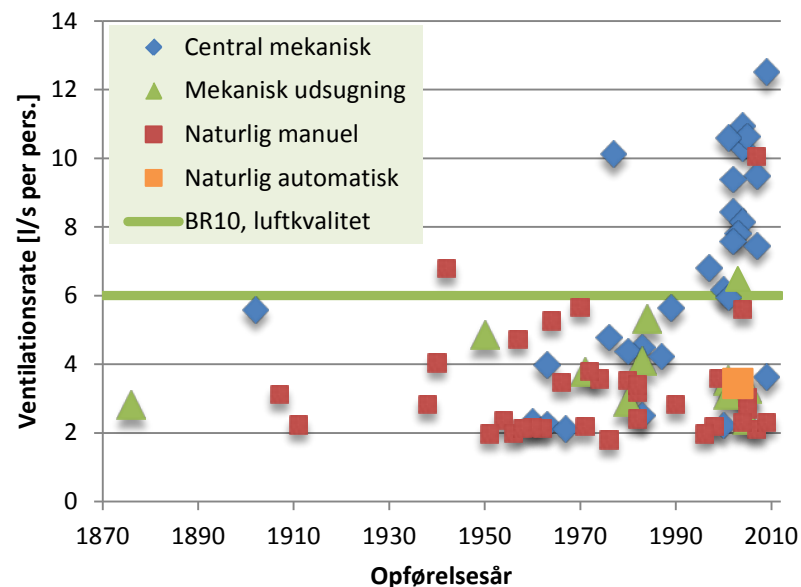
Figur 42 viser performance for de målte anlægstyper efter opførelsesår. Tendensen ud fra de præsenterede data er at andelen af centrale mekaniske ventilerede skoler med et tilstrækkeligt luftskifte er markant større end naturligt ventilerede og mekanisk udsugede lokaler.

For mange centralt mekanisk ventilerede skoler er luftkvaliteten siden 1995 steget til et meget tilfredsstillende niveau - i øvrigt sammenfaldende med nye ventilationskrav for skoler indført i BR95 - mens nye-

re skoler med manuel naturlig ventilation ikke har oplevet nogen bedring af luftkvalitet. Ud af 43 målte naturligt ventilerede lokaler har blot 2% en performance, som det kræves af BR10, og kun et lokale med nyere (2003) mekanisk udsugning performer tilfredsstillende.

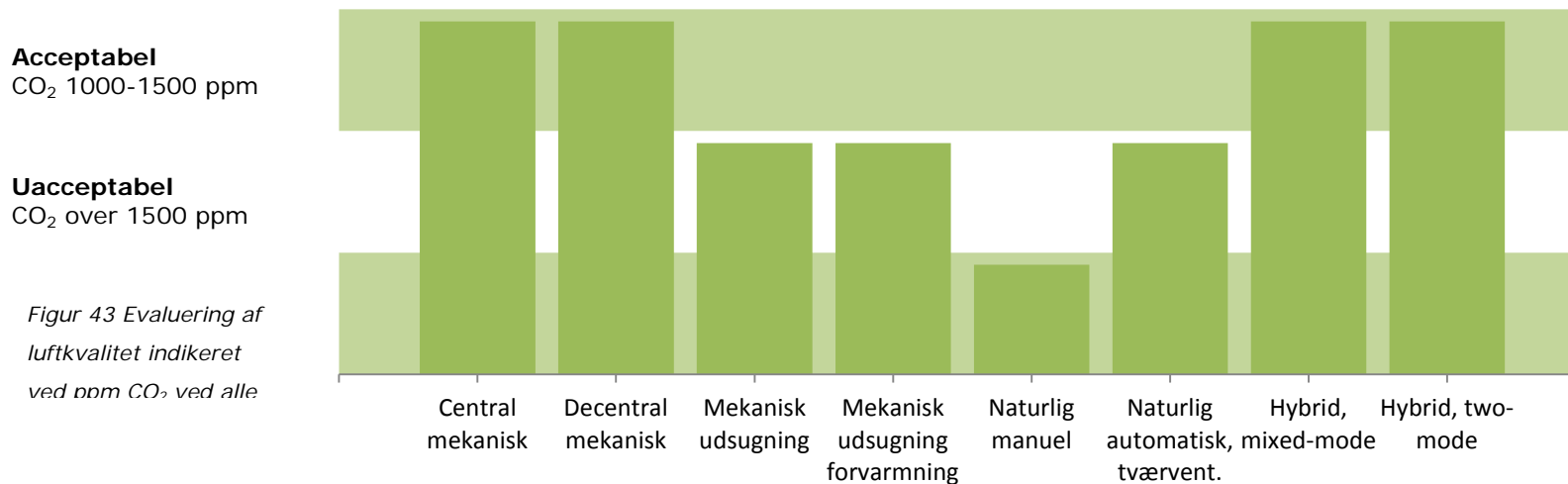
Dette er en stærk indikator på, at luftkvaliteten er bedre i skoler med nyere central mekanisk ventilation, men med til billedet hører at mixed-mode hybridsystemer fra Søndersøskolen (Figur 67), d.s.s. naturlig ventilation med støtteventilator, har en dokumenteret performance, som matcher central mekanisk.

På baggrund af analysen er det godtgjort at de fleste ventilationsprincipper er i stand til sikre tilstrækkelig luftkvalitet i klasselokalet,



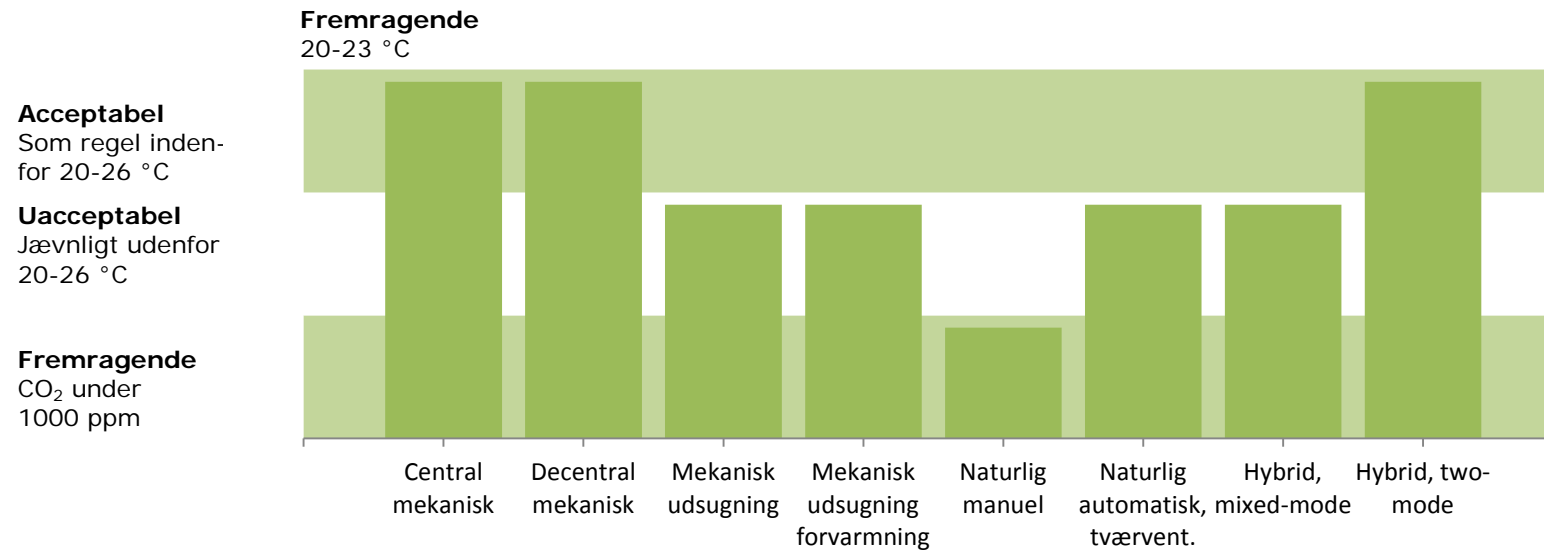
men manuel naturlig ventilation har vist sig at være for ineffektivt i praksis til at opfylde BR10 og får derfor en dårlig evaluering. Alle ventilationsanlæg, som benytter ventilator, kan i princippet klare kravet, men central mekaniske anlæg har en fordel, fordi VAV-styringen kan flytte kapaciteten rundt til de hårdest belastede lokaler når det er nødvendigt.

Figur 42 Ventilationsrate for alle indeklimamålte ventilationsanlæg. En luftstrøm på 6,0 l/s pr. pers. opfylder BR10



8.6 Evaluering af temperaturer

Analysen af temperaturforholdene i afsnit 8.3 viste at ventilationsprincipperne generelt sikrer en behagelig indetemperatur mellem 20-23 °C det meste af skoletiden, i hvert fald i en køligere efterårsperiode som den målte. Dog er der en tendens til at flere naturligt ventilerede lokaler oplever meget lave temperaturer helt ned til 16 °C. Målingerne fra Sønderøskolen vist på Figur 65 understøtter dette. Om sommeren viser Figur 64 omvendt højere maks.-temperaturer med naturlig ventilation.



8.7 Evaluering af køling vha. natventilation

Evalueringen tager udgangspunkt i ventilationsprincippet evne til at holde temperaturen nede på komfortniveau i varme perioder.

Køling i mekaniske ventilationssystemer er meget dyrt, især i skole-sammenhænge, og naturlige ventilationssystemer kan ikke bare lukke frisk luft ind, da indblæsningsluften typisk vil være for varm i de peri-oder, hvor køling er nødvendig.

For at holde et behageligt temperaturniveau i varme perioder, især i skoler med renoveret facade, bør i stedet anvendes ventilering om natten til at køle bygningens konstruktioner. Det sænker den følgende dags generelle temperaturniveau såvel som makstemperaturen.

Det er derfor mest relevant at evaluere evnen i systemet til at natventilere, da natventilation er en mulighed for at opnå 'gratis køling'.

Næsten alle principper har indbygget mulighed for natventilation bortset fra manuel naturlig, men det er kun decentrale mekaniske anlæg, som kommer med funktionen som standard fabriksindstilling og som samtidig ikke giver anledning til bekymringer om højt ekstra elforbrug eller hvordan bygningen tyverisikres.

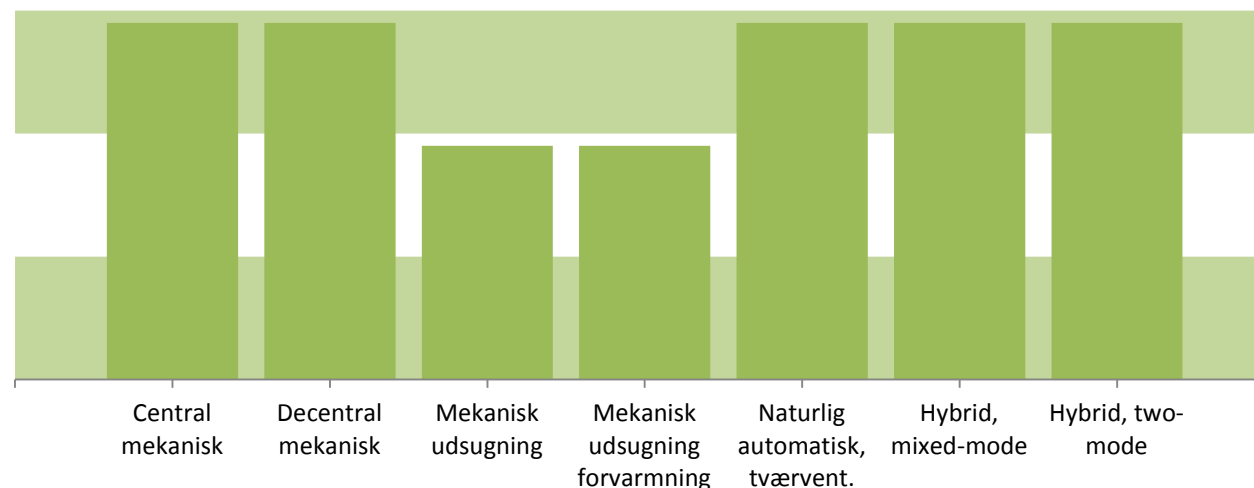
Energimæssigt 'koster' de mekanisk drevne natventilationsløsninger mere, men på årsbasis er det samlede energiforbrug alligevel mindre, jf. Figur 9 side 20.

Figur 44 Evaluering af indetemperatur ved alle de analyserede ventilationsprincipper.

Acceptabel
Evt. mulighed for natventilation

Uacceptabel
-

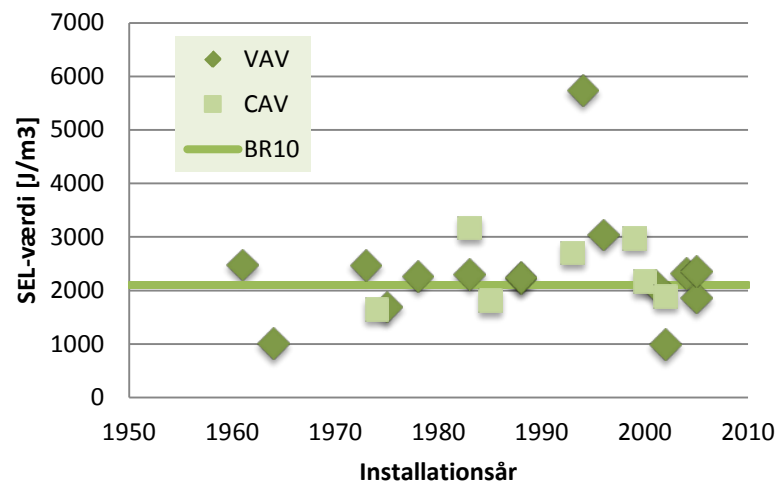
Figur 45 Evaluering af termisk komfort ved alle de



9 Energiforbrug til ventilation

Der er to forskellige typer energiforbrug, som knytter sig til ventilation: varme og elektricitet.

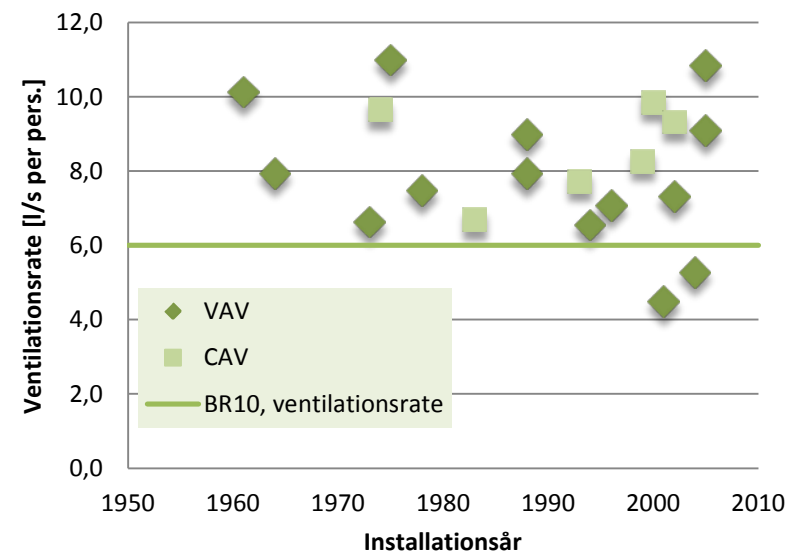
Ventilation forbruger varme, når den varme indeluft udskiftes med ny, koldere udeluft. Varmeforbruget kan mindskes med varmegenvindingen, hvor varmen fra udsugningsluften overføres til indblæsningsluften. Varmegenvinding er installeret på mange mekaniske ventilationsanlæg, men kræver at luftstrømmene mødes centralt i en varmeveksler. Varmeforbruget beregnes ud fra luftstrømmen og varmegenvindingsgraden. Naturlig ventilation kan ikke genvinde varmen.



Fremragende
Natventilation indbygget

I mekaniske ventilationsanlæg forbruger ventilatorerne el, når luften flyttes. Når ventilatorerne flytter luften frem og tilbage i anlægget/bygningen sker det mere eller mindre energieffektivt. Effektiviteten måles som 'specifikt elforbrug', forkortet SEL-værdi, og måles i Joule/m³. Dvs. hvor meget energi kræver det at flytte 1 m³ luft.

Manuel og automatisk naturlig ventilation har ikke noget elforbrug med mindre der er tilkøbt en støtteventilator (f.eks. ved mixed-mode hybrid), som dermed har en tilknyttet SEL-værdi. Der ses generelt bort fra elforbruget til styringer.



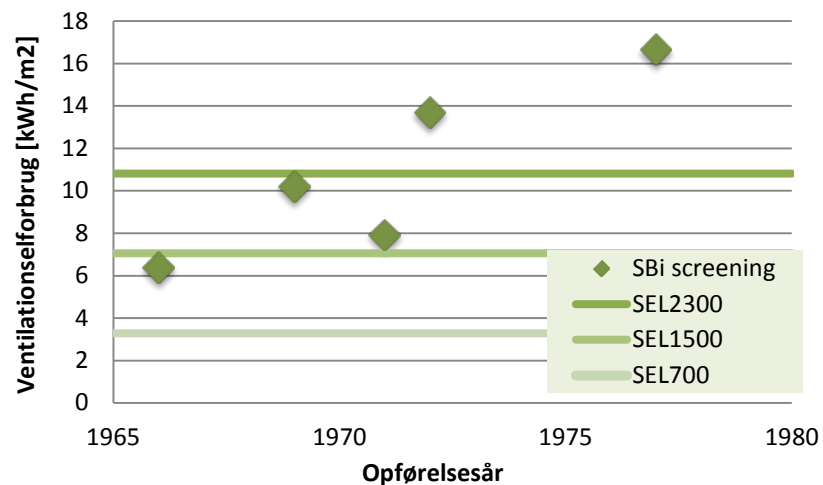
Figur 46 Målt effektivitet (SEL-værdi) af et antal centrale mekaniske ventilationsanlæg til ventilering af klasselokaler. En gennemsnitlig værdi på 2.300 J/m³ anvendes i beregningerne af det samlede ventilationselforbrug.

Jf. i øvrigt Tabel 10. Kilde: VENT-ordning, 2012

9.1 Elforbrug

Elforbruget ved forskellige ventilationsprincipper opgøres ikke efter det samlede elforbrug, som vil være afhængigt af skolens størrelse og elevantal, men som anlæggets evne til at transportere luft energiefektivt, d.s.s SEL-værdi (Joule/m^3).

Figur 46 viser den målte SEL-værdi for et antal centrale mekaniske ventilationsanlæg. Data er fra VENT-ordning og er publiceret på Go' Energi's hjemmeside (VENT-ordning, 2012). Figuren viser at de fleste målte anlæg har en SEL-værdi mellem 2.000 - $3.000 \text{ J}/\text{m}^3$, med en overvægt omkring $2.300 \text{ J}/\text{m}^3$. Effektiviteten har været konstant gennem 40 år, hvilket sandsynligvis skyldes at ventilationsanlæg igennem



Tabel 10 Opsummering af ventilationseffektivitet og varmegenvinding i forskellige bygningsreglementer.

mange år har været dimensioneret efter de samme retningslinier bestemt ud fra støjniveau.

Til sammenligning udførte Statens Byggeforskningsinstitut i 2001 en screening af 5 skoler (Gunnarsen et al., 2012) med central mekanisk ventilation. Figur 48 viser ok overensstemmelse mellem resultaterne (beregninger udført som i afsnit 9.3 'Samlet energiforbrug').

Siden BR08 er der dog sket en løbende produktudvikling, og centrale ventilationsanlæg i nyopførte skoler kan opnå SEL-værdier på $1.000 \text{ J}/\text{m}^3$ (Interviewnoter, 2012). I eksisterende skoler er det dog mere realistisk at sigte efter $1.500 \text{ J}/\text{m}^3$.

Figur 47 Målt ventilationsrate på anlæggene fra Figur 46. Kilde: VENT-ordning, 2012

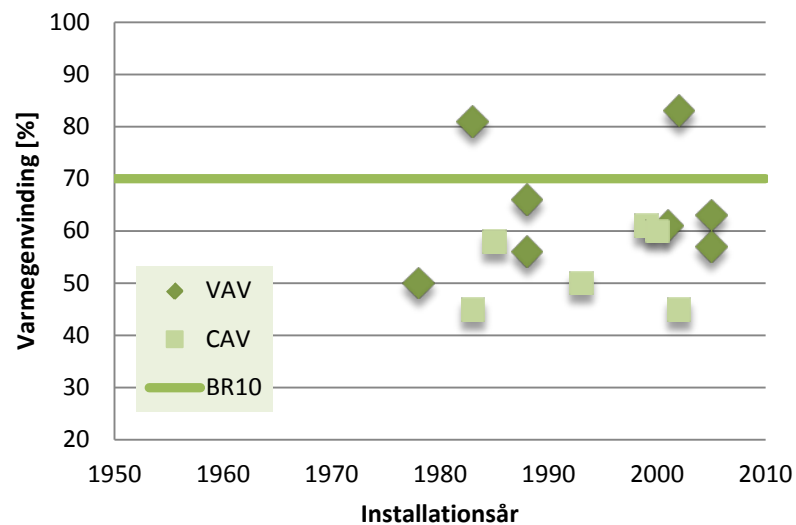
	BR95	BR08	BR10
SEL-værdi, CAV	$2.500 \text{ J}/\text{m}^3$	$2.100 \text{ J}/\text{m}^3$	$1.800 \text{ J}/\text{m}^3$
SEL-værdi, VAV, max	$3.200 \text{ J}/\text{m}^3$	$2.500 \text{ J}/\text{m}^3$	$2.100 \text{ J}/\text{m}^3$
SEL-værdi, udsugning	-	$1000 \text{ J}/\text{m}^3$	$800 \text{ J}/\text{m}^3$
Varmegenvinding	'Effektiv'	65%	70%

I BR10 for VAV-systemer er kravet maks. 2.100 J/m³ og i visse decentrale aggregater er effektiviteten 700 J/m³.

For at sikre at de præsenterede anlæg i Figur 46 er velfungerende og giver en tilstrækkelig luftkvalitet, vises ventilationsraten per person på Figur 47. Næsten alle anlæg opfylder BR10-kravet til luftkvalitet.

9.2 Varmeforbrug

Varmeforbruget ved ventilation opstår som følge af at den brugte luft udskiftes med ny frisk udeluft. Den brugte varme luft kastes ud og den nye luft skal opvarmes til rumtemperatur.



Figur 48 Ventilationselforbrug på 5 screenede skoler med central mekanisk ventilationsanlæg (Gunnarsen et al., 2001) sammenlignet med anlæg med effektiviteter typiske for opførelsesperioden på 2.300 J/m³ (se Figur 46). Niveauerne for nye installationer (1.500) og nye decentrale installationer (700 J/m³) ses også.

Med varmegenvinding overføres varmen fra afkastluften til indblæsningsluften. Det sparer varme og bidrager til at opvarme indblæsningsluften, så den ikke føles for kold, når den blæses ind i lokalet.

Det er ikke relevant at se på det samlede varmeforbrug ved et ventilationsprincip, da det afhænger af ventilationsraten, ude- og indetemperatur og evt. varmegenvinding.

Figur 49 præsenterer den målte vekslereffektivitet som en procentsats for hvor meget varme, der overføres fra afkast- til indblæsningsluften. Data er for et antal central mekaniske ventilationsanlæg (en andel af dem vist på Figur 46) målt via VENT-ordningen og er publiceret på Go' Energi's hjemmeside (VENT-ordning, 2012). Resultaterne ligger omkring 45-65 % og præges sandsynligvis af at de installerede vekslere

Figur 49 Målt varmegenvindingseffektivitet på centrale mekaniske ventilationsanlæg, jf. i øvrigt Tabel 10. Kilde: VENT-ordning, 2012

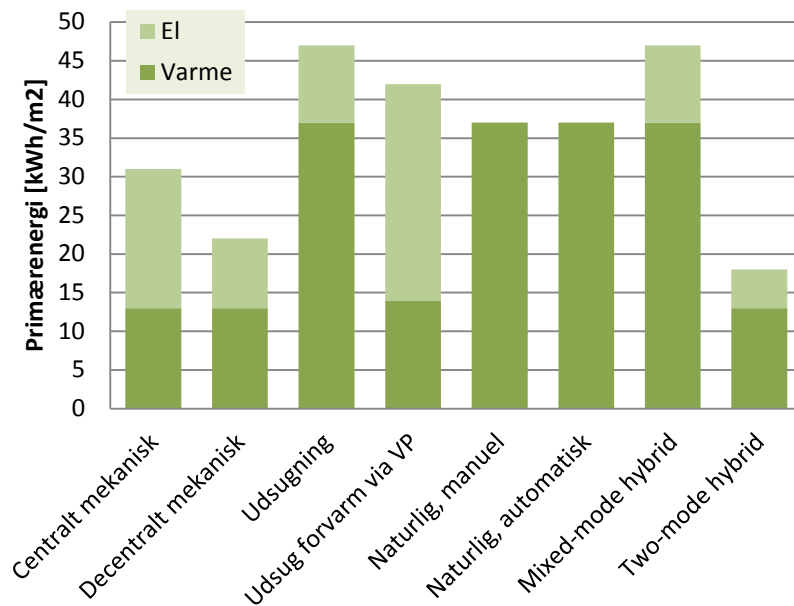
	SEL-værdi	Varmegenvindingseffektivitet	Natventilation
Central mekanisk	1.500 J/m ³	85 %	Ja
Decentral mekanisk	700 J/m ³	82 %	Ja
Udsugning	800 J/m ³	0 %	Ja
Udsugning m/ forvarmn. via VP	2.300 J/m ³	80 %	Ja
Naturlig manuel	0 J/m ³	0 %	Nej
Naturlig automatisk	0 J/m ³	0 %	Ja
Mixed-mode hybrid	800 J/m ³	0 %	Ja
Two-mode hybrid	1000 J/m ³	80 %	Ja

er af en ældre type, krydsveksler, som kun kan opnå 60 % effektivitet.

Nyinstallerede centrale mekaniske ventilationsanlæg med roterende veksler kan dag opnå 85 % vekslereffektivitet. I decentrale aggregater er effektiviteten ca. 80 %. I BR10 er kravet minimum 70 %.

9.3 Samlet energiforbrug

Nogle ventilationsprincipper forbruger ikke el, men har til gengæld et stort varmeforbrug og omvendt. På Figur 50 er det samlede forventede el- og varmeforbrug i et klasselokale beregnet for forskellige ventilationsprincipper installeret med det almindelige teknologiske udviklingsstade i 2012 og fremskrevet et par år frem.



Klasselokalet er på 60 m² med 21 elever og 1 lærer. Ventilationsraten er 6 l/s per person, jf. Tabel 2. Driften er 7 timers drift, 5 dage om ugen i 45 uger. Andre input fremgår af Tabel 11.

Resultaterne stemmer overens med Energieffektive Bygninger (2001), som siger at elforbruget til ventilatorer i typiske anlæg med balanceret ventilation og varmegenvinding ofte er mindre end en fjerdedel af den besparelse i opvarmningsenergi, der opnås via varmeveksling.

Tabel 11 Beregningsmæssig baggrund for Figur 50. Tallene tager højde for den teknologiske udvikling i den nærmeste fremtid. VP: varmepumpe

9.4 Evaluering af SEL-værdi

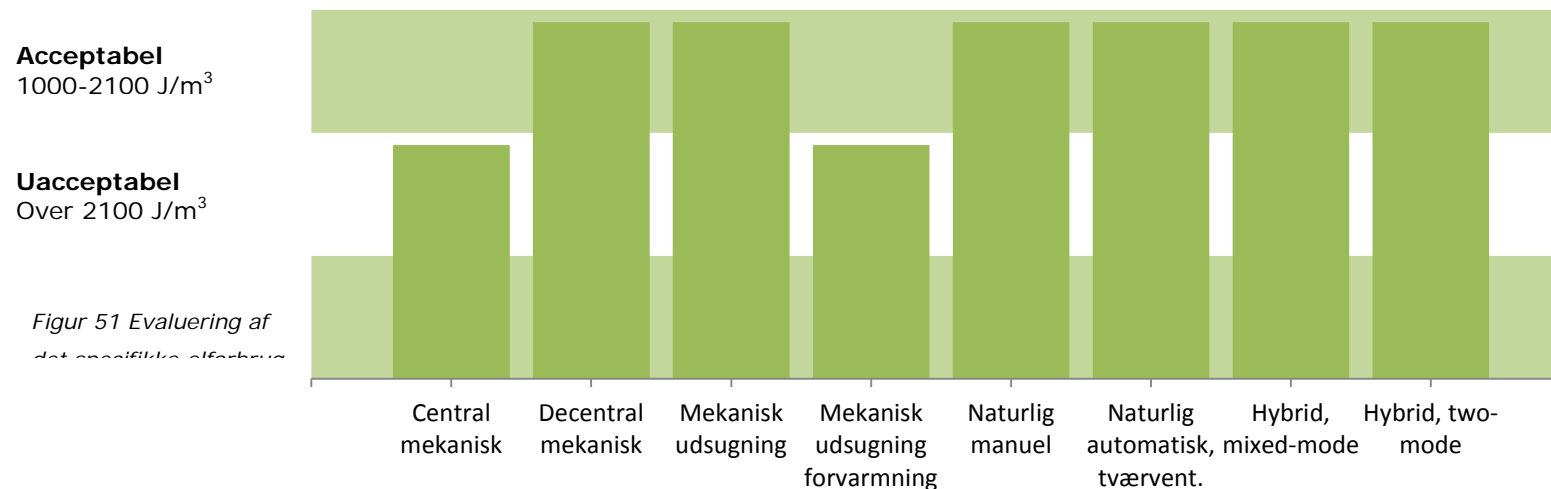
Det specifikke elforbrug (SEL) angiver hvor effektivt ventilationsanlægget transporterer luften. SEL-værdien måles i J/m^3 . Anlæggene er graderet efter deres effektivitetspotentiale.

På baggrund af de præsenterede elforbrugsresultater og erfaringer med principperne og teknologierne, er der givet højeste graduering til ventilationsprincipper uden ventilatorer eller med én ventilator eller med meget korte kanaler. Målingerne viste at centrale mekaniske anlæg kan have problemer med at overholde nugældende krav til SEL-værdien. Det vurderes dog at nyinstallationer kan overholde BR10 og BR15 med god margin, da størstedelen af energitabet i systemet ligger i aggregatet, og ikke i kanalsystemet. Aggregatet kan ofte place-

res enten på tag eller i kælder, hvor der er god plads til et energieffektivt aggregat.

Two-mode hybrid drager fordel af at det mekaniske anlæg slukkes i en del af sommersæsonen. Derved bliver den resulterende årsmiddel SEL-værdi 'fremragende', men det forudsætter naturligvis at anlægget ikke presses i størrelse.

Figur 50 Årligt varme- og elforbrug opgjort for en 70'er normalklasse med nye vinduer. Samme som Figur 9 side 20. Simuleret med iDbuild (idbuild.dk). Sammenvejningen af varme og el er med BR10 primærenergifaktorerne 1,0 på



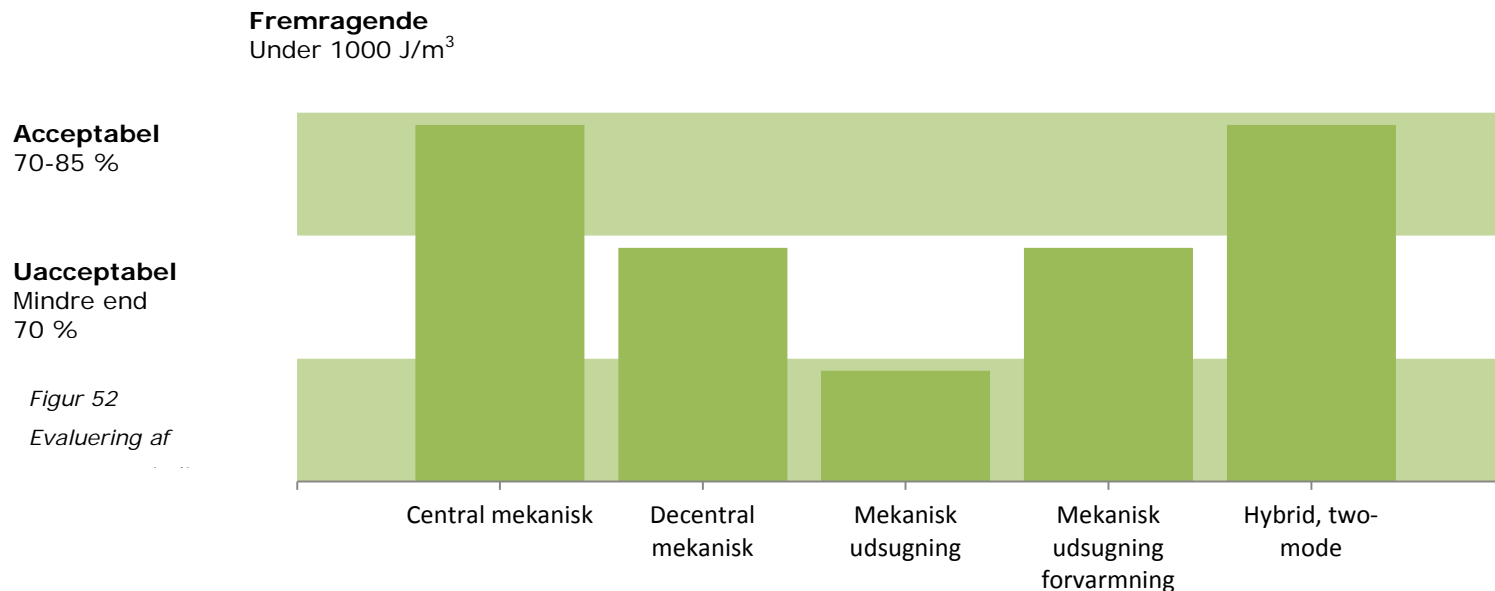
Figur 51 Evaluering af det specifikke elforbrug

9.5 Evaluering af varmegenvinding

Varmegenvinding er overførslen af varme fra afkastluften til indblæsningsluften. Varmegenvindingen sparer energi og opvarmer indblæsningsluften.

I sammenligningen mellem ventilationsprincipperne er det relevant at vurdere evnen til at genbruge varmen fra afkastluften. Derfor sammenlignes alle de analyserede anlægs evne til varmegenvinding med markedsmoden teknologi. Kun systemer, hvor både indblæsning og udsugning er mekanisk drevet, kan p.t. fås med varmegenvinding. Mekanisk udsugning med forvarmning kan genvinde afkastvarmen via en elektrisk drevet varmepumpe, men elforbruget til varmepumpen udgør overslagsmæssigt ca. 8 % af den genvundne varme. I CO₂-

ækvivalenter svarer det til ca. 20 %. Derfor får princippet laveste gradering.



10 Praktiske erfaringer

Dette kapitel opsummerer erfaringer med praktisk installation af forskellige ventilationssystemer. Kapitlet skal opfattes som et supplement til de loggede indeklimate og energidata fra kapitel 8 og 9, således at vurderingen af ikke-kvantificerbare data som serviceniveau, levetid og brugertilfredshed kvalificeres på et så bredt og oplyst grundlag som muligt.

Alle praksiserfaringer kan naturligvis ikke indsamles og kategoriseres, det har ikke været formålet med denne fase i undersøgelsen.

Forfatterne har derimod, på baggrund af et større antal interviews forsøgt at skaffe sig et samlet overblik over praksiserfaringerne med

de forskellige systemer. I de følgende afsnit redegøres for fordele og ulemper ved forskellige systemer. På baggrund af praksiserfaringer og de loggede data, har forfatterne udarbejdet en samlet anbefaling og vejledning i kapitel 3.

Der er blevet kommunikeret strategisk til udenlandske erfaringsfolk, forstået på den måde, at systemer, som er relativt ukendte i Danmark, kan være almindelige visse steder i udlandet.

10.1 Interviews

Praksiserfaringerne er indsamlet ved at interviewe et antal personer, inden-, såvel som udenlands, som forfatterne betragter som mennesker med erfaringer på alle niveauer lige fra praktisk bruger til aka-

demisk forsker, men med det fællestræk at de er i daglig kontakt med emnet. En liste over bidragsyderne findes i Bilag A.

I praksis har interviewene formet sig som dialoger omkring de følgende emner:

- brugerkommentarer fra forvaltning, pedel, elever og lærere
- energiforbrug
- forventet serviceniveau
- forventet levetid
- indeklimaet før og efter
- overvejelser omkring alternative ventilationsløsninger
- integration af ventilationsløsningen
- fokusområder for bedre kvalitet i ventilationsløsningerne

Disse fokusområder er forsøgt adresseret i opsummeringen af erfaringerne på hvert system. Erfaringerne præsenteres redigeret. Det er derfor ikke muligt at koble specifikke erfaringer med afsenderen.

10.2 Central balanceret ventilation

Siden BR95 er der stillet krav om mekanisk ventilation i skoler. Kun under særlige omstændigheder og med dokumentation er det muligt at fravige kravet og implementere automatisk naturlig ventilation. Som konsekvens heraf opføres langt de fleste skoler i dag med centralt balanceret ventilation. Skolerne opføres generelt med VAV-styring og med CO₂-, temperatur- og bevægelsessensorer i alle klasselokaler. Luftmængden dimensioneres efter luftkvalitet og ikke temperaturkomfort grundet anlægsomkostningerne. Temperaturen vil



ellers være styrende i et normalt klasselokale, men søges kontrolleret med natventilation, som ofte er aktiveret pr. standard i nye anlæg.

Erfaringerne i praksis med centrale anlæg er gode, men det er nødvendigt med en udbredt grad af automatisering, således at automatikken overtager ansvaret fra pedel og brugere f.eks. i form af automatisk fejlmelding.

Den automatiske styring giver også et performanceløft, både fordi den indlejrede ekstra luftkapacitet, som findes i VAV-systemer, kan anvendes aktivt til at forbedre indeklimaet i lokalerne med størst behov, men det sker også med optimeret energiforbrug.



Bagsiden af de meget automatiserede anlæg er betydelige indkøringsproblemer, men alt tyder på at professionelle ventilationsaktører, på trods af tilbagevendende tovtrækkerier, er teknisk rustet til at løse dem. I den forbindelse er serviceaftaler afgørende, fordi teknikken er kompliceret, og de nødvendige kompetencer til at efterse eller forstå anlæggene er ikke til stede på folkeskolerne. I norsk (Bakke & Bruun, 2012) og svensk kontekst (Interviewnoter, 2012) er serviceproblemet det samme. Mysen (2010) angiver f.eks. at den reelle energibesparelse ved VAV ift. CAV kun sjældent svarer til potentialet. Som konsekvens heraf er de fleste systemer i Sverige med CAV, fordi VAV er for vanskeligt at drifte for servicepersonellet. Dog er nyere, større skoler med CO₂-sensorer og VAV-styring.



Figur 53 Central balanceret ventilation med kanalerne ført på taget.

En anbefaling lød på at flere servicefællesskaber mellem skoler/kommuner burde blive etableret således at driften kan optimeres og kompetencerne kan øges.

På universiteter og på nogle store gymnasier er servicekompetencerne dog større, og det har som positiv konsekvens, at der på disse steder ikke kun fokuseres på systemets etableringsomkostning, men også på driftsomkostninger. I Sverige er universiteter/college som regel med enten komfortkøl eller VAV (Interviewnoter, 2012).

Vedligehold er meget vigtigt. Der findes studier (Meyer, 2011), som forfægter den sundhedsmæssige konsekvens af bedre luftkvalitet via centrale anlæg. Forekomsten af allergiske reaktioner er således højere i lokaler med centrale anlæg end ved naturlig ventilation. Meyer

(2011) teoretiserer over manglende vedligehold af filtre, samt om hvorvidt et højere luftskifte hvirvler mere gulvstøv og allergener rundt. Rengøring og filterskift er dermed ekstra vigtigt i centrale anlæg.

Støj er generelt ikke et problem i nye anlæg, hvor der er krav til energieffektiviteten. Støj er i den forbindelse et unødvendigt energitab. Men fordi anlægsomkostningen ofte er i fokus, kan der forekomme underdimensionering af nogle anlæg, f.eks. kan de nødvendige lyd-dæmpere blive sparet væk.

Ofte installeres aggregatet på taget med synlig kanalføring, men denne løsning, udover det æstetiske fravalg, inviterer desværre også til hærværk.



Figur 54 Klemte ventilationskanaler bag akustikloft i klasselokale.

Forventet levetid på et veldimensioneret anlæg er 30 år, men ofte udskiftes de efter blot 20 år på grund af den teknologiske udvikling. Ventilatorernes lejer skal dog skiftes hvert 5-6 år (Interviewnoter, 2012).

10.2.1 Omkostninger

V&S Prisbøger (V&S prisbøger, 2012) angiver en pris på 1.350 kr/m² til skoler for et balanceret centralt anlæg med varmegenvinding og VAV-styring efter CO₂ og temperatur (erfaringsmæssigt er 15 % fratrukket listepriisen, da ventilationsanlægget ofte udgør en mindre del af en større renoveringsentreprise). Bemærk at den opgivne pris *ikke* afspejler ekstraarbejder, hvis kanal gennemføringerne kompromitterer de bærende elementer.

Hviid (2010) opgiver en etableringspris på ca. 900 kr/m² for et energi-effektivt anlæg, dog for en kontorbygning med væsentligt mindre krav til luftmængder, men med rumsensorer og VAV-styring pr. kontor.

I centrale anlæg passerer kanalerne brandsektionsvægge, og dermed skal et selvkontrollerende brand- og røgspjæld indsættes. Der skal ydermere etableres røgspjæld mellem brandceller, men med etablering af varslingsanlæg kan de dog elimineres (DS428, 2011). Det afhænger af den enkelte skole, hvilket alternativ der er billigst, men for nogle kommuner kan alene besparelsen på forsikringspræmien betale et varslingsanlæg tilbage på 3-4 år (Interviewnoter, 2012).

Serviceomkostningerne for centrale anlæg er opgivet til ca. 8-15 kr/m² pr. år *eksklusiv* årlig inspektion af brand- og røgspjæld (Interviewnoter, 2012).

10.3 Decentral balanceret mekanisk ventilation

Decentral mekanisk ventilation sker via kompakte ventilationsaggregater i hvert lokale. De har høj energieffektivitet, men de kræver plads i klasselokalet, enten som gulvmodel eller som væghængt facade- eller loftmodel under loftet.

Erfaringsmæssigt kan decentrale rumaggregater være støjende, men det kan tilbageføres til produktkvaliteten og skyldes ikke det grundlæggende ventilationsprincip. Støjproblemer er især observeret ved

udenlandske installationer (Interviewnoter 2012). I Danmark er forfatterne ikke bekendt med specielle problemer af denne art, da produkterne overholder et støjniveau på 30dB(A) som forudsat i BR10 i undervisningslokaler. Generelt er systemerne populære i Tyskland, Øst- og Holland som det prisbillige ventilationsalternativ.

Andre erfaringer går på at de ofte er under-dimensioneret og ikke kan levere den mængde luft, som påkræves. Efter forfatterens opfattelse er det korrekt, at ét aggregat, med de nuværende klassenormeringer, vanskeligt kan klare opgaven alene. Imidlertid har de nye BR10 krav medført at producenterne nu anbefaler *to* lidt mindre aggregater i en normal klasse. Overskydende kapacitet kan dog ikke komme andre

Figur 55 Synlige, temmelig pladsklemte, ventilationskanaler under loft i folkeskole.



lokaler til gode, bortset fra naborum, som i nogle tilfælde tilsluttes med et stykke kanal.

Systemerne kan, på grund af den lille afstand mellem indtag og afkast, have problemer med 'kortslutning' af de to luftstrømme, hvorved den brugte udsugningsluft påvirker den friske indblæsningsluft. Problemerne med kortslutning kan ske på både den indvendige og udvendige side, men er mest udtalt på den udvendige side.

Styringen af decentrale rumaggregater er i teorien simplere end på centrale anlæg, men brugerne anbefaler alligevel en serviceaftale på disse anlæg. I en skole kan der være ganske mange installeret og uden et centralt tilbagemeldingssystem eller jævnlige fysiske kontroller, kan mange anlæg være ude af drift i flere år før det opdages.

Jævnlig kontrol knyttes til det halvårlige filterskift via en serviceaftale. Serviceaftaler fjerner også driftsbyrden fra pedellen.

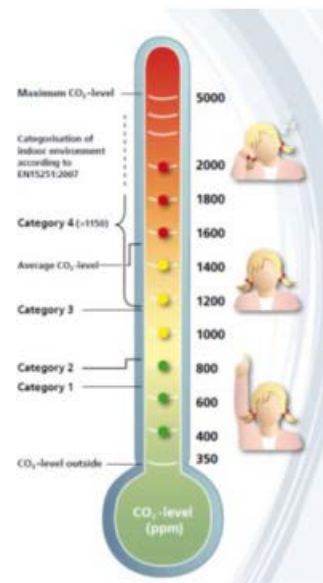
10.3.1 Omkostninger

Prismæssigt ligger rumaggregaterne på et niveau, som kan sammenlignes med central ventilation, selv i tilfælde, hvor bygningen er i et plan og kanalerne fra et centralt anlæg i så tilfælde kan føres billigt på taget.

Etableringsomkostningerne er beregnet af Steiger et al. (2012) til 1.730 kr/m². Andre troværdige erfaringer peger på en pris på 83.000 kr pr. klasselokale inkl. montage og elarbejde, fordi der ofte skal installeres to aggregater, dels af hensyn til luftkvaliteten, dels af hensyn



Figur 57 Eksempler på udenlandske decentrale ventilationsaggregater. Kilde: Lüftung von Schulen, 2011



Figur 56 Røgforsøg, som viser indstrømningsmønster fra loftsarmatur i klasselokale

til luftfordelingen, dvs. ca. 1.210 kr/m². I gymnasieklasser er prisen ca. 1.430 kr/m² fordi større anlæg er påkrævede. Serviceomkostningerne er hos Steiger et al. (2012) beregnet til 35 kr/m² pr. år. En anden opgiver dog, på baggrund af en tegnet serviceaftale, serviceomkostningerne til ca. 13 kr/m² pr. år (Interviewnoter 2012).

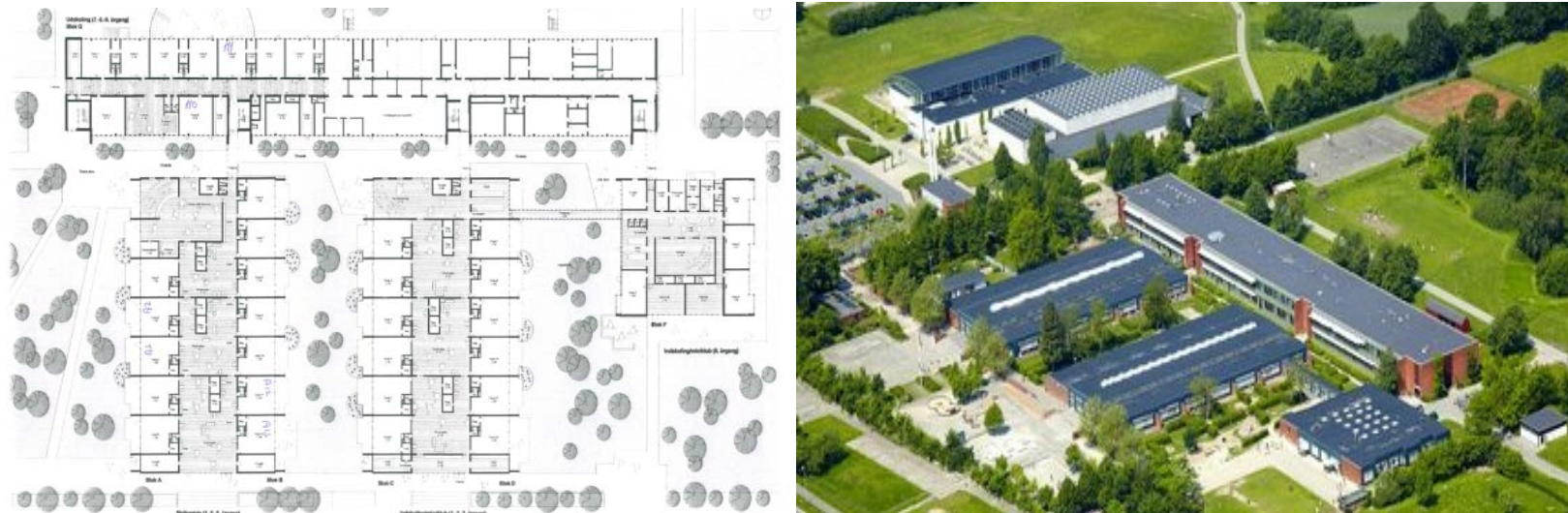
I udlandet oplyser kilder, at central balanceret ventilation i praksis har lavere kostbånd end decentrale aggregater, men at dette sandsynligvis kan tilskrives lokale personlige netværk og lobbyisme indenfor og imellem ventilationsindustri og myndigheder (Interviewnoter, 2012).

10.4 Udsugningsventilation

De praktiske erfaringer med udsugningsventilation er ok. Det er den billigste og simpleste form for mekanisk ventilation og er som regel uden nogen form for styring. Lufttilførslen gennem ventilerne i facaden skaber imidlertid trækgener for de nærmeste elever i kolde perioder. Placeres ventilerne derimod i forbindelse med en radiator, f.eks. lige under vinduet, er der ikke rapporteret om trækgener.

10.4.1 Omkostninger

Etableringsomkostningerne for et udsugningssystem med styring efter rumsensorer ligger på ca. 780 kr/m².



Figur 58 Comfort-O-Meter til måling af CO₂, angivet med trafiklyspædagogik. Kilde: www.exhausto.dk

Serviceomkostningerne er meget små og kan indgå i skolens generelle vedligeholdelsesbudget, da der ikke indgår filtre eller varmevekslere, endelige rengøring. Ventilatorens lejer skal dog skiftes hvert 5-6 år (Interviewnoter, 2012). Omkostningerne estimeres til 5 kr/m² per år.

10.5 Udsugningsventilation med forvarmning i facade

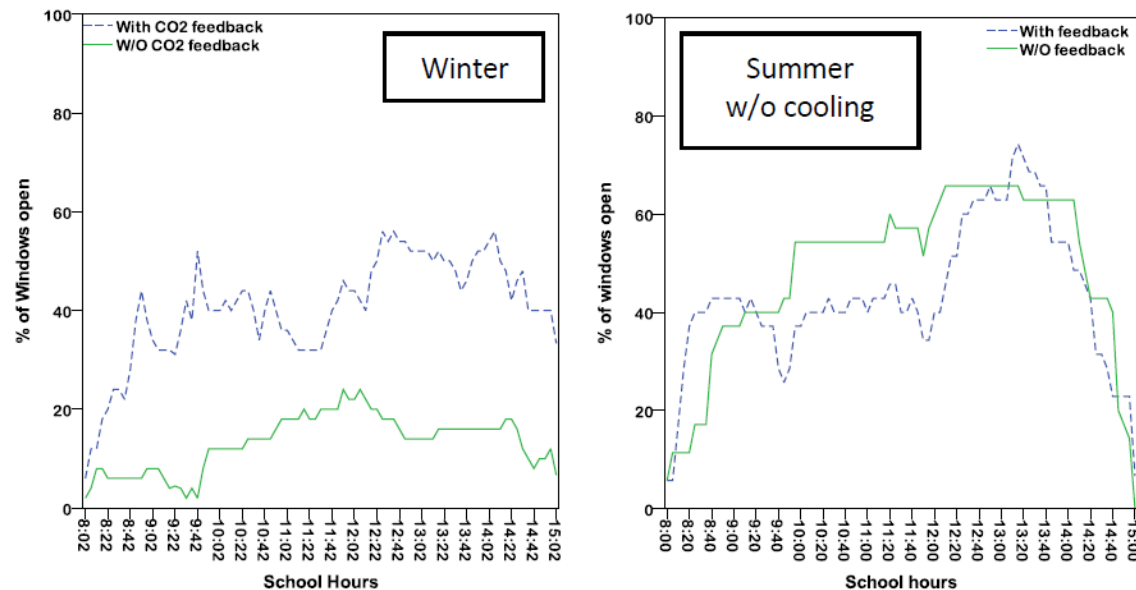
Som alternativ til den direkte tilførsel af udeluften, kan udsugningsventilation kombineres med en varmeplade i facaden. Forvarmningen burde mindske trækgenerne, men praksiserfaringerne viser, at det ikke er tilfældet, fordi lufttilførslen i facaden ligger for tæt på elevernes opholdszone i klasselokalet. Både i Danmark og i Sverige (Interviewnoter, 2012) er fortrængningsventilation, hvor lufttilførslen sker nær opholdszonen, af samme årsag næsten ikke-eksisterende. Sy-

stemet er også erfaringsmæssigt vindpåvirkeligt, således at vind på facaden, øger trækgenerne.

Erfaringsmæssigt har der været en del problemer med tilfrysning af facadevarmepladerne. I princippet har de forskellige typer frostsikringer og kan tåle at fryse, men erfaringsmæssigt risikerer de alligevel at frostsprænge i kolde vintre.

For at illustrere risikoen repeteres her en række producentkrav, som skal opfyldes for at undgå frostsprængning:

- enheden skal kobles til et centralvarmeanlæg, hvor fremløbs-temperatur aldrig er under +40 °C i frostvejr
- ventiler skal funktionstestes mindst 1 gang årligt



Figur 59 Comfort-O-Meter til måling af CO₂, temperatur og luftfugtighed. Kilde: www.exhausto.dk

- natsenkning og reduceret pumpedrift i weekender eller ferieperioder er uønsket
- man skal være ekstra varsom med kombinationer af produkter, hvor frostsignalet fra facadekomponenten ikke bliver opfanget af udsugningsventilatoren.

Facadeenhederne er uden filter til filtrering af partikler.

10.5.1 Omkostninger

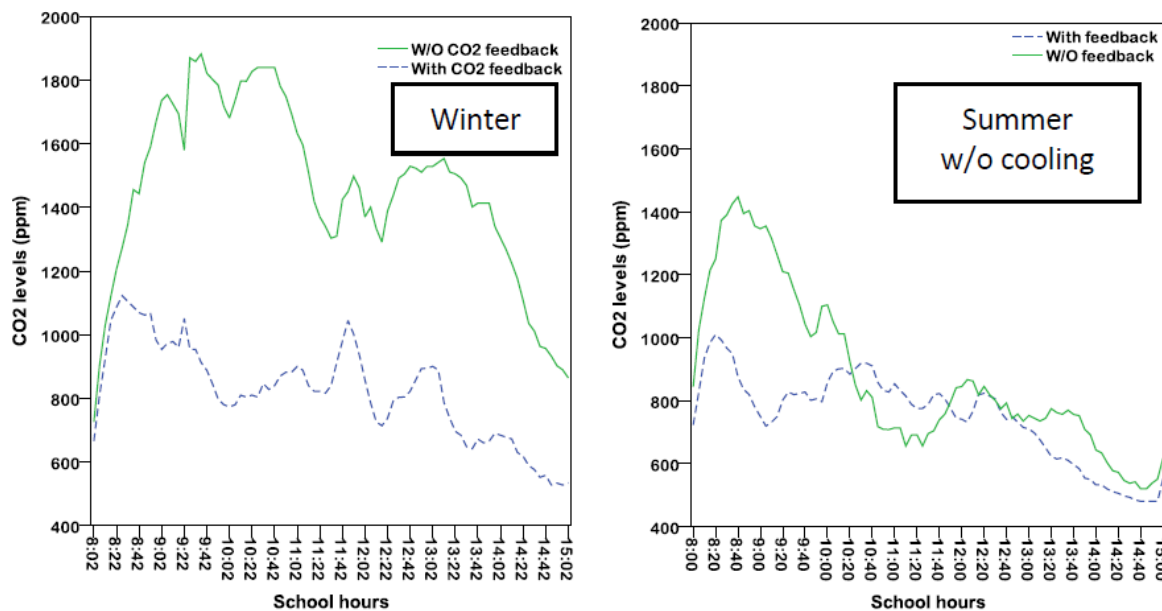
De ekstra etableringsomkostninger for at tilføje varmeplader med ventilator i facaden til udsugningssystemet ligger på ca. 750 kr/m². Uden ventilatorer er prisen 640 kr/m². Den samlede løsning for udsugning med forvarmning i facaden bliver da (780+750) ca. 1.530 kr/m².

Hvis man ser bort fra frostsprængningsrisikoen er serviceomkostningerne ligeså lave som med ren udsugningsventilation. I nogle enheder skal der skiftes filtre, anbefalet 2 gange per år, hvilket indebærer at enheden skal åbnes.

Det vurderes at serviceomkostningerne ligger på niveau med decentral mekanisk. Når der indgår en varmepumpe i systemet ligger niveauet i dne øvre ende på ca. 22 kr/m².

10.6 Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk

Naturlig ventilation med manuelt opluk findes i et flertal af danske skoler (Masseeksperiment, 2009). Luftkvaliteten afhænger primært af hvor tit vinduerne åbnes; sekundært af det daglige vind og vejr.



Figur 60 Søndersøskolen, Værløse. Er anvendt til praktiske indeklimamålinger, Wargocki & Silva, 2012

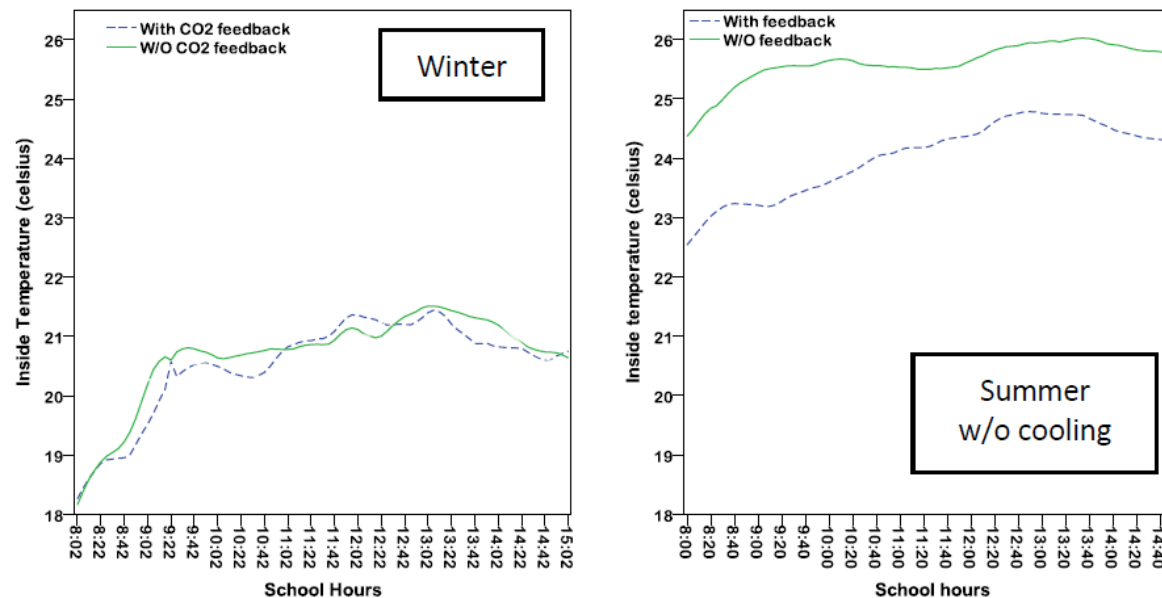
Forskning viser at skoleelever ikke reagerer på dårlig luftkvalitet, men på temperaturforhold, som gør dem ukomfortable (Wargocki, 2012; Venus, 2012). Resultatet bliver ekstremt dårlig luftkvalitet i mange klasselokaler med denne form for ventilation (Masseeksperiment, 2009).

En-sidet naturlig ventilation, hvor luften skal ind og ud af de samme vinduer i den samme facade, kan ikke overholde luftkvalitetskrav og lever i øvrigt heller ikke op til BR10, jf. afsnit 8.2.

Er det ydermere koldt udenfor opstår trækgener, når vinduerne åbnes, og dermed vil åbningsgrad og -tid ofte ikke være tilstrækkelig til at ventilere lokalet effektivt.

Der er indsamlet erfaringer med at lade et Comfort-O-Meter (Figur 61- Figur 63) vejlede elever og lærere om hvornår vinduesåbning er påkrævet, og resultaterne er gode, om end langtidseffekten af Comfort-O-Meteret ikke er målt (Wargocki & Silva, 2012).

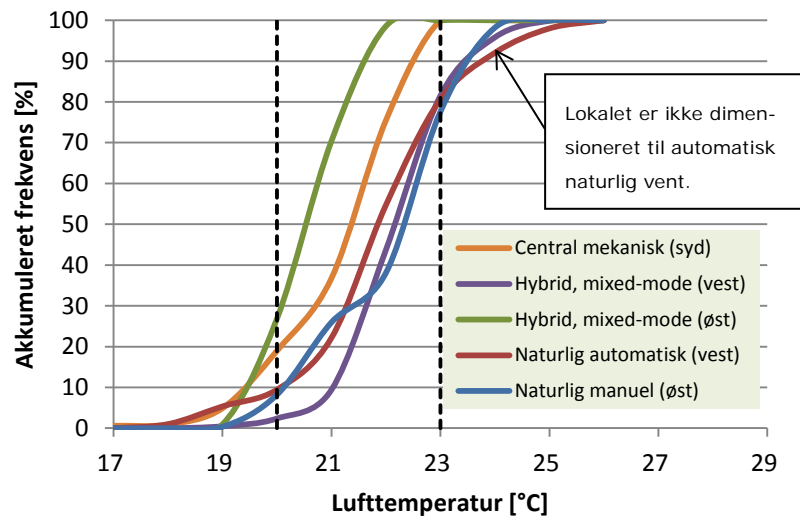
Figur 65 og Figur 64 viser temperaturhyppigheden om sommeren og vinteren i forskellige ventilerede lokaler på Søndersøskolen. Den laveste temperatur er målt i lokalet med automatisk naturlig ventilation som følge af udluftningen med vinterkold udeluft. Den højeste temperatur er målt i lokalet med manuel naturlig ventilation som følge af manglende udluftning. Udetemperaturen i måleperioderne har ligget på henholdsvis -2-8 °C og 15-30 °C i dagstimerne. Dermed har sommerperioden været forholdsvis varm.



Figur 61 Graden af vinduesåbning med og uden Comfort-O-Meter. W/o cooling betyder uden mekanisk køling, Wargocki & Silva (2012)

Udenlandske erfaringer, f.eks. i Japans tempererede zone understøtter at det er muligt at opretholde det påkrævede luftskifte, hvis døre og vinduer åbnes passende, altså også mens undervisningen pågår (Kumagai et al., 2008).

Valbjørn og Aggerholm (1989) og Gunnarsen (2001) rapporterer om en tilsyneladende vellykket skolerenovering, som erstattede et balanceret centralt ventilationsanlæg med brugerstyret naturlig ventilation. Projektet omfattede en del bygningsmæssige ændringer samt ændringer af brugernes adfærd. CO₂-niveauets peak-værdi er dog også efter renoveringen over 1500 ppm (1711 ppm).



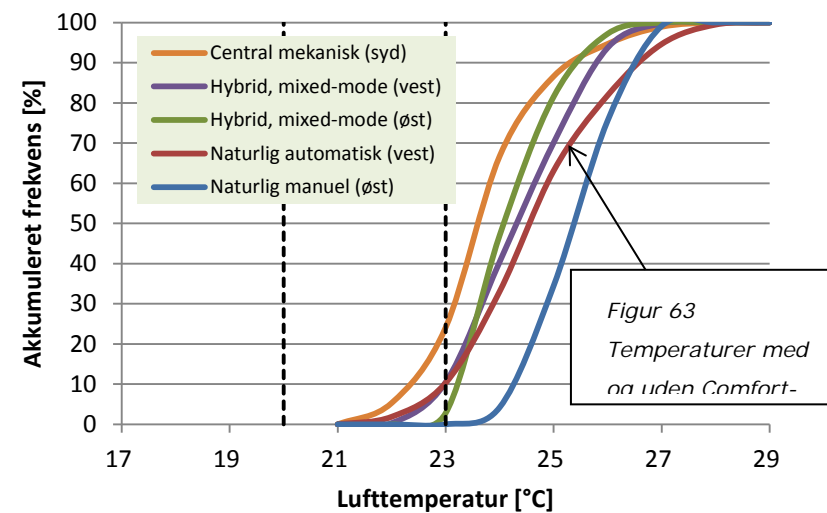
Figur 64 Sommerperiode. Hyppighed af lufttemperatur for forskellige ventilationsprincipper på Søndereskolen. Kilde: Gao et al., 2013a

10.6.1 Omkostninger

En-sidet naturlig ventilation har ingen etableringsomkostninger. Vinduerne findes i forvejen og serviceomkostningerne er en del af skolens almindelige bygningsvedligehold.

10.7 Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk, kombineret opdrift- og tværventilation

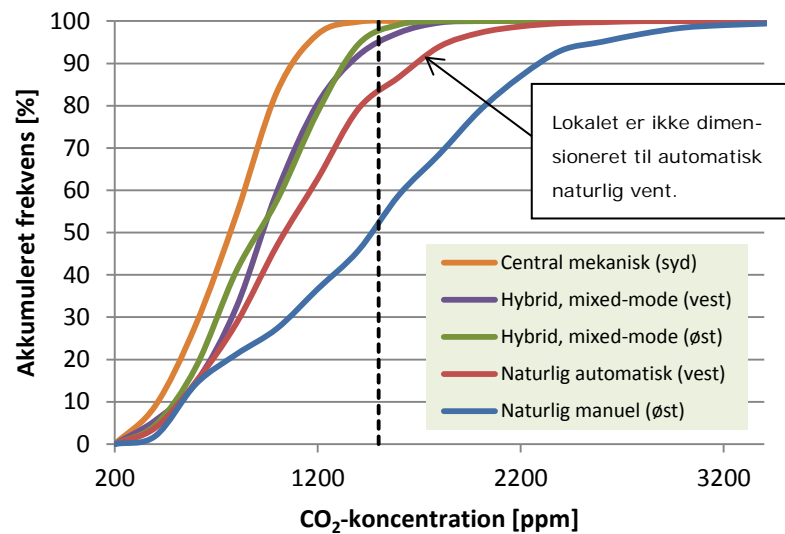
Tværvæntilation, som sker via to facader, har langt bedre ydeevne end en-sidet manuel ventilation og kan tillades i BR10 i nybyggede skoler, hvis der tages ekstraordinære hensyn. Disse nødvendige hensyn er uddybet i afsnit 3.1 side 22, men de inkluderer blandt andet at vinduesoplukket er automatisk styret efter rumsensorer.



Figur 63 CO₂-niveau med og uden Comfort-O-Meter. W/o cooling betyder uden mekanisk køling, Wargocki & Silva (2012)

Erfaringerne med denne form for ventilation er i skolesammenhænge relativt få. Der er etableret mange kontormiljøer med automatisk styring af vinduerne, og der findes også et antal skoler, men løsningen er af ukendte grunde mindre populær end de andre systemer. Blandt årsagerne kan være, at det er svært at styre åbningerne automatisk til alles tilfredshed i klasselokalet. Desuden må træk i korte perioder (5-10 min) påregnes, især som konsekvens af pulsstyring.

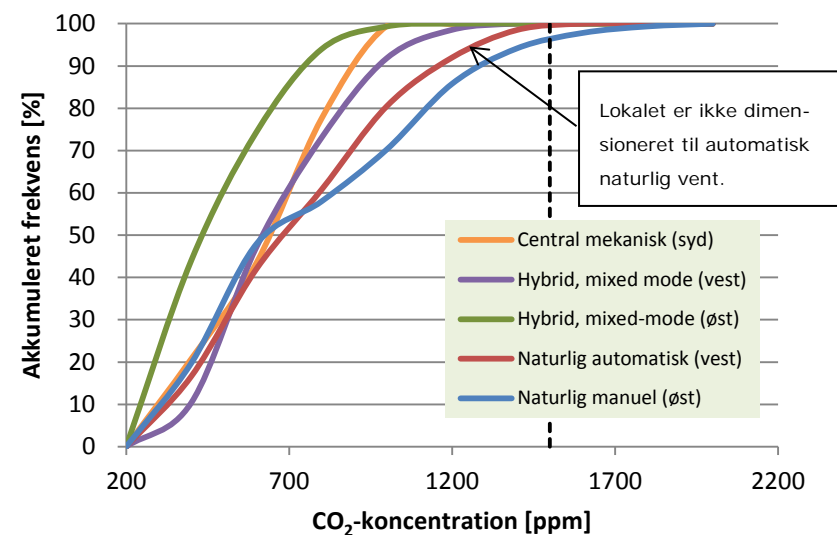
Figur 69 viser hvordan udviklingen i CO₂ som følge af pulsventilation er problematisk, fordi pulsene, udover at de genererer træk, ikke gennemskyller lokalet tilstrækkeligt indenfor de få minutter, som er acceptabelt. Anvendes særlige bygningsmæssige tiltag, f.eks. ved at øge rumvolumenet med 50 %, så viser Figur 69 at pulsventilation er til-



Figur 66 Sommerperiode. Hyppighed af CO₂-koncentrationer for forskellige ventilationsprincipper på Søndersøskolen. Kilde: Gao et al., 2013a

strækkeligt til at sikre luftkvaliteten. Åbnes vinduerne slet ikke, vil der efter 45 min være en CO₂-koncentration på 1800-2300 ppm afhængig af rummets personbelastning.

Vinduet skal derfor åbne flere gange under undervisningen. Figur 67 og Figur 66 viser luftkvaliteten ved forskellige ventilationsprincipper på Søndersøskolen. I sommerperioder er luftkvaliteten altid god uanset princip, men i vinterperioden opstår ofte høje CO₂-niveauer for de manuelt naturligt ventilerede lokaler. Lokalet med automatisk naturlig ventilation er ikke optimalt designet til denne ventilationsform, hvorfor det forventes at luftkvaliteten kan opnå samme niveau som i de mekanisk ventilerede rum, når rummet og vinduerne og styringen i øvrigt er designet til det og når detaljerede simuleringer har dokumenteret



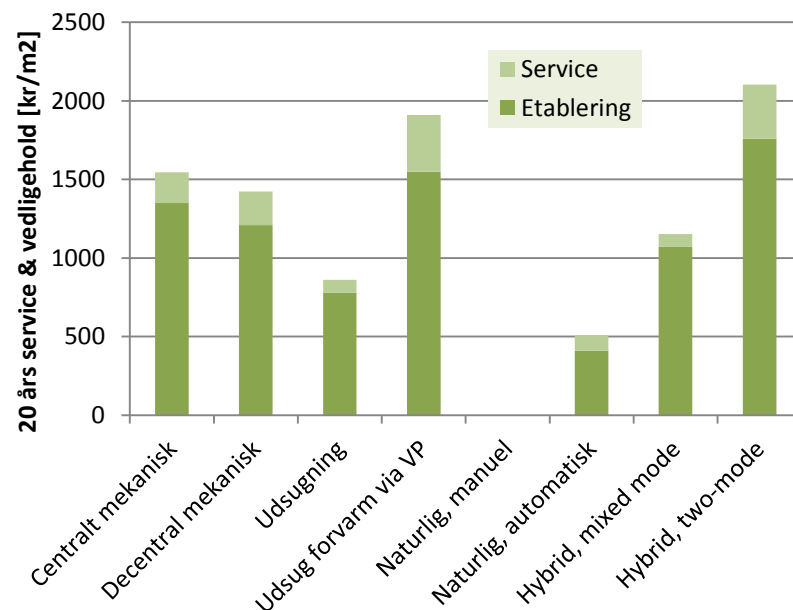
Figur 65 Vinterperiode. Hyppighed af lufttemperatur for forskellige ventilationsprincipper på Søndersøskolen. Kilde: Gao et al., 2013b

luftskiftet og trækrisikoen. I andre skoler end helt nye bør vinduesopluk altid suppleres med støtteventilator for at BR10's krav om maks. 1500 ppm CO₂ kan overholdes.

En meget almindelig fejl er at installere vinduesåbningerne ovenover radiatorerne og spare integrationen med varmeanlægget væk, således at radiatorerne reagerer uhensigtsmæssigt på hver vinduesåbning.

Det koster energi og kan endda skabe et uønsket feedback, hvis vinduerne også er temperaturstyrede.

Åbentstående vinduer om natten, af hensyn til nedkølingen af bygningen, inviterer desværre til indbrud eller hærværk, f.eks. ved at (brandfarlige) substanser kastes ind ad vinduet. (Interviewnoter 2012).



10.7.1 Omkostninger

Steiger et al. (2012) har detaljeret beregnet anlægsomkostningerne, som er ca. 410 kr/m². Serviceomkostningerne er relativt små, ca. 5-7 kr/m² pr. år (Interviewnoter, 2012).

10.8 Hybrid ventilation

Der findes i hovedsagen to former for hybrid ventilation i skolesammenhænge (for opfølgende beskrivelse, se afsnit 5.7):

1. Two-mode systemer, hvor både mekanisk balanceret ventilation og naturlig ventilation installeres
2. Mixed-mode systemer, hvor en udsugningsventilator understøtter den automatisk styrede naturlige ventilation

Figur 67 Vinterperiode. Hyppighed af CO₂-koncentrationer for forskellige ventilationsprincipper på Sønderøskolen. Kilde: Gao et al., 2013b

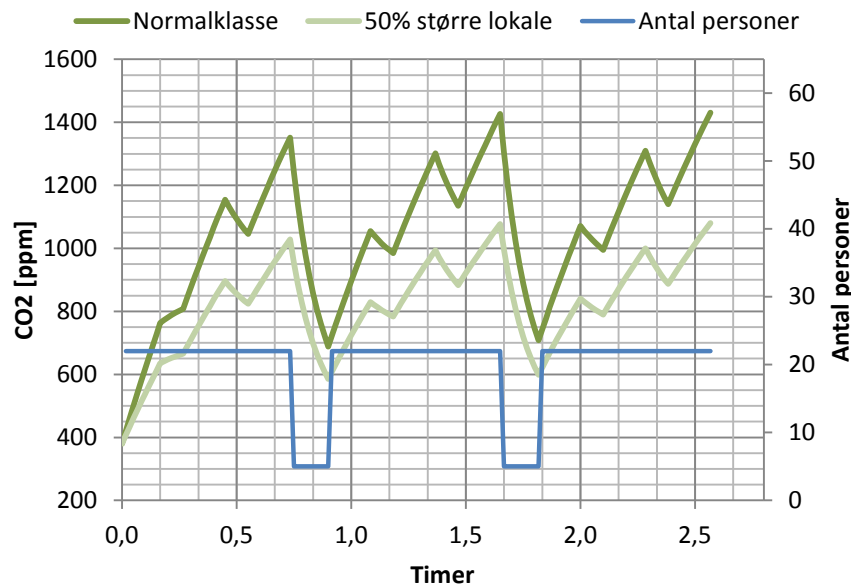
10.8.1 Two-mode hybrid

Førstnævnte består reelt af to separate systemer. Det mekaniske system ventilerer om vinteren og det naturlige om sommeren. Erfaringerne med separate systemer i skolesammenhænge er fåtallige. I kontormiljøer er erfaringerne gode (Aggerholm et al., 2008), når systemerne fungerer. Brugere føler større velvære, når de om sommeren selv kan åbne vinduerne og bestemme deres ventilation samtidig med at de undgår trækgener fra vinduesåbningerne, fordi det mekaniske system træder til om vinteren. Det er dog vigtigt at brugerne kan overstyre systemet, for træk opstår også om sommeren.

I praksis er det svært at integrere systemerne og især i overgangsperioder er det vanskeligt at beslutte hvilket system, der tilfredsstiller flest brugere, f.eks. når nogle føler trækgener om sommeren.

Åbentstående vinduer om natten, af hensyn til nedkølingen af bygningen, inviterer desværre til indbrud eller hærværk, f.eks. ved at (brandfarlige) substanser kastes ind ad vinduet. (Interviewnoter 2012).

Af hensyn til trærisikoen bør ventilationsåbningerne placeres under loftet mindst 2,7 m fra gulv, og af hensyn til ventilationseffektiviteten bør afstanden mellem indtag- og afkaståbninger ikke være mere end 4x rumhøjden (Hviid & Petersen, 2012). Ligeledes skal det overvejes om eksterne støjkluder (kørende eller gående trafik) eller forurening



Lokalet er ikke dimensioneret til automatisk naturlig vent.

(f.eks. biltrafik) vil forringe indeklimaet. Mht. støj findes nogle teknologier på markedet, se afsnit 11.7.7, side 105.

Med hensyn til omkostningerne, kræver two-mode hybrid at der installeres to ventilationssystemer. Etableringssummen bliver da: $1.350 + 410 = 1.760 \text{ kr/m}^2$. Der kan argumenteres for at størrelsen af det mekaniske system kan optimeres, fordi det ikke længere skal klare driften 100 %, og det giver plads til at vælge et mindre energieffektivt anlæg. Steiger et al. (2012) optimerer størrelsen og kommer frem til 1.290 kr/m^2 for et two-mode hybrid system.

To systemer skal serviceres og fungere, så summen af begge systemers serviceomkostninger er ca. $13\text{-}22 \text{ kr/m}^2$ pr. år.

10.8.2 Mixed-mode hybrid

Erfaringerne med sidstnævnte er relativt mange i skolesammenhænge. Essentielt ventileres klasselokalet naturligt via vinduesåbninger og ventilatoren skal kun understøtte i ekstremesituationer, hvor CO_2 -niveauet ikke kan overholdes. I praksis vil støtteventilatoren dog være aktiveret det meste af tiden.

De praktiske erfaringer med mixed-mode hybrid ventilation i skolesammenhænge er gode, men kombinationen af temperaturstyrede vinduer og placering af vinduesåbningerne over radiatorerne er uhenigtsmæssigt, fordi radiatorerne vil øge vandgennemstrømningen med varmespild til følge.

Åbentstående vinduer om natten, af hensyn til nedkølingen af bygningen, inviterer desværre til indbrud eller hærværk, f.eks. ved at (brandfarlige) substanser kastes ind ad vinduet. (Interviewnoter 2012).

Med hensyn til omkostningerne er mixed-mode hybrid en blanding af et udsugningsanlæg og et tværventilationssystem med automatisk vinduesopluk. Da kun vinduerne i én facade skal aktiveres, men automatikken er den samme, indregnes kun 70 % af prisen i den samlede pris. De samlede omkostninger bliver da $(780 + 70\% \text{ af } 410 =) 1.070 \text{ kr/m}^2$.

Serviceomkostningerne svarer til summen af serviceomkostningerne på et udsugningsanlæg samt 70 % af et system med automatisk

tværventilation. Da et udsugningsanlæg er meget lidt servicekrævende, er prisen ca. 5 kr/m^2 .

10.9 Evaluering af træk

Træk er årsag til store gener for de personer, der opholder sig i lokalet. Træk er knyttet sammen med rumtemperatur og ventilationsprincip og evalueringen relaterer ventilationsprincippet evne til at indblæse friskluft uden der opstår træk. Træk og trækrisiko måles i % og angiver antal utilfredse personer i et lokale som oplever træk.

Generelt er indblæsningshastighed, indblæsningstemperatur og evne til at medrive og blande sig med rumluften faktorer, som bestemmer trækrisikoen. Figur 70 angiver den generelle risiko for træk ved de forskellige ventilationsprincipper.

Der er altid en lille risiko for træk, men træk vil lejlighedsvist forekomme for ventilationsprincipper, der i kølige sæsoner anvender frisk-

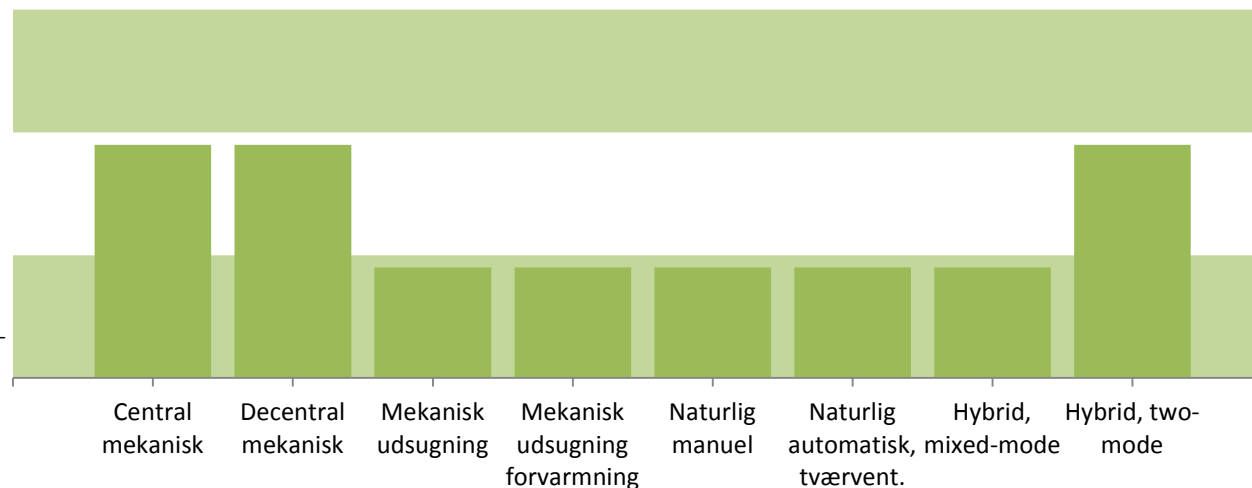
lufttilførsel gennem facadeåbninger eller som tilfører friskluften i nærheden af komfortzonen, uanset evt. forvarmning.

Figur 70 Opsummering af etablerings- og vedligeholdelsesomkostninger over en 20 års periode. Samme som Figur 10 side 22.

Uacceptabel
Forekommer

Figur 70 Evaluering af trækrisiko ved

Figur 70 CO₂-koncentration som føl-



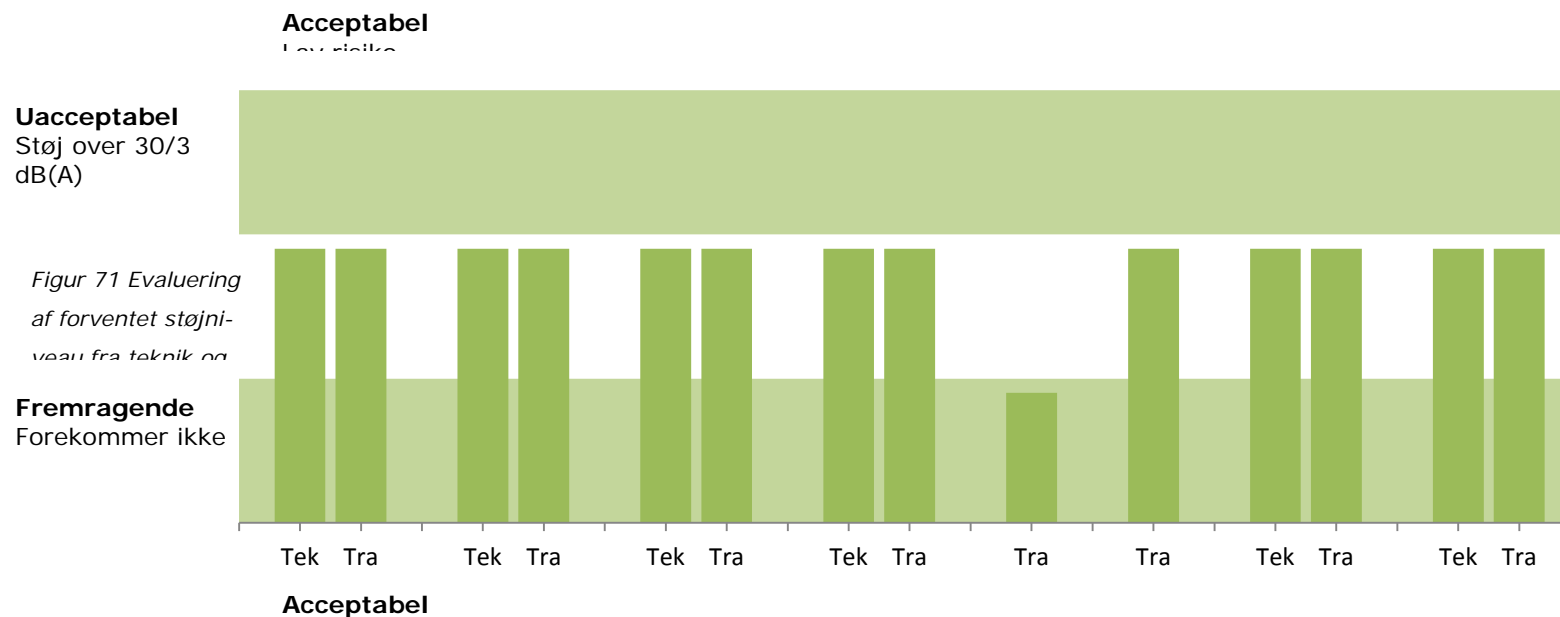
10.10 Evaluering af støj

Generelt producerer mekanikken i ventilationsanlæg støj, men kun ved under-dimensionering eller i tilfælde, hvor almindelig designpraksis ikke er fulgt, medfører det genererende støj for personer i lokalet. For konventionelle mekaniske ventilationsprincipper med ventilatorer er 30 dB(A) et krav i undervisningslokaler og der er ikke noget der tyder på at alle principper ikke kan opfylde det krav i en nyinstallation. For ventilationsprincipper uden ventilatorer, er den mekaniske støj ikke-eksisterende, men her er støj fra omgivelserne et større problem. I sammenligning med mekaniske systemer med et næppe hørbart støjniveau på 30 dB(A), vil åbne vinduer i klasselokalet generelt skabe flere støjrelaterede forstyrrelser i undervisningen fra udendørs kilder.

Disse støjkilder stammer dog ikke fra ventilationsmekanikken, som vi evaluerer på her.

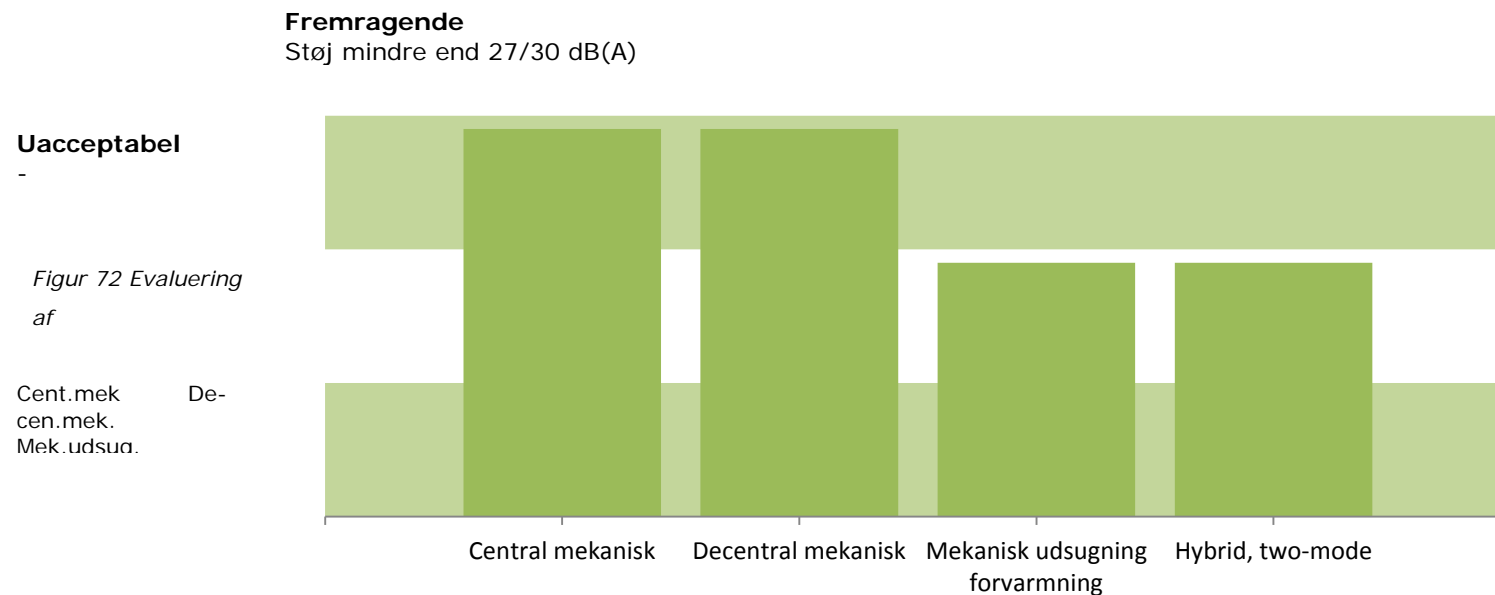
Et støjniveau på 27 dB(A) halverer den oplevede støj ift. 30 dB(A), og kræver omhyggelig implementering.

I afsnit 11.7.7 er der beskrevet et produkt, som kan anvendes til at reducere udefrakommende støj gennem facadeåbninger, men generelt kan naturlig ventilation ikke anbefales til skoler tæt på trafikerede veje pga. forurening.



10.11 Evaluering af filtrering

Filtre installeres i ventilationsanlæg for at filtrere partikler og urenheder fra. Ofte installeres en filtertype, som først og fremmest beskytter anlægget, men nogle typer filtre er også effektive overfor pollen og allergener (F7). Afhængig af filterkvaliteten fjernes også en del ultrafine partikler fra indblæsningsluften, men bedre filtreringsevne medfører også større elforbrug til ventilatorerne. Det er et lovkrav at installere filtre i mekanisk drevne ventilationsanlæg, men ikke for ventilationsprincipper med facadeåbninger til det fri. Hybrid two-mode er et særtilfælde, fordi vinterventilationen er med filtrering, men sommerventilationen er uden.

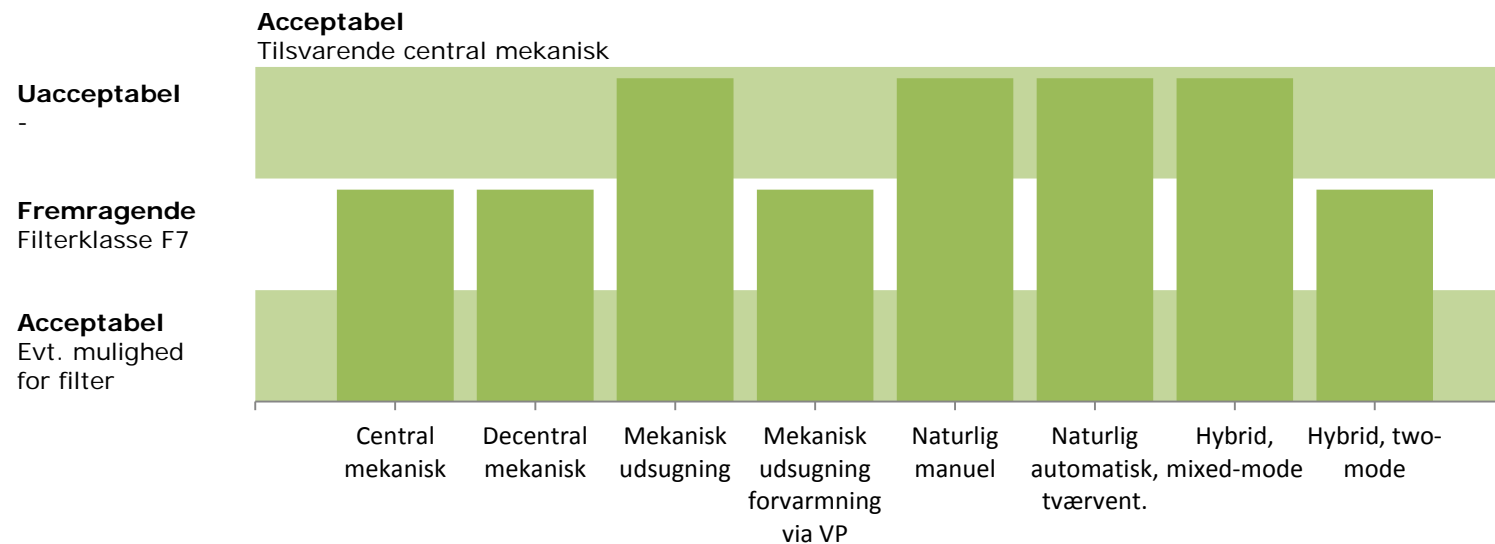


10.12 Evaluering af etableringsomkostninger

Etableringsomkostningerne dækker anlægsomkostningerne. Referencen er central mekaniske systemer med en etableringsomkostning iflg. analysen på ca. 1.350 kr per kvadratmeter klasselokale inkl. styring. Prisen forudsætter en egnet bygningstypologi, som sikrer tilstrækkelig plads til kanaltræk og placering af aggregat, og at bærende elementer kan efterlades urørte. Simplere ventilationsprincipper er billigere, såsom simple mekaniske udsugningssystemer såvel som naturlig ventilationssystemer. Monteres en varmepumpe (VP) på udsugningsluften, som genvinder varmen til centralsystemet, er det en fordyrende omstændighed, som giver sig udslag på figuren.

Decentral mekanisk ligger indenfor samme etableringsomkostning som centrale systemer med priser omkring 1.200-1.400 kr/m² afhængig af klassekvotienten. Decentrale systemer kræver mindre plads end centrale systemer og fungerer med alle bygningstypologier.

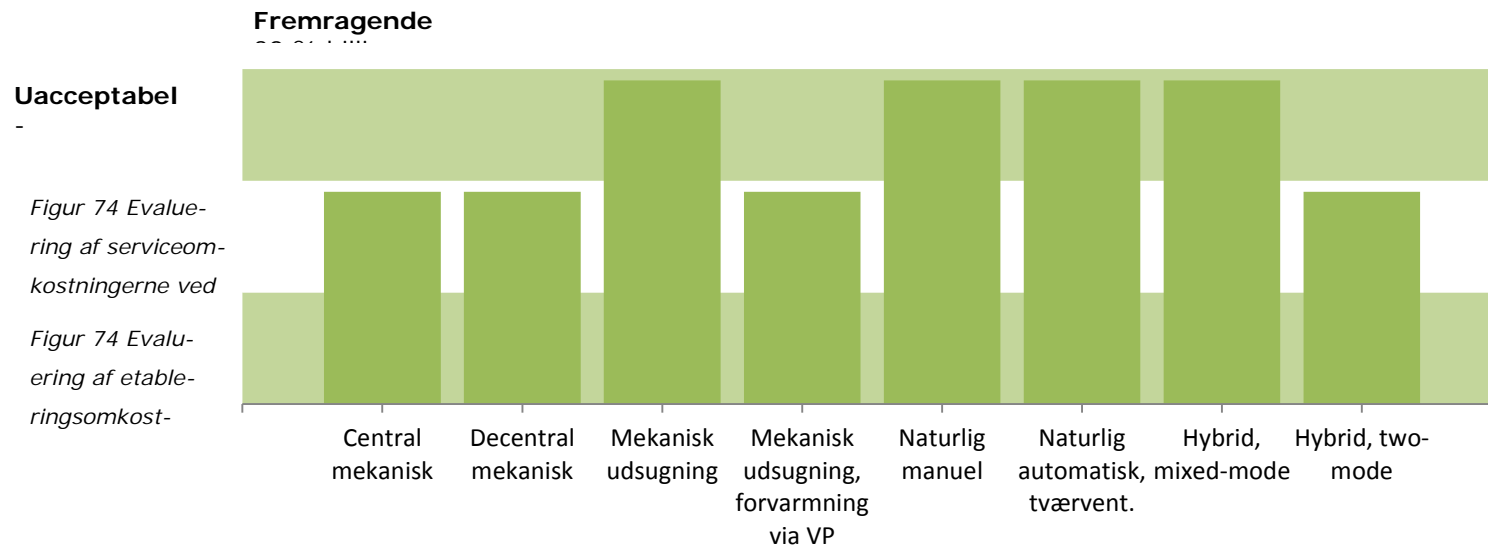
Two-mode hybrid fordrer installation af både et naturligt ventilations-system samt et mekanisk. Dermed er denne løsning den dyreste at implementere.



10.13 Evaluering af vedligeholdelsesomkostninger

Vedligeholdelsesomkostningerne dækker servicering og regelmæssig udskiftning af filtre. Referencen er central mekanisk ventilationsanlæg med filterskifte 2 gange årligt. Via en serviceaftale lander serviceomkostningen på ca. 8-15 kr/m² i et system, som forsyner klasselokaler. Decentrale systemer har umiddelbart en serviceomkostning på cirka det samme, 13 kr/m², som inkluderer filterskift, men decentrale systemer vil være dyrere end centrale systemer i det lange løb, fordi antallet af komponenter, som kan fejle, er flere gange større.

Simple principper drevet naturligt eller af en enkelt ventilator er billige at servicere. Naturlig automatisk har f.eks. en servicepris på ca. 5-7 kr/m², altså 30 % billigere end central mekaniske anlæg.



11 Markedsmodenhed

Sammenkoblingen af et byggeprojekt og et ventilationsprojekt til et færdigt system, som opfylder byggeprogrammet, er en kompleks proces.

Kompleksiteten opstår især fordi mange forskellige aktører, bygherre, ventilationsrådgiver, brandrådgiver, hovedentreprenør, underentreprenør, montør, automatiktekniker og driftsleder, er involveret i processen.

Denne proces medfører (altid) et antal fejl i ethvert nyinstalleret ventilationsanlæg, som kan være svære at identificere eller kontrollere for. Optimalt set bliver fejlene rettet løbende i den første driftsperiode,

men erfaringsmæssigt kan graverende fejl bestå i adskillige år efter nyinstallation.

I skolesammenhæng anses et ventilationssystem/koncept som markedsmodent, når den samlede ventilationsindustri er i stand til at levere et produkt, som i hovedsagen opfylder byggeprogrammet allerede fra første driftsdag. I andre sammenhænge, f.eks. domicilbyggeri, hvor bygherre ønsker at anvende en større sum penge på ventilationskonceptet og specialistkompetencer, kan mere komplekse systemer (hybride systemer) betragtes som markedsmodne.

For at opsummere, er et produkt markedsmodent, når det har været på markedet i tilpas mange år til at alle aktører i processen har vundet erfaring i installation og drift af det pågældende system, så graveren-

de fejl enten undgås eller hurtigt rettes. Hybride systemer, som nødvendiggør integration af flere kompetencer og/eller specialitydelser, vil, i skolebyggeri, kun forefindes i prestigebyggerier.

Af de systemer, som er omtalt i rapporten, anses de følgende som markedsmodne, dvs. et nogenlunde ensartet produkt og ydelseskvalitet kan forventes ved hver nyinstallation:

- Central balanceret mekanisk ventilation med VAV-styring
- Decentral ventilation
- Udsugningsventilation
- Udsugningsventilation med forvarmning i facaden

- Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk

Hybrid ventilation findes i mixed-mode og two-mode konfigurationer. Selvom især two-mode er interessant i skolesammenhænge, findes der desværre ikke, for den kombinerede two-mode-løsning, nogen ansvarsvillig operatør på markedet. For mixed-mode systemer findes flere.

11.1 Central balanceret mekanisk ventilation

Mekanisk ventilation med varmeveksling og med VAV-kontrol på klasselokaleniveau kan betragtes som markedsmodent og fuldt kommercialiseret.

Installation af elektrisk køling i skolebyggeri har forfatterne ikke kendskab til; det anses for at være for dyrt, men kommercielt er det fuldt markedsmodent.

Natventilation hvor lokalerne køles ned med kølig natteluft kan bidrage betydeligt til komforten i sommerperioder (Hviid & Petersen, 2012). Tilføjelse af automatik til natventilation anses også som fuldt markedsmodent, men natventilation fordrer et energieffektivt anlæg, hvis elforbruget ikke skal blive for stort.

11.2 Decentral ventilation

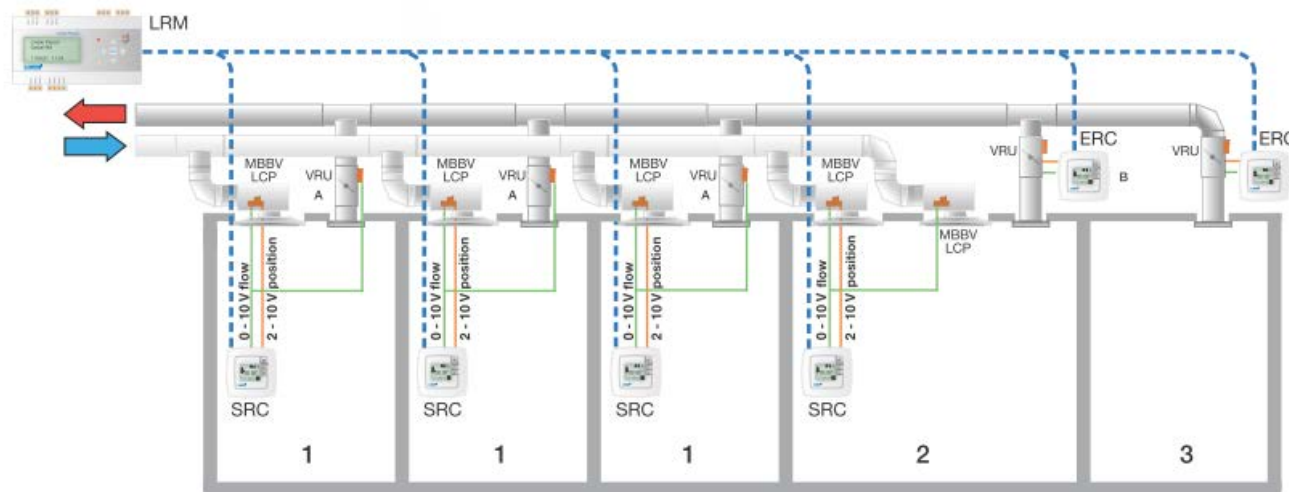
Decentral ventilation kan betragtes som fuldt markedsmodne. De har eksisteret, især i skolesammenhænge, i mange år, fordi fordelene er

indlysende i renoveringssammenhænge. Decentrale enheder giver fuld ventilation af eleverne med varmegenvinding, meget lavt elforbrug og automatisk overholdelse af brandkrav. Ulemperne er nødvendigheden af en del gennemføringer i facade eller tag.

I Danmark drives produktudvikling og service især af én markedsoperatør.

11.3 Udsugningsventilation evt. med forvarmning i facaden

Udsugning er den simpleste form for ventilation og dermed den nemmeste og billigste at implementere. Varmefladerne i facaden, til trods for diverse automatiske systemer, stiller ret høje krav til driftsperso-



Acceptabel
Tilsvarende central mekanisk

nalets og installatørens viden og agtpågivenhed for at undgå frostsprængning. Varmefladerne er fuldt markedsmodne, men enten på grund af menneskelige fejl eller fordi automatikken svinger, frostsprænger de fortsat, især i kolde vinterferier.

11.4 Naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk

Naturlig ventilation med automatisk styring af vinduesopluk efter luftkvalitet (CO₂) og temperatur er fuldt markedsmodent og kommercialiseret, men hovedsageligt drevet og styret af én markedsoperatør.

11.5 Hybrid ventilation, mixed mode

'Hybrid ventilation' er den konventionelle term, som anvendes når både naturlig ventilation med automatisk vinduesopluk og mekanisk

ventilation indbygges i samme bygning. Virker ventilation som udsugningsventilation, er systemet simpelt, og afprøvet i et antal skoler. Markedsmodenheden er derfor ok, men markedet er domineret af én operatør, som derfor besidder specialkompetencerne.

11.6 Hybrid ventilation, two-mode

Samme som mixed-mode, men systemerne fungerer med separate komponenter og separat automatik. Der skiftes manuelt fra et system til et andet, imellem sommer- og vinterperioder

Fordele er klare, mindre elforbrug til ventilatorer, men uden at tabe muligheden for varmegenvinding.



Fremragende
30 % billigere

Two-mode konfigurationen findes i kontorbyggerier, men til skolebyggerier er markedsmodenheden endnu på udviklingsstadiet, da succesfuld implementering kræver specialistkompetencer. Løbende produktudvikling foretages dog, især af én markedsoperatør, bl.a. med komponent- og automatikintegration. Afsnit 11.7.6 omtaler mere detaljeret det nuværende produktudviklingsstadium.

Konceptet har et stort potentiale i skolesammenhænge, da det kombinerer naturlig ventilation om sommeren, som er foretrukket af eleverne (Wargocki, 2012), samt besparelser på varme- og elregning i forhold til et fuldt mekanisk anlæg.

Natventilation kan indbygges nemt i automatikken, så klasselokalerne får opbygget en kølebuffer til de varmeste sommerdage.

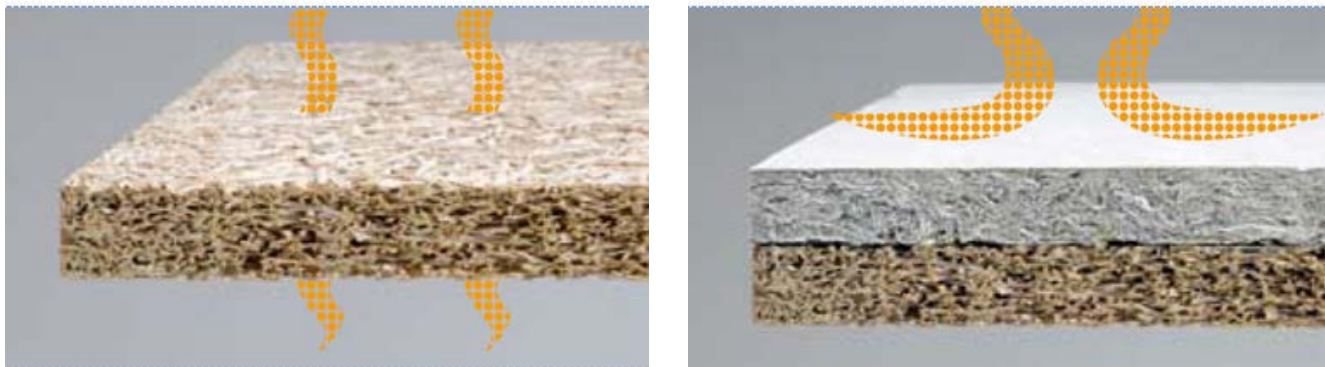
11.7 Nye teknologier på det danske marked

Nye ventilationsteknologier på det danske marked er kendetegnet ved at de udvikles for at mindske energiforbruget og for at lette implementeringen. De nye og interessante teknologier/koncepter befinder sig på forskellige stadier af kommercialisering, men det kommenteres her.

11.7.1 Mekanisk ventilationsstyring

På VAV systemer udvikles og markedsføres så småt en mere avanceret styring, som erstatter den traditionelle trykstyring efter fast sæt punkt med dynamisk regulering af tryksætpunktet efter behovet for

Figur 75 Principdiagram over Lindab Pascal produkt til dynamisk trykstyring



luft (Taylor, 2007). Princippet kendes fra Californien, men markedsføres nu på det danske marked, se Figur 76. Eksempler på produkter:

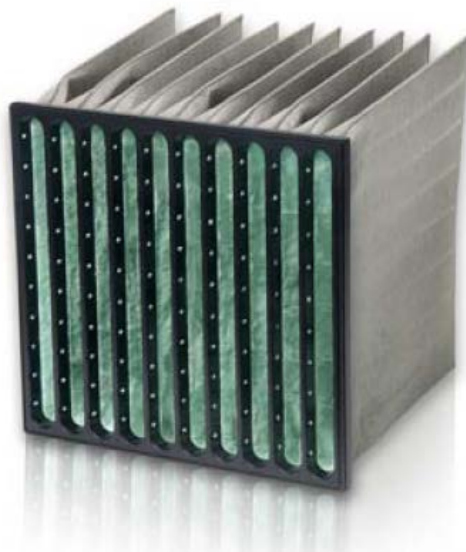
- Lindab Pascal produkt
- LeanVent, Dynamic Static Pressure Reset boks
- Belimo Ventilator Optimiser

Kendetegnende ved produkterne er også at de medfører en øget automatiseret styring til gavn for anlægsdriften; i princippet uden samtidig at øge kompleksiteten.

11.7.2 Spjæld

Spjæld regulerer luftstrømsmængden til forskellige grene af ventilationssystemet. For at virke effektivt skal trykfaldet over spjældet være af en vis størrelse, f.eks. 30-50 Pa. Desuden er reguleringen kun effektiv for et relativt lille interval af spjældets åbningsgrad, hvilket forhindrer udviklingen frem mod systemer med lavere tryk og lavere energiforbrug.

Dråbespjæld eller kuglespjæld udvikles og sælges af LeanVent, se Figur 77. Disse spjæld er aerodynamisk optimeret og kan derfor regulere stabilt med et trykfald på kun 5 Pa (Terkildsen, 2012).



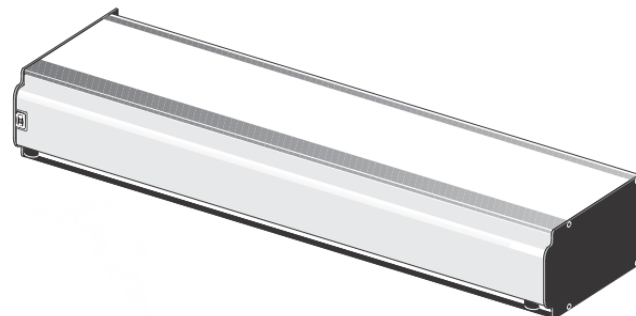
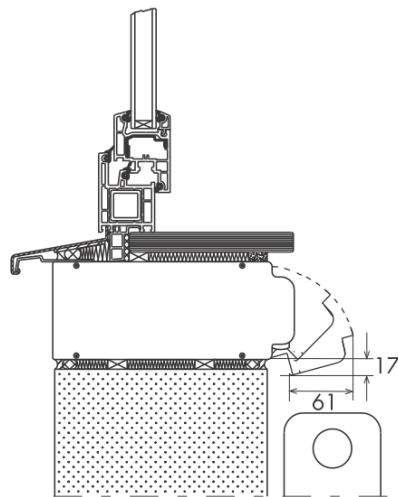
Figur 77 Troldekt akustikplader, som er luftgennemtrængelige (t.v.) eller uigennemtrængelige (t.h.).
Kilde: www.troldekt.dk



Figur 76 Dråbespjæld. Kilde: www.leanvent.dk

11.7.3 Luftfiltrering med elektrostatiske filtre

Mange københavnske skoler er udsat for ultra-fine partikler fra dieselbilernes udstødning. Ny filterteknologi billiggør filtrering af indtagsluften i bymiljøer mod udstødningspartikler og -gasser. Figur 79 viser et F7 filter med en belægning af aktivt kul, som reducerer lugtgener fra trafik. Figur 78 viser et elektrostatiske filter, som ved hjælp af strøm lader luftens fremmedpartikler og -molekyler. De ladede partikler sætter sig fast på kollektorplader, som skal vaskes engang imellem. Fordelen ved et elektrostatiske filter er at tryktabet er lille, og at filteret ikke bliver fyldt op over tid med større tryktab til følge. Filteret kan fjerne op til 99 % af de ultra-fine partikler. I Danmark anvendes de næsten ikke til komfortfiltrering, mens de er mere almindelige i USA,



Figur 78 Elektrostatiske filter. Fjerner 95-99 % af de ultra-fine partikler. Elforbrug 9-16 W. Kilde: www.automatikprodukter.se

Tyskland og Sverige. Flere erfaringer og nogle testkørsler i dansk regi er dog nødvendigt før deres gennembrud til komfortventilation.

11.7.4 Indblæsning via nedhængt ventilationsloft

Næsten alle institutioner har et nedhængt loft af hensyn til akustikken, men ny forskning viser, at loftet kan gives en dobbeltfunktion som ventilationsloft, hvor luften fordeles og spredes ud til klasselokalet gennem de små akustikperforeringer.

Konventionelle armaturer kræver et trykfald på 20-50 Pa for at virke optimalt. Tryktabet gennem ventilationsloftet er 2-3 Pa.

Yderligere produktudvikling kræves fra producenternes side og mere forskning skal klarlægge performance under alle forhold og besvare

uafklarede spørgsmål, så som hvordan indblæsningen over loftet sker mest optimalt, er der situationer med tilbagetræk gennem loftet, er luftfordeling ujævn til skade for ventilationseffektivitet osv.

P.t. udvikler og sælger Troldtekt et produkt som er gennemtestet med positive resultater.

Fordelen ved ventilationsloftet er færre kanaler i klasselokalerne, hurtigere etablering og mindre tryktab.

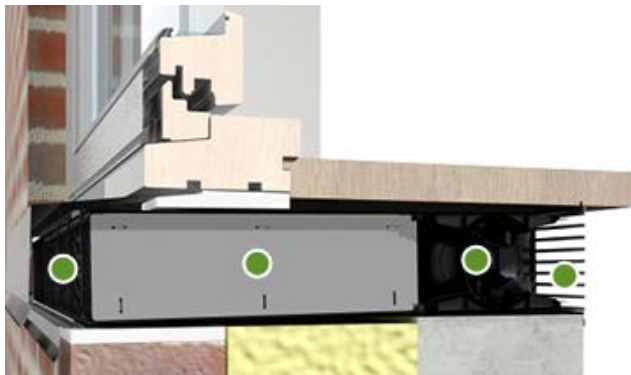
11.7.5 Mikroventilation

Mikroventilation er kendetegnet ved at ventilationen tilvejebringes med specielle decentrale aggregater. Aggregatet ventilerer kun et

(lille) lokale og er så småt, at det kan indpasses under eller over vinduet.

Der kun er meget få erfaringer med i Danmark. I Sverige er markedet mere udviklet, f.eks. opsummerer Zinn & Stigsson (1993) seks produkter på det svenske marked. De findes også på det tyske marked, se Figur 81.

Der findes typer med konventionel virkemåde, dvs. blot som et nedskaleret decentralt rumaggregat, se Figur 81, eller med en virkemåde, hvor enhederne i modstående facader arbejder sammen om at ventilere rummet. Sidstnævnte har regenerativ varmegenvinding, dvs. luftstrømmen vendes hvert ½-5 min. Manz et al. (2000) udførte forsøg med denne type, med succes og firmaet InVentilate udvikler p.t.



Figur 79 Kombineret fin- og kulfilter til komfortfiltrering af trafikgasser. Kilde: www.camfilfarr.dk

en løsning, MicroVent, se Figur 81, til det danske marked. Mens potentialet er stort til især mindre kontorer er der dog uafklarede spørgsmål mht. trækgener og vindpåvirkelighed. Til skoleventilation er luftbehovet umiddelbart for stort til at det realistisk kan dækkes af mikroaggregaterne ligesom trækgenerne ligner dem for udsugningsløsninger med forvarmning i facaden.

11.7.6 Hybrid ventilationsstyring

Indenfor hybrid ventilation er udfordringen at sikre en gnidningsløs integration mellem naturlig drift, kombineret drift og mekanisk drift, når parametre som indetemperatur, CO₂-niveau og udeklima ændrer sig. Til formålet har firmaet WindowMaster udviklet en dedikeret hybrid ventilationsstyring, som kan varetage den samlede, hybride sty-

ring i anlæg, hvor der både er naturlig og mekanisk ventilation i klasselokalet. Systemet fungerer sammen med de fleste udsugningsventilatorer på markedet (til etablering af et mixed-mode hybrid system) – og med balancerede ventilationsaggregater til etablering af et two-mode hybrid system. Sidstnævnte mulighed fungerer dog p.t. kun med aggregater fra Exhausto.

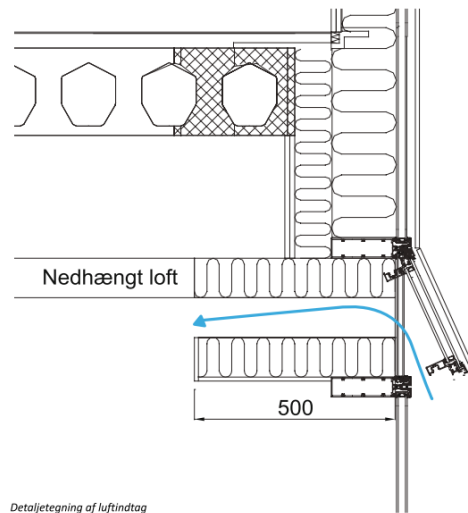
11.7.7 Støjdæmpende vinduesåbninger

Udefrakommende støj fra åbne vinduer er problematisk. Nogle klasselokaler er placeret ud til støjende trafik, andre ud til skolegårde eller bygningspassager med gående trafik. Mens kørende trafik medfører behov for filtrering og dermed ofte udelukker vinduesåbning, kan støj fra skolegårde være et særdeles forstyrrende element i andre klasse-



Figur 80 Tysk decentralt miniventilationsaggregat, model Aeromat til montage under eller over vinduet. Kilde: www.siegenia-aubi.com

lokaler. Der kendes ikke nogle implementeringer i skolemiljøer, men til kontormiljøer har firmaet WindowMaster udviklet lyddæmpende åbninger til både facader og tagopluk, se **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** Målinger i et kontorlandskab placeret ved motorvej konstaterer et lydniveau med fuldt åbne facade- og tagopluk, som ligger 20-25 dB under lydniveauet udenfor. Til skolegårde og gangpassager på skoleområder (ej med legende børn) anser forfatterne lignende dæmpning som tilstrækkeligt til at opnå 33 dB indenfor. Det bør bemærkes at lydslusen kan være en æstetisk udfordring og at den tager lidt dagslys fra vinduet.



Figur 81 Mikroventilationsaggregat med regenerativ varmegenvinding. Kilde:

12 Referencer

- Aggerholm, S., Heiselberg, P., Bergsøe, N.C. (2008). Hybrid ventilation i kontorer og institutioner, 1. udg., Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, Hørsholm
- Andersen, K.T., Heiselberg, P., Aggerholm, S. (2002). Naturlig ventilation i erhvervsbygninger – Beregning og dimensionering, By og Byg Anvisning 202, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm
- Bakke, J.V., Bruun, C. (2012). Lack of professional facility management is a main cause of bad indoor environment, lowered productivity and health in Norwegian public schools, Proceedings of Healthy Buildings 2012, 8-12. juli, Brisbane, på CD ROM
- Be10, version 6.11.11.24, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm
- Blichfeldt, P. (2007). Godt skolebyggeri. Branchevejledning om godt skolebyggeri, Arbejdsmiljøsekretariatet, Branchearbejdsmiljørådet, København
- Bygningsreglementet BR10 (2012), Energistyrelsen, <http://www.bygningsreglementet.dk>
- CIBSE (1997). Natural ventilation in non-domestic buildings, Applications Manual AM10. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London

DS/EN 13779 (2007). Ventilation i bygninger ikke beregnet til beboelse - Ydeevnekrav til ventilations- og rumkonditioneringsanlæg, 2. udg., Dansk Standard

DS/EN 779 (2012). Partikelluftfiltre til generel ventilation – Bestemmelse af filtreringsegenskaber. Dansk Standard

DS 428 (2011). Norm for brandtekniske foranstaltninger ved ventilationsanlæg, Dansk Standard

DS 447 (2013). Ventilation i bygninger – Mekaniske, naturlige og hybride ventilationssystemer, under udarbejdelse, Dansk Standard

DS 474 (1993). Norm for specifikation af termisk indeklima, Dansk Standard

Energiledelsesordningen ELO, www.energiwiki.dk

Modelprogram for folkeskoler (2010). Erhvervs- og Byggestyrelsen og Realdania

Gao, J., Wargocki, P., Wang, Y. (2013a). Ventilation system type and the resulting classroom temperature and air quality during non-heating season, proceedings of Clima 2013, Prague, June 16-19.

Gao, J., Wargocki, P., Wang, Y. (2013b). Ventilation system type and the resulting classroom temperature and air quality during heating season, proceedings of ISHVAC2013, Xi'an, October 19-21

Gilling, A., (2003). Økologiske løsninger i naturligt ventileret skolebyggeri. Oplag 33 af Økologisk byfornyelse og spildevands-rensning, Miljøstyrelsen

Gunnarsen, L., Thomsen, K.E., Johnsen, K., Kristensen, L.S., Andersen, K.T., Traberg-Borup, S. (2001). Energieffektive skoler - forundersøgelser om opvarmning, ventilation og lyskvalitet, By og Byg Resultater 003, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm

Gunnarsen, L. (2001). Reduceret energiforbrug til skoleventilation, By og Byg Resultater 004, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm

Heiselberg, P. (red.) (2002). Principles of Hybrid Ventilation. IEA Energy Conservation in Buildings and Community System Programme,

Annex 35: Hybrid ventilation in new and retrofitted office buildings, Aalborg University, Denmark

Hviid, C. A., Petersen, S. (2012). Implementation of ventilation in existing schools – a criteria list towards passive schools, PassivHouse Symposium, 5. Okt., Bruxelles, 178-187

Hviid, C.A., Svendsen, S. (2012). Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets, Energy and Buildings 56, 160-168

Hviid, C.A., Terkildsen, S. (2012). Experimental study of diffuse ceiling ventilation in a classroom, AIVC conference, 10-11. okt., København, 186-190

Hvenegaard, C. (2007). Den lille blå om ventilation, 2.udg., Dansk Energi

Interviewnoter 2012. Hviid, C. A.

Kirkeby, I., Nielsen, P.A., Thomsen, K.E., Valbjørn, O. (2001). Sunde skoler – indeklimateforhold i undervisningsrum og institutioner for børn, By og Byg Resultater 015, Hørsholm

Klassekvotienter i grundskolen 2011. NYT fra Danmarks Statistik nr. 324, 21. juni 2012, <http://www.dst.dk/pukora/epub/Nyt/2012/NR324.pdf>

Kumagai, K. et al. (2008). Ventilation in Japanese schools, Indoor Air, Copenhagen, PaperID: 1075

Litiu, A. (2012). Ventilation system types in some EU countries, The REHVA European HVAC journal, vol. 49 (1)

Lüftung von Schulen (2011). FGK status report, Fachverbandes Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen, Tyskland, www.fgk.de

Manz, H., Huber, H., Schälín, A., Weber, A., Ferrazzini, M., Studer, M. (2000). Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery, Energy and Buildings 31, 37-47

Marxen, C., Knorborg, R.B., Hviid, C.A., Wargocki, P. (2011). Hvad koster et godt indeklima på folkeskoler?, HVAC Magasinet (9), p. 40,42,44,49.

Masseeksperiment (2009). Indeklima i klasselokaler. Faglig rapport, eds. Andersen, B., Clausen, G., Larsen, E.M., Menå, H.R.
<http://www.formidling.dk/graphics/DNF/skole/Festival/Masseeksperiment/2009/FagligRapportMasseX2009.pdf>

Menå, H.R., Larsen, E.M. (2010). Indoor environment in schools, Master thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Dept. of Civil Engineering, DTU

Mysen, M., Schild, P., Drangsholt, F. (2010). Robustness and true performance of demand controlled ventilation in educational buildings – Review and needs for future development, AIVC Conference, 26-28. okt., Seoul, paperID: 7B-1

Educational Buildings – Review and Needs for Future Development

Steiger, S., Roth, J.K., Østergaard, L. (2012). Hybrid ventilation – the ventilation concept in the future school buildings? AIVC Conference 10-11. okt., København, 204-209

Taylor, S. (2007). Increasing efficiency with VAV system static pressure setpoint reset, ASHRAE Journal, June 2007

Teknologikatalog (1995). Energibesparelser i den offentlige sektor, Energistyrelsen, København K,
http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Energipolitik/Danmarks_Energifremtider_96/enofsekt.pdf

Terkildsen, S. (2012). Personlig kommunikation. DTU Byg, Sektionen for Bygningsfysik og Installationer

Toftum, J., Wargocki, P., Clausen G. (2011). Indeklima i skoler – Status og konsekvenser, FOA - Fag og arbejde, p. 28.

Valbjørn, O., Aggerholm, S. (1989), Luftkvalitet i nyere skoler uden mekanisk ventilation, SBI-rapport 202, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm

VENT-ordning (2012). <http://www.goenergi.dk/offentlig/produkter/-ventilation-koeling-og-motorer/ventilation/resultater-af-ventilations-tjek>. Online december 2012

V&S prisbøger (2012). Renovering og Drift Brutto, V&S Byggedata A/S, Ballerup

Wargocki, P. (2012). Om temp.effekten på vinduesåbning. Præsentation, AIVC konference 10-11. okt. København

Wargocki, P., Silva, N. (2012). Use of CO2 feedback as a retrofit solution for improving air quality in naturally ventilated classrooms, Proceedings of Healthy Buildings 2012, 8.-12. juli, Brisbane, på CD ROM

Wargocki, P., Wyon, D. P. (2006). Effects of HVAC on student performance, ASHRAE Journal, Oktober, 22-28

Wyon, D.P., Wargocki, P., Toftum, J., Clausen, G. (2010). Classroom ventilation must be improved for better health and learning, REHVA Journal, 47(4), 35-39

Zinn, L., Stigsson, C. (1993). Mikroventilation – et värmväxlande rumsaggregat, Lunds Universitet, Lunds tekniske högskola, Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, Rapport TABK—93/5004

12.1 Online kilder

Airmaster, www.airmaster.dk

Bygningsreglementet, Energistyrelsen, www.bygningsreglementet.dk

Camfil Farr, www.camfilfarr.dk

Exhausto, www.exhausto.dk

Go' Energi, www.goenergi.dk

IKM, www.ikm.dk

InVentilate, www.inventilate.dk

Leanvent, www.leanvent.dk

Rådgivningstjenesten for Skolebyggeri, www.skolebygger.dk

Systemair, www.systemair.dk

WindowMaster, www.windowmaster.dk

13 Begrebsforklaring

Listen beskriver hvilket indhold, som er lagt i termerne i *denne* rapport. Generelt er det sammenfaldende med opfattelsen i ventilationsbranchen, men kan afvige.

Afkastluft	den luftmængde, som kastes bort gennem udvendig rist eller hætte, se også indblæsningsluft, indtagsluft og udsugningsluft
Armatur	fordeler luften i rummet i et bestemt spredningsmønster, ofte den synlige del af et ka-

Anemostat

BR95

BR06

BR08

BR10

nalsystem. I ventilationssammenhænge kaldes det også anemostat

se armatur

Bygningsreglement fra 1995-2006

Bygningsreglement fra 2006-2008

Bygningsreglement fra 2008-2010

gældende bygningsreglementet med ikrafttræden jan. 2010

BR15	sandsynligt bygningsreglement med ikrafttræden jan. 2015. Svarer til lavenergiklasse 2015 i BR10	Balanceret ventilation	både indblæsningen og udsugningen sker med samme luftmængde, meget ofte ved forceret ventilation; i modsætning til udsugningsventilation
BR20	sandsynligt bygningsreglementet med ikrafttræden jan. 2020. For offentlige bygninger i 2018. Svarer til lavenergiklasse 2020 i BR10	Decentral ventilation	luftudskiftningen i et rum tilvejebringes med et ventilationsanlæg placeret i rummet eller i umiddelbar tilknytning til rummet
CAV	constant-air-volume, benævnelse for et ventilationsanlæg med konstant luftstrøm med mindre det er slukket, i modsætning til VAV	Diffus ventilation	ventilationsform, hvor luften tilføres lokalet gennem perforerede loftsplader. Resultatet er meget små lufthastigheder og dermed meget lille trækrisiko
CO ₂	kuldioxidindhold i luften, anvendes som indikator for luftkvaliteten, måles oftest i ppm		

Fortrængningsvent.	ventilationsform, hvor frisklufttilførslen til lokalet sker i gulvniveau. For at virke optimalt skal tilførselsluften være en smule underafkølet og nærzonen til armaturet være fri for siddende personer, se opblandingsventilation	Hybrid ventilation	ventilationssystem, som anvender forceret og naturlig ventilation enten i separate systemer eller i blandingssystemer
		Indblæsningsluft	den luftmængde, som blæses ind i et lokale, se også afkastluft, indtagsluft og udsugningsluft
Friskluftventil	spalteåbning i vinduer, som tillader et naturligt luftskifte	Indtagsluft	den luftmængde, der tages ind gennem en udvendig rist eller hætte, se også afkastluft, indblæsningsluft og udsugningsluft
Forceret ventilation	luftudskiftning ved hjælp af elektrisk drevne ventilatorer		
Genvinding	se varmegenvinding		

Kortslutning	betegnelse, når en del af indblæsningsluften suges ud inden den har cirkuleret i lokalet og ventileret personerne	Luftskifte	term som beskriver hvor tit luften i et lokale erstattes med frisk luft, måles i luftskifte per time (h-1). Afhænger af luftmængde og rummets volumen
kWh	kilowatttime, måler den forbrugte energi som et effektoptag over en tidsperiode (1 time), se effektoptag	Mekanisk ventilation	forceret ventilation, dvs. luftudskiftningen drives af ventilatorer
Lufthastighed	hastighed, som luften bevæger sig rundt i lokalet med. Influencer trækrisikoen, måles i m/s	Naturlig ventilation	luftudskiftningen er drevet af drivkræfter, som opstår naturligt i og omkring en bygning
Luftmængde	luftstrøm, måles i m ³ /h, m ³ /s eller l/s	Natventilation	ventilation udenfor brugstiden (om natten) som køler bygningens konstruktioner ned så

	den følgende dags temperaturer bliver lavere, benævnes også frikøling eller passiv køling	SEL-værdi	specifikt el-forbrug, angiver hvor effektivt ventilationsanlægget flytter luften rundt, måles i J/m ³ (eller analogt W/(m ³ /s))
Opblandingsventilation	ventilationsform, hvor luften tilføres lokalet med en vis hastighed. Derved medrives rumluften og opblanding er resultatet. For at virke optimalt, skal tilførslen ske uden for opholdszone, ofte i loftet	Termisk komfort	at befinde sig komfortabelt ved en given temperatur. Synonymt med termisk indeklima
Pulsventilation	koncept, hvor rummet kortvarigt gennemskyldes med en stor luftmængde. Anvendes især i forbindelse med naturlig ventilation	Udsugningsluft	den luftmængde, som suges ud af et lokale, se også afkastluft, indblæsningsluft og indtagsluft
Pulsstyring	se pulsventilation	Trækrisiko	antal utilfredse personer i et lokale som oplever træk, måles i %

Varmeflade	veksler, som overfører varme til luften, som passerer den. Varmen kommer fra centralvarmesystemet; i sjældne tilfælde forefindes elvarmeplader	VAV	variable-air-volume, benævnelse for et ventilationsanlæg med luftstrøm, som varierer efter behovet, i modsætning til CAV
Varmegenvinding	overførsel af varme fra afkastluften til indtagsluften, måles i %	Ventilation	udskiftning af luft i et lokale
Varmepumpe	virker som et omvendt køleskab, dvs. den flytter varme fra et sted til et andet. I ventilationssammenhænge opvarmer den luft/vand vha. el, men gør det 3 gange mere effektivt end ved ren elopvarmning	Ventilationssystem	teknisk anlæg, som udskifter luften i et lokale
		Ventilationsanlæg	mekanisk ventilationsanlæg med ventilatorer. Kan opdeles i enten indblæsning og udsugning eller kun udsugning
		VGV	se varmegenvinding
		VP	forkortelse for varmepumpe, se denne

W(att)

enhed for Watt, måler den optagne effekt.

Ikke at forveksle med kWh, se dette

Bilag A - Projektdeltagere

Forfattere

Christian A. Hviid, seniorrådgiver, ALECTIA samt adjunkt, DTU Byg

Pawel Wargocki, lektor, DTU Byg

Jacques Duelund Mortensen, arkitekt, Mangor & Nagel

Troels Schmidt Lindgreen, rådgivende ingeniør, ALECTIA

Malene Kirstine Holst, Ph.d.-studerende, ALECTIA

Assistenter

Michaela Pentericci, eksamensprojektstuderende, ALECTIA

Sara Sofie Pedersen, studentermedhjælper, DTU Byg

Marie Rugholm Nielsen, studentermedhjælper, ALECTIA

Følgegruppe

Ejner Jerking, Energistyrelsen

Ersün Züfer, Energistyrelsen

Liv Lyskær, Bygningsstyrelsen

Kirsten Henriksen, forretningschef, ALECTIA

Lars D. Christoffersen, forskningschef, ALECTIA

Interviewpersoner

De interviewede personer har alle indvilliget i at blive nævnt i denne liste og rækkefølgen de er nævnt i er tilfældig. Deres nøjagtige udsagn fremgår ikke af rapporten, men er benyttet til at udrede og kvalificere analyserne.

- Alireza Afshari, professor, Statens Byggeforskningsinstitut
- Svend Svendsen, professor, DTU Byg
- Toke Rammer Nielsen, lektor, DTU Byg
- Frank Brungaard Nielsen, bygherre, Frederikssund Kommune
- Jens Damgaard, afdelingschef, Glenco A/S
- Lasse Larsen, serviceleder, Glenco A/S
- René Hilbert, serviceleder, Glenco A/S
- Michael A. Münter, rådgivende ingeniør, ALECTIA A/S
- Michael Thøgersen, rådgivende ingeniør, ALECTIA A/S
- Kasper Lynge Jensen, rådgivende ingeniør, ALECTIA A/S
- Christoffer Andreas Weitze, rådgivende ingeniør, ALECTIA A/S
- Anders Høj, salgskonsulent, Airmaster A/S
- Henning Grønbeck, institute manager, Exhausto A/S
- Lennart Østergaard, konsulent, WindowMaster A/S
- Jannick Karsten Roth, konsulent, WindowMaster A/S
- Gitte Tranholm, konsulent, WindowMaster A/S
- Per Pedersen, pedel, Sønderøskolen, Værløse

- Peter Bennike, pedel, Høng skole, Høng
- Erling Bergman, pedel, Tibberup skolen, Espergærde
- Alaedin Seyedi, specialkonsulent, Bygningsstyrelsen
- Jørgen Nielsen, teknisk ingeniør i Drift og Service, Københavns Ejendomme
- Ralf Dott, Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Schweiz
- Jan Vilhelm Bakke, Arbejdstilsynet, Norge
- Froukje van Dijken, BBA Binnenmilieu BV, Holland
- Jerzy Sowa, Assoc. Prof., Warsaw University of Technology, Polen
- Johnny Andersson, Ramböll Sweden AB, Sverige
- Mads Mysen, Sintef, Norge
- Dirk Mueller, Professor, RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Tyskland
- Stefan Van Loon, Passiefhuis-Platform, Belgien

Bilag B - Skolebygninger

Der har lavet en undersøgelse af hvordan ventilationssystemer kan se ud på eksisterende skoler. På de følgende sider kan ses skolernes første indtryk, hvordan klasserne ser ud, detaljebilleder af ventilationsløsninger. Følgende skoler er undersøgt:

- Skole A
 - Mekanisk balanceret
- Skole B
 - Mekanisk balanceret
- Skole C
 - Mekanisk balanceret
- Billede fra forhal, men systemet er det samme i klasserne
- Skole D
 - Mekanisk udsugning
 - En del af skolen har været brændt, derfor er der to sider. En til den oprindelige skolebygning og en fra genopbygningen.
- Skole E
 - Mekanisk udsugning
 - Skolen har to former for klasselokaler, det ene de oprindelige lokaler og det andet har fået tilbygninger til de oprindelige lokaler.

- Skole F
 - Naturlig ventilation
 - Lokalerne har naturlig luftindtag under vinduerne, og naturlig udblæs til midtergang, gennem toppen af skabene.
- Skole G
 - Naturlig ventilation
 - Den naturlige ventilation er CO₂ styret, hvilket betyder at når luften bliver for dårlig åbnes vinduerne automatisk. I programmeringen er taget højde for sommer og vinter situationer.
- Skole H
 - NaVent
- Er placeret under vinduerne, og suger frisk luft ind udefra og varmer samtidig op.
- Skolens egen tilføjelse er at nogle af eleverne oplever at sidde i træk.
- Skole I
 - Airmaster
 - Er placeret under loftet, og ventilerer rummet. Det skal overvejes hvor den placeres, så der kan skiftets filter.

Skole A



Skole B



Skole C



Skole D – Oprindelig skolebygning



Skole D – Genopbygning efter brand



Skole E



Skole E – tilbygning til lokaler



Figur 82 Panel til hybrid ventilationsstyring NV Comfort. Kilde: WindowMaster

Skole F



Skole G



Skole H



Skole I

