

By og Byg Resultater 003

Energieffektive skoler

Forundersøgelser om
opvarmning, ventilation og lyskvalitet



Statens Byggeforskningsinstitut
Danish Building and Urban Research

Energieffektive skoler

Forundersøgelser om opvarmning, ventilation og lyskvalitet

Lars Gunnarsen
Kirsten Engelund Thomsen
Kjeld Johnsen
Lisbeth Skindbjerg Kristensen
Karl Terpger Andersen
Steen Traberg-Borup

Titel	Energieeffektive skoler
Undertitel	Forundersøgelser om opvarmning, ventilation og lyskvalitet
Serietitel	By og Byg Resultater 003
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2001
Forfattere	Lars Gunnarsen, Kirsten Engelund Thomsen, Kjeld Johnsen, Lisbeth Skindbjerg Kristensen, Karl Terpager Andersen, Steen Traberg-Borup
Sprog	Dansk
Sidetæl	72
Litteratur-henvisninger	Side 50-52
English summary	Side 53-55
Emneord	Energiforbrug, indeklima, skoler, ventilation, opvarmning, belysningsteknik, dagslys
ISBN	87-563-1071-4
ISSN	1600-8049
Pris	Kr. 155,00 inkl. 25 pct. moms
Tekstbehandling	Winnie Larsen
Tegninger	Ove Nesda
Fotos	Erwin Petersen
Tryk	J. H. Schultz Grafisk A/S
Udgiver	By og Byg Statens Byggeforskningsinstitut, P.O. Box 119, DK-2970 Hørsholm E-post by-og-byg@by-og-byg.dk www.by-og-byg.dk

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: *By og Byg Resultater 003: Energieffektive skoler. Forundersøgelser om opvarmning, ventilation og lyskvalitet. (2001)*

Indhold

Forord	5
Sammenfatning og konklusion.....	6
Energiforhold	6
Ventilationsforhold	7
Belysningsforhold	8
1. Indledning	9
2. Energiforhold.....	11
Baggrund.....	11
Metode	11
Resultater	12
Energiforbrug for ca. 100 skoler	12
Beskrivelse af udvalgte skoler	14
Energiforbrug for udvalgte skoler	15
3. Ventilation	17
Baggrund.....	17
Igangværende byggeprojekter	18
Metode	19
Bygningsbeskrivelse	20
Skole H	21
Skole I.....	22
Skole J	23
Skole K	24
Skole E	25
Skole L.....	26
Skole M.....	27
Resultater	28
Diskussion.....	29
Skole H	29
Skole I.....	30
Skole J	30
Skole K	30
Skole E	30
Skole L.....	30
Skole M.....	31
Balanceret mekanisk ventilation	31
Naturlig ventilation	32
Andre forhold af betydning	32
4. Belysningsforhold	33
Kort historisk overblik	33
Dagslysforhold i dagens skoler	34
Metoder, dagslysforhold.....	34
Sammenfatning, dagslysforhold.....	35
Brugsmønstre for skolernes elbelysning.....	40
Resultater, forbrugsmønstre.....	40
5. Krav og retningslinjer for skolebyggeri	42
6. Rum og arbejde i fremtidens skole	45
Samfunds- og arbejdsmarkedsændringer og deraf følgende omstilling på uddannelsesområdet.....	45
Undervisningsformer og arbejdssituationer i folkeskolen	45
Den fysiske udformning af fremtidens skoler	46
7. De videre undersøgelser	48
Resterende del af Fase 1	48

Fase 2.....	48
8. Litteratur.....	50
Summary.....	53
The use of energy.....	53
Energy efficient ventilation.....	54
Lighting conditions.....	55
Bilag.....	56
Bilag 1. Skoleoversigt.....	57
Bilag 2. Spørge- og registreringskemaer.....	59
Bilag 3. Varme-, el- og vandforbrug for 1996, 1997 og 1998.....	63
Bilag 4. Deltagere i "Program for energieffektive skoler".....	72
Følgegruppe.....	72
Projektdeltagere.....	72

Forord

I de nærmeste år skal der, på grund af stigende elevtal og nedslidning af skolebygningerne, gennemføres et stort antal ny-, om- og tilbygninger. Der er i tilknytning hertil behov for at vise, hvordan der kan opnås markante reduktioner i energiforbruget, samtidig med at indeklimaet forbedres. I EFP-99 blev igangsat et "Program for energieffektive skoler" (ENS j.nr. 1213/99-0004), der har til formål at skabe det nødvendige grundlag for projektering og drift af fremtidens energieffektive skoler. I programmet gøres en særlig indsats for at udvikle metoder til reduktion af energiforbruget til belysning og ventilation, idet man samtidig lægger vægt på at skabe et sundt og stimulerende indeklima under hensyn til de krav, der stilles til fremtidens skole. Der lægges også vægt på, at løsningerne skal være lette at implementere og enkle at bruge i praksis.

Fase 1 af det samlede program består af følgende delprojekter:

1. Kortlægning og analyse af energiforhold.
2. Energieffektiv skolebelysning.
3. Energieffektiv skoleventilation (indledende del).

Denne publikation afrapporterer delprojekt 1 og 3. Desuden omtales de første resultater fra delprojekt 2. Herudover vil en senere afrapportering af delprojekt 2 omfatte en By og Byg Resultater "Lyset i skolen - Dagslysudnyttelse og effektive belysningsanlæg". Projektet om "Energieffektiv skoleventilation" videreføres i et EFP-2000 projekt, hvori der gennemføres målinger i 7 udvalgte skoler med lovende energieffektive løsninger.

Projektet er gennemført i samarbejde med Københavns kommune og Ballerup kommune samt Skanska Jensen A/S, som ejer Farum Kommunes skoler. Ove Mørck og Jens Ole Hansen, Cenergia, har deltaget i delprojekt 1 og 3 og Henrik Njor, Birch & Krogboe A/S i delprojekt 1 og 2. Inge Mette Kirkeby, Statens Byggeforskningsinstitut har medvirket i udarbejdelsen af kapitel 6.

Der blev nedsat en følgegruppe med deltagere fra Forskningsministeriets Byggedirektorat, By- og Boligministeriet, Miljø- og Energiministeriet, Rådgivningstjenesten for Skolebyggeri, Arkitektskolen i Aarhus, Rambøll, Danmarks Lærerhøjskole, Danmarks Lærerforening, Københavns Kommune (RIA), en embedslæge, Lysteknisk Selskab, Delta Lys & Optik, Delta Akustik og Vibration og KHR A/S arkitekter. Gruppen deltog i diskussionen om projektførelse og resultater, herunder pædagogiske, arkitektoniske og byggetekniske udviklingslinier.

By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for Energi og Indeklima
Januar 2001

Erik Christophersen,
Forskningschef

Sammenfatning og konklusion

Nærværende publikation afrapporterer de første resultater af forskningsprogrammet "Program for energieffektive skoler", der har til formål at skabe det nødvendige grundlag for projektering og drift af fremtidens energieffektive skoler. I programmet gøres en særlig indsats for at udvikle metoder til reduktion af energiforbruget til belysning og ventilation, idet der samtidig lægges vægt på at skabe et sundt og stimulerende indeklima under hensyn til de krav, der stilles til fremtidens skole.

Formålet med nærværende undersøgelser er at kortlægge energiforbrugene i en række skoler samt at vurdere energibesparelspotentialet. En række lovende innovative ventilationsløsninger, der er implementeret eller står foran en umiddelbar implementering, er blevet identificeret og analyseret. Desuden gives en kort gennemgang af dagslysforholdene i nogle typiske skoler. Der afsluttes med et kapitel om de nye undervisningsformer og arbejdssituationer samt nogle generelle tendenser i den bygningsmæssige fortolkning af folkeskoleloven.

Tværfaglig- og projektundervisning betyder langt større krav til fleksibilitet og mere fokus på den enkelte elev. En elev vil deltage i mange forskellige aktiviteter i løbet af en dag, hvilket stiller særlige krav til rum, installationer og lysforhold. Særlig opmærksomhed skal der gives muligheden for fleksibilitet, da der er fare for, at for fleksible løsninger bliver forvirrende og nyttesløse. Nøgleordene for nogle generelle tendenser i den rumlige fortolkning af den nye folkeskolelov er: Flexibilitet, foranderlighed, multifunktionalitet, flere aktiviteter i samme rum og større rum.

Energiforhold

Der er blevet udarbejdet en oversigt over 100 skolers forbrug til varmeenergi, elektricitet samt vand for årene 1996, 1997 og 1998. Varmeforbruget er svagt stigende, mens elforbruget er konstant over årene. Perioden har vist et fald i vandforbruget på ca. 16 %. For 1998 gælder, at varmfeforbruget på skolerne ligger mellem 67 og 220 kWh/m² med et gennemsnit på 130 kWh/m², elektricitetsforbruget ligger mellem 7 og 60 kWh/m² med et gennemsnit på 23 kWh/m², og vandforbruget på skoler ligger på mellem 0,11 og 0,57 m³/m² med et gennemsnit på 0,26 m³/m².

Årsagen til den store spredning i forbrugene er variationer i isoleringsstandard, installationernes art og vedligeholdelsesstandard, brugstiden af skolen, brugernes adfærd, bevidstheden blandt driftspersonalet om energiforhold og luftudskiftningens størrelse.

Elforbrugets fordeling er beregnet på 7 udvalgte skoler ud fra skolernes registreringer af driftstider og effektforbrug til lysarmaturer og ventilatorer. Elforbruget til belysning udgør i gennemsnit mellem 3 og 10 kWh/m² svarende til mellem 9 og 32 % af skolens samlede elforbrug. Elforbruget til ventilation udgør mellem 3 og 17 kWh/m² svarende til mellem 11 og 37 % af skolens samlede forbrug. Elforbruget til pc'er udgør op til 14 % (1-3 kWh/m²) af det samlede elforbrug. Endvidere er der en meget stor del af elforbruget - mellem 38 og 55 % - der går til andre formål fx udebelysning, elforbrugende apparater tilsluttet stikkontakter, skolekøkken, sløjde, pumper etc. Der er store variationer i fordelingen af elforbruget fra skole til skole. Én af grundene er, at der er stor variation på de opgjorte brugstimer, dvs. de timer, de enkelte lokaler og gange er i brug, både når det drejer sig om belysning og ventilation. Ventilationsmotorernes optagne effekt er målt i tre skoler i Ballerup kommune, og den optagne effekt udgjorde 70-75 % af mærkeeffekten.

Ventilationsforhold

Udvalgte skoler er gennemgået for at kunne identificere lovende ventilationsløsninger. Løsningerne er vurderet og analyseret i forhold til forbruget af opvarmingsenergi og elenergi, regulerbarhed og brugerindflydelse samt støj, træk og andre gener.

For at kunne reducere energiforbruget er det særlig væsentligt at være opmærksom på følgende forhold: Ventilationen skal kunne tilpasses det aktuelle behov og ventilationsbehovet skal kunne udjævnes ved forøget rumvolumen og lagring af varme og luftforurening i byggematerialer. Det er endvidere afgørende at installere varmegenvinding med overførsel af varme fra udsugningsluften til indblæsningsluften.

Balanceret mekanisk ventilation giver gode muligheder for varmegenvinding og stor luftudskiftning. Ydelserne i overensstemmelse med bygningsreglementets krav er ikke nødvendigvis tilstrækkelige til at sikre god luftkvalitet ved alle tænkelige belastninger, men suppleret med oplukkelige vinduer vil denne løsning være det naturlige valg i mange skoler. Dette gælder særligt for skoler i støjende eller forurenede omgivelser, for skoler med stor bygningsdybde eller sammenhængende arealer og for klasserum med særlige belastninger. Skoler med mekanisk ventilation må forventes bedre at kunne håndtere eventuelle stigende varmebelastninger fra øget brug af computere i klasserummene. Udformningen af skolernes plan og snit vil være afgørende for, om der skal foretrækkes opblandingsventilation eller fortrængningsventilation. De forholdsvis store CO₂ belastninger i forbindelse med elproduktion gør det relevant at være opmærksom på elforbruget til lufttransport. Elforbruget kan reduceres ved korte, simple kanalsystemer og ved at undgå trykkrævende komponenter. Behovstilpasningen byder på særlige udfordringer. Store centrale anlæg bør forsynes med individuel ydelsesstyring for de enkelte klasserum. Det kan være tilstrækkeligt med en simpel on/off styring af ventilationen i de enkelte klasserum.

Vinduesudluftning giver under en række forudsætninger - bl.a. at elever og lærere bruger vinduerne fornuftigt - gode muligheder for energiøkonomisk drift af en skole, men elever og lærere skal acceptere trækgener i perioder. Et sådant system kan kun fungere under ydre forhold uden særlig forurening, i rum med begrænset dybde og under inddragelse af skolens brugere. Systemet stiller krav til vinduernes udformning. Vindtryk og skorstensvirkning vil kunne forøge luftudskiftningen, hvis tværudluftning eller vertikaludluftning er mulig.

Forvarmning af indblæsningsluften i anlæg for naturlig eller ventilatorunderstøttet naturlig ventilation reducerer trækgenerne, og det kan ske ved jordkanaler eller lignende. Men luftudskiftningen kan ofte i praksis vise sig at være for begrænset. Ved anlæg med ydelse på linie med bygningsreglementets eksplicitte krav til udelufttilførsel bliver energiøkonomien problematisk. Særlige problemer med temperaturstyringen opstår, når forvarmningen af ventilationsluften er koblet til rumtemperaturstyringen. Med skiftende brug og belastning af klasseværelser er der sjældent sammenfald mellem behovet for rumopvarmning og behovet for varme til forvarmning for at undgå træk.

Fabriksfremstillede aggregater med varmegenvinding i de enkelte klasserum kan være et attraktivt alternativ, især hvis produktudviklingen på området fortsætter. Erfaringerne er endnu begrænsede, og det vil være naturligt at være særligt opmærksom på støj, holdbarhed og vedligeholdelsesudgifter.

Ved planlægning af skoler skal man tænke på, hvordan brugerne vil agere og vil ønske at kunne påvirke indeklimaet. Brugere, der er indstillet på at påtage sig en del af ansvaret for kvaliteten af indeklimaet, er afgørende, hvis indeklimaet skal forbedres, og energiforbruget reduceres i skoler. Samtidig vil det understøtte intentionerne om, at eleverne skal bevidstgøres om, hvilke konsekvenser deres adfærd har for miljø og sundhed.

Belysningsforhold

Generelle dagslys- og kunstlysforhold i eksisterende skoler er vurderet ved at gennemgå i alt ni skoler fordelt med tre skoler i henholdsvis Ballerup, København og Farum kommuner. Ofte antages det, at godt dagslys og høj dagslysudnyttelse forudsætter store vinduer. I de undersøgte skoler varierer forholdet mellem rudeareal og gulvareal (glasprocenten) mellem 10 og 25 %, men der er ikke nogen entydig sammenhæng mellem glasprocent og lysmængde eller lyskvalitet.

Blandt de undersøgte skoler forekommer det bedste dagslys i de to skoler, som havde de enkleste vinduesløsninger, nemlig almindeligt sidelys fra én side gennem vinduer i facaden. Begge skoler havde et rudeareal på 15 % af gulvarealet. Medvirkende til det gode dagslys er, at rumdybden er forholdsvis beskeden, mindre end to gange rumhøjden samt, at der er lyse farver på vinduesrammer, vinduesnicher og alle øvrige overflader.

Der er fælles problemer ved højtsiddende lodrette vinduer. De har sjældent en solafskærmning af tilstrækkelig kvalitet og vinduesomgivelserne er tit for mørke. Begge forhold medfører blændingsproblemer og store kontraster, som bevirker, at de underliggende dele af klasselokalet virker dunkle.

I to af skolerne er der meget dybe lokaler, hvor der, som supplement til vinduerne i sidevæggen, er ovenlys. Disse er imidlertid ikke placeret, hvor der er mest behov for lys dvs. i den bagerste del af lokalet. Desuden er belysningsarmaturene flere steder monteret direkte under ovenlysene. Rumets store dybde i forhold til højden og det deraf følgende forholdsvis lave dagslysniveau bevirker, at der især i solskin, opstår kontrastproblemer, således at stort set alt, der befinder sig imellem én selv og vinduerne, ses i silhuet.

Som led i analysen af eksisterende skolers elforbrug blev der foretaget registreringer i udvalgte lokaler af, hvorledes den elektriske belysning blev brugt, og hvornår der var personer til stede i lokalerne. Alene ved anvendelse af bevægelsesmeldere ville elbesparelsen være af størrelsesorden 5-10 % af det eksisterende forbrug, men ved yderligere at have en høj udnyttelse af dagslyset kan besparelsen blive 25-45 %. Den høje dagslysudnyttelse kan opnås ved et forhold mellem glasareal og gulvareal på helt ned til 15 %, hvis dybden af lokalet ikke er over to gange højden fra gulv til overkant vinduer. Ved dybere lokaler bør glasprocenten være højere, 20-25 %.

1. Indledning

I de nærmeste år skal der bruges milliarder af kroner på ny-, om- og tilbygninger inden for skoleområdet. Baggrunden er det stigende elevtal, den store nedslidning af bygningerne samt den seneste folkeskolelov fra 1993. Tal fra foreningen "Skole og Samfund" og Danmarks Lærerforening peger på udgifter i størrelsesorden 13 milliarder kroner alene til renovering af eksisterende bygninger og lokaler for at bringe samtlige skoler op til de nye standarder. Hertil skal lægges et ukendt milliardbeløb til nybygninger i takt med det stigende børnetal. I Danmark findes der i dag ca. 1700 skolebygninger til brug for folkeskolen. Skolerne udgør ca. 8 millioner m² bygningsareal, hvilket er over halvdelen af den kommunale bygningsbestand. En stigning i antallet af skolebørn på ca. 20 % gør, at der de nærmeste år skal skaffes plads til 110.000 flere elever i de danske skoler.

De eksisterende skolebygninger er bygget ud fra andre tiders opfattelse af børn og uddannelse. Den nye folkeskolelov stiller ikke krav til selve bygningerne, men til den pædagogiske virksomhed, og det betyder, at der er brug for mere fleksibel rumorganisering og formentlig større lokaler end man kender i dag. Der findes ingen standardløsninger på dette problem, men skolebygningernes indretning skal bl.a. understøtte den differentierede undervisning, projektarbejdsformen og integreringen af IT og give plads til aktiviteter, der tager udgangspunkt i medinddragelse af eleverne. Efter mange års stilstand i skolebyggeriet er det derfor nu nødvendigt at genoptage diskussionen om, hvad skolens bygninger skal og kan. Samarbejdet om fremtidens skolebyggeri må baseres på en helhedsforståelse, så de arkitekturmæssige, indeklimamæssige og energi- og miljømæssige forhold bliver optimale. Formålet med nærværende projekt er at:

- skaffe viden om energiforbrug i eksisterende skoler, udvælge forskellige typer af skoler og identificere de særlige årsager til forskelle i energiforbrug
- identificere og analysere energieffektive ventilationsløsninger. Løsningerne er vurderet i forhold til opvarmingsenergi og elenergi, regulerbarhed, brugerindflydelse samt støj, træk og andre gener
- analysere eksisterende dagslysforhold og belysningssystemer samt beskrive gode dagslysløsninger

I rapporten er der givet et overblik over energiforbruget i eksisterende skoler med udgangspunkt i 1996, 1997 og 1998-tallene. Projektet blev påbegyndt med udarbejdelsen af et spørgeskema, der blev sendt rundt til 30 kommuner. Herudfra blev der udvalgt skoler med forskellig beliggenhed, alder og planløsning. Dernæst er der foretaget en analyse af elforbruget i udvalgte skoler med forskellige installationsløsninger for herved at identificere de anlæg og komponenter, der har det største forbrug. Analysens resultater danner grundlag for den mere fagspecifikke indsats vedrørende belysning og ventilation.

Derefter er en række skoler udvalgt for at kunne identificere og analysere en række lovende ventilationsløsninger. Løsningerne er vurderet i forhold til opvarmingsenergi og elenergi, regulerbarhed, brugerindflydelse samt støj, træk og andre gener. Skolerne er analyseret i overensstemmelse med metoden angivet i SBI-Anvisning 184, "*Bygningers energibehov*". Der er desuden foretaget en kort gennemgang af dagslysforholdene i ni eksisterende skoler ved gennem iagttagelser at afdække forhold i belysningen, som traditionelle målemetoder ikke omfatter. Desuden gives en kort redegørelse for energianalyser og vurdering af besparelespotentialer ved en høj udnyttelse

af dagslyset, idet der er foretaget registreringer i udvalgte lokaler af, hvorledes den elektriske belysning blev brugt, og hvornår der var personer til stede i lokalene.

De udvalgte skoler er i meddelelsen benævnt A til M. Skolerne er udvalgt efter forskellige kriterier alt efter, hvilken undersøgelse de indgår i. Der er brugt de samme syv skoler til energi- og dagslysundersøgelsen, hvor der er fokuseret på, at skolerne har forskellig beliggenhed, alder og planløsning. Skolerne, der er brugt i ventilationsafsnittet, repræsenterer hver et ventilationsprincip, som må anses for at være "lovende".

Rapporten er inddelt i 7 kapitler. Kapitel 2 (energiforhold) beskriver resultaterne af projektet, som omhandler analyse af energiforholdene i eksisterende skoler. I kapitel 3 (ventilation) er den indledende del af energieffektiv skoleventilation rapporteret. Der er foretaget detaljeret analyse og modellering af de ventilationsløsninger, der er vurderet som "lovende", og som i projektets næste fase vil blive evalueret gennem målinger. I kapitel 4 (belysningsforhold) gives en kort beskrivelse af de første resultater fra projektet om energieffektiv belysning. For typiske klasserum er dagslysudnyttelsen og den visuelle kvalitet vurderet. I kapitel 5 nævnes (krav og retningslinjer for skolebyggeri) de få tekniske krav, der findes til skolens lokaler, og i kapitel 6 (rum og arbejde i fremtidens skole) er de nye undervisningsformer og arbejdssituationer beskrevet samt nogle generelle tendenser i den rumlige fortolkning af den nye folkeskolelov. I kapitel 7 (de videre undersøgelser) bliver der redegjort for de følgende faser i programmet.

2. Energiforhold

Formålet med denne del af undersøgelsen er at tilvejebringe et overblik og en samlet viden om energiforbruget i eksisterende skoler med udgangspunkt i tallene fra 1996, 1997 og 1998. Der er foretaget en analyse af elforbruget i udvalgte skoler med forskellige installationsløsninger for at identificere de forskellige anlægs og komponenters betydning. Analysens resultater danner grundlag for den mere fagspecifikke indsats vedrørende belysning og ventilation. De udvalgte skoler repræsenterer et bredt udsnit af forskellige bygningstyper.

Baggrund

Ved projektering af en skole er der, på det energimæssige område, mulighed for at foretage visse optimeringer, idet ekstra investeringer i energibesparende foranstaltninger, såsom bedre anlæg og reguleringsystemer, vil kunne bidrage til, at driftsudgifterne bliver mindre. Disse optimeringer er dog kun mulige, når man ved, i hvilke anlæg og komponenter den væsentligste del af energiomsætningen foregår.

Der er også en stor interesse i andre lande for at analysere skolebygninger i detaljer for at finde den økonomisk, teknisk og arkitektonisk mest attraktive løsning. I IEA regi er netop igangsat et arbejde med at udvikle mere generelle værktøjer til vurdering af energiforbedringsmuligheder i forbindelse med renovering af skolebyggeri (Annex 36 "Retrofitting Educational Buildings. Energy Concept Adviser For Technical Retrofit Measures"). Dette arbejde byder på en oplagt mulighed for at udveksle relevante erfaringer med andre forskningsgrupper gennem internationalt samarbejde inden for skolebyggeri.

Metode

Projektet "Kortlægning og analyse af energiforhold i eksisterende skoler" (delprojekt 1) blev påbegyndt med udarbejdelsen af et spørgeskema, hvor der bl.a. blev spurgt om det samlede energiforbrug pr. m² i 1996, 1997 og 1998 for hhv. varme- og elforbrug samt det totale vandforbrug.

Endvidere blev der spurgt om antal brugere og brugstimer både for almindelig skoledrift og for andre aktiviteter. Supplerende blev der spurgt om omfanget af mekanisk ventilation og den installerede effekt til den kunstige belysning i et typisk klasseværelse. Spørgeskemaet blev sendt til 30 kommuner fordelt i hele landet. 15 kommuner besvarede spørgeskemaet, hovedparten ved at videresende skemaet til skolerne, som derefter udfyldte skemaet. En oversigt over de ca. 100 skoler, der medvirkede er vist i bilag 1, og spørgeskemaet er vedlagt som bilag 2.

Skolernes areal omfatter skolens undervisningsareal samt de SFO'er (skolefritidsordninger), som ligger på skolen og har fælles el- og varmemåler med skolen. Opgøres svømmehallers og sportshallers forbrug på samme måler som skolernes "normale" forbrug, indgår de i skolernes tal, hvilket kan udgøre en vis fejlkilde i forhold til skoler uden haller. Energiforbruget er sat i forhold til skolens samlede areal. Arealet er defineret som bruttoetagearealet regnet til yderkant af mur og hertil lægges udnyttet tagetage og 1/2 kælderareal (som defineret i ELO-ordningen). Varmeforbruget er graddøgnskorrigere-

ret, og der er anvendt 2906 graddøgn for et normalår, 3206 graddøgn for 1996, 2956 graddøgn for 1997 og 2680 graddøgn for 1998. Nøgletallene er derefter sammenlignet med nøgletal fra andre undersøgelser. Nøgletal kan inspirere den enkelte skole til at prøve nye metoder til at få eget energiforbrug i nærheden eller under det gennemsnitlige niveau.

Dernæst er der for syv udvalgte skoler i hhv. København, Ballerup og Farum foretaget en analyse af elektricitetsforbruget. Skolerne er udvalgt således, at de er repræsenteret med forskellig beliggenhed, alder og planløsning. I skolerne er der gennemført en analyse af fordelingen af elektricitetsforbruget til belysning, ventilation, pc'er og en post med resten af forbruget, hvor dette dækker over forbrug i skolekøkken og sløjdlokaler, tomgangstab, pumper og elforbrugende apparatur tilsluttet stikkontakter. Skolerne er kun forsynet med én hovedmåler til at registrere det samlede elforbrug. Det har ikke været muligt at indskyde bimålere til at registrere fx elforbrug til belysning. Elforbruget til belysning og ventilation er derfor fastsat ved, at skolerne har udfyldt et detaljeret skema om registrering af brugs- og driftstider og den samlede effekt til belysningsarmaturer og ventilatorer på hele skolen. Med det store antal installationer, der er på en skole, er det umuligt at bestemme driftstiden for hver enkelt af de mange installationer. Det har derfor været nødvendigt at slå dem sammen i grupper med nogenlunde ens driftsbetingelser. Desuden blev belysningens driftstid målt i to udvalgte klasselokaler på skolerne i 3-4 måneder. Herefter er der foretaget det bedst mulige skøn over driftstiden dels ud fra den oplyste brugstid af rummene og dels vha. målinger af driftstiden i udvalgte klasselokaler.

Den installerede effekt kan direkte aflæses på belysningskilderne og for lysstofrør tillægges 20 % til effekten pga. spoletab. For ventilationsmotorer og pumper er det et problem, at optaget effekt afhænger af belastningen, og det er valgt at sætte effekten af ventilatorerne til 75 % af mærkeeffekten i de skoler, hvor forbruget ikke direkte er blevet målt. Hver skole har yderligere registreret antallet af pc'er på skolen, og der er forudsat en gennemsnitseffekt på 150 W pr. maskine og en brugstid på 40 timer pr. uge. Registreringsskemaet er vedlagt som bilag 2.

Resultater

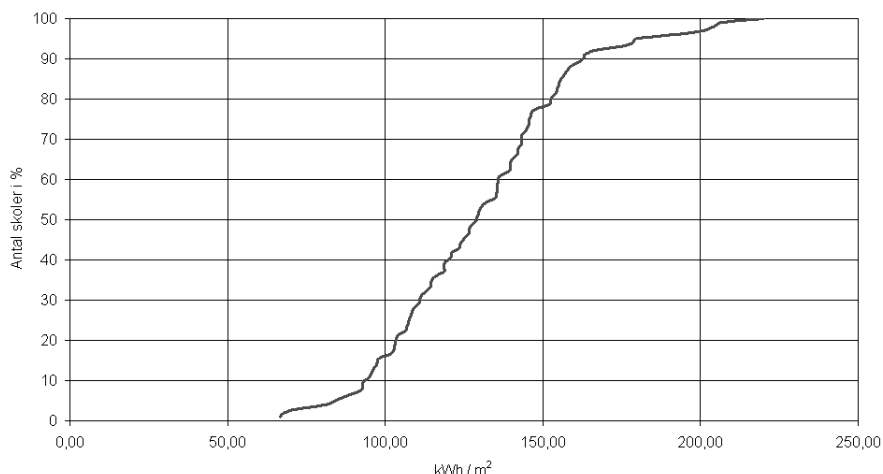
Energiforbrug for ca. 100 skoler

Varmeforbruget på skolerne ligger i 1998 mellem 67 og 220 kWh/m² med et gennemsnit på 130 kWh/m². Varmeforbruget for 1996 og 1997 ligger på hhv. 127 og 123 kWh/m², så forbruget har tilsyneladende ikke ændret sig over årene. Tallene kan sammenlignes med resultaterne fra en undersøgelse om energiforbruget i kommunerne, som Kommunernes Landsforening har gennemført for Energistyrelsen (januar 2000), men kun for året 1998 (Energistyrelsen, 2000). I denne undersøgelse er gennemsnittet for skoler på 121 kWh/m², så tallene for de skoler, der indgår i nærværende undersøgelse, ser ud til at være repræsentative.

Årsagen til den store spredning af resultater er bl.a. isoleringsstandard, installationernes art og vedligeholdelsesstandard, brugernes adfærd, bevidstheden blandt driftspersonalet om energi, brugstiden af skolen og graden af ventilation. For 50 % af skolerne ligger varmemeforbruget under 129 kWh/m².

Sammenlignes varmemeforbrugene med størrelsen af skolerne, ses et svagt stigende energiforbrug pr. m² ved stigende areal.

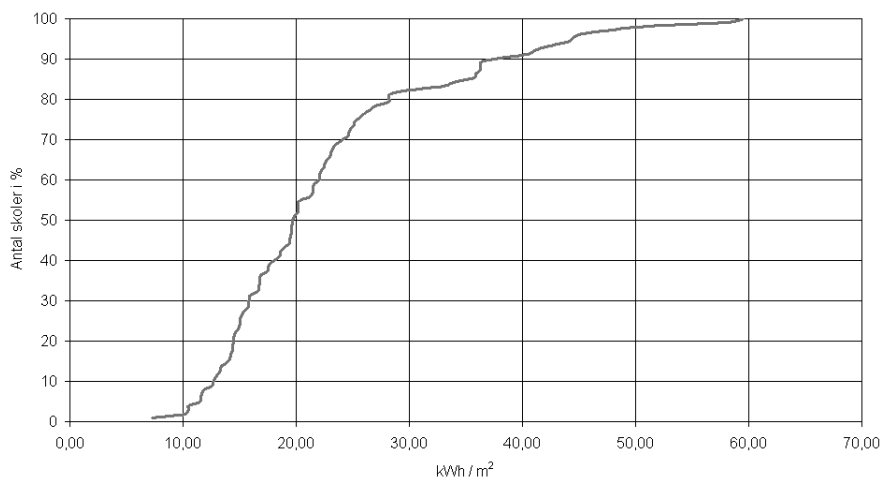
Varmeforbrug 1998



Figur 2.1. Det kumulerede varmeforbrug i 1998.

Elektricitetsforbruget på skolerne i 1998 ligger mellem 7 og 60 kWh/m² med et gennemsnit på 23 kWh/m². Elektricitetsforbruget for 1996 og 1997 ligger også på 23 kWh/m². Gennemsnittet fra førnævnte undersøgelse er for 1998 på 21 kWh/m². For 50 % af skolerne ligger elforbruget under 19,7 kWh/m².

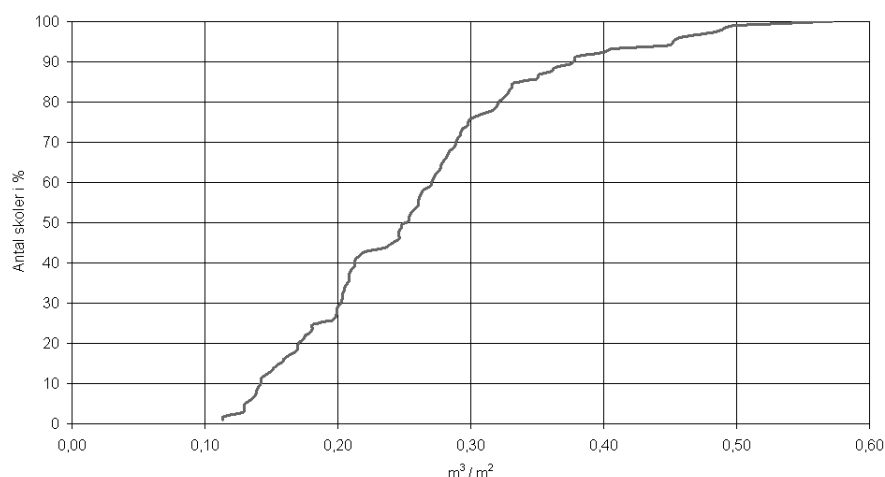
Elforbrug 1998



Figur 2.2. Det kumulerede elforbrug i 1998.

Vandforbruget på skolerne ligger i 1998 mellem 0,11 og 0,57 m³/m² med et gennemsnit på 0,26 m³/m². Vandforbruget for 1996 og 1997 ligger på hhv. 0,31 og 0,27 m³/m². Sammenlignes med gennemsnittet fra førnævnte undersøgelse med forbruget for 1998 er det på 0,28 m³/m², hvilket stemmer godt overens med de 0,26 m³/m². For 50 % af skolerne ligger vandforbruget under 0,25 m³.

Vandforbrug 1998



Figur 2.3. Det kumulerede vandforbrug i 1998.

En oversigt over de enkelte skolers energiforbrug til opvarmning og elektricitet samt vandforbrug for årene 1996, 1997 og 1998 er vist i bilag 3.

Beskrivelse af udvalgte skoler

Tabel 2.1. Bygningsbeskrivelser af skolerne.

Skole	A	B	C	D	E	F	G
Opført (+ tilbygning)	1918 (19)	1972 (75)	1966 (77)	1977	1971 (82)	1969 (77)	1901 (55)
Areal (m ²)	5208	15982	17426	12730	14115	13817	7913
Antal etager	5	2-4	1	1	1-2	1-2	1-3
Antal elever	327	555	630	586	675	553	381
SFO	Nej	Ja	Nej	Ja	Ja	Ja	Nej
Klasseværelse							
areal (m ²)	45	59	66	50	59	57	62
Højde (m)	3,5	3,5	2,3-4,3	2,9	2,6	2,7	3,2
Belysning i klasseværelse (W/m ²)							
Belysningsregulering	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Ja
Mekanisk ventilation	Nej, delvis	Ja	Ja	Ja	Ja, delvis	Ja	Nej
Antal computere	56	30	90	150	150	150	74

Her følger en beskrivelse af de forskellige skolers varme- og ventilationssystemer:

- **Skole A** har traditionelle tostrengede varmeanlæg med fjernvarme. Skolen har et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding, der kun dækker lærerværelset. Der er tre udsugningsanlæg, der dækker toiletter på gange i hovedfløj samt lokaler til skolekøkken og sløjd. Belysningen er hovedsagelig lysstofrør.
- **Skole B** har fjernvarme delvis med radiatorer på gange og i trapperum og induktionskabinetter i klasserne. Gymnastiksale er luftopvarmede. Ventilationsanlægget indblæser luft med en grundtemperatur på 20 °C og eftervarmes i induktionskabinetter. Alle lokaler er fuldt ventilerede uden varmegenvinding. Belysningen er hovedsagelig lysstofrør, men der findes glødelys i gangarealerne.
- **Skole C** har traditionelle tostrengede anlæg med fjernvarme. Sportshal, svømmehal og IT-værksted opvarmes af luftvarmeanlæg. Svømmeanlæg har været ude af drift i 1997 og det meste af 1998 og er derfor ikke med-

- regnet i forbruget. Skolen har et ventilationsanlæg til samtlige lokaler. Belysningsarmaturerne har udelukkende lysstofrør.
- *Skole D* er en delvis åben plan skole. Skolen har luftvarmeanlæg med fjernvarme samt enkelte radiatorer. Alle lokaler er mekanisk ventilerede med varmegenvinding. Belysningsarmaturerne har udelukkende lysstofrør.
 - *Skole E* bliver opvarmet med naturgas via et lokalt kraft-varme anlæg. Opvarmningen sker via radiatorvarme som 2-strengt anlæg. Der forefindes 5 ventilationsanlæg med varmegenvinding. Som del af et EU-projekt er 2 afsnit af skolen (ca. 1200 m²) energimæssigt renoveret med øget isolering i klimaskærmen, lavenergivinduer, CTS-system og hybrid ventilation. Der er naturlig ventilation med luftindtag gennem jordkanaler og krybekælder og afkast gennem ventilationsskorsten placeret på taget af et dobbelt højt samlingsrum. Der forefindes en sportshal, som kun har udsugning. Belysningen er hovedsagelig lysstofrør, men der er glødelys i kantinen, biblioteket, håndarbejdslokalet og i lokalet hos sundhedsplejersken.
 - *Skole F* er blevet bygget i etaper i hhv. 1969, 1972 og 1977. Skolen har indirekte fjernvarme, og i fløj A, C (1. sal) og sportshal er radiatorer, mens fløj B og C (stueetage) er luftopvarmede. Skolen har et mekanisk ventilationsanlæg til samtlige undervisningslokaler. Der er kun udsugning i sportshal. Belysningsarmaturerne er hovedsagelig lysstofrør, men der findes glødelys i enkelte lokaler.
 - *Skole G* er opført i 1901, og der blev bygget en tilbygning i 1955. Opvarmningen er med naturgas og sker via radiatorer som henholdsvis 1- og 2-strengt anlæg. Skolen har tre mindre udsugningsanlæg for henholdsvis skolekøkken, sløjdløkkale samt baderum. Belysningsarmaturerne er hovedsagelig lysstofrør, men der er stadig en del glødelys.

Som nævnt under skolerne findes der en sportshal på skolerne C, E og F. Ifølge ELO nøgletalsrapport (ELO sekretariatet, 1999) har en sportshal lidt mindre varmeforbrug end selve skolebygningerne, men et større elforbrug. ELO tallene er baseret på indrapporteringer i perioden fra januar 1997 til maj 1999. En sportshal har et gennemsnitligt elforbrug på 36 kWh/m², i et interval på 23 og 67 kWh/m², hvor skolernes forbrug ifølge ELO ligger med et gennemsnit på 22 kWh/m² i et interval på 13 og 47 kWh/m². Alle tre skoler er store skoler, så sportshallen udgør en vis fejlkilde i forhold til skoler uden sportshal, men inden for 5 % af det totale elforbrug.

Energiforbrug for udvalgte skoler

I det følgende er elektricitetsforbrugets fordeling i de nævnte skoler beregnet ud fra ovennævnte registreringer og målinger.

Tabel 2.2. Forbrug til opvarmning og elektricitet på skolerne i 1998.

	Skole A	Skole B	Skole C	Skole D	Skole E	Skole F	Skole G
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
Varmeforbrug	163	155	155	83	142	180	119
Elforbrug	24	38	29	45	33	51	19

Tabel 2.3. Elforbrugets størrelse og fordeling på skolerne. Tallene i parentes er fordelingen af elforbruget i % på den enkelte skole.

Elforbrug	Skole A kWh/m ² (%)	Skole B kWh/m ² (%)	Skole C kWh/m ² (%)	Skole D kWh/m ² (%)	Skole E kWh/m ² (%)	Skole F kWh/m ² (%)	Skole G kWh/m ² (%)
Belysning	8 (32 %)	3 (9 %)	7 (25 %)	5 (12 %)	10 (29 %)	10 (19 %)	5 (28 %)
Ventilation	3 (13 %)	14 (36 %)	7 (22 %)	17 (37 %)	8 (24 %)	10 (20 %)	2 (11 %)
PC'er	3 (12 %)	1 (1 %)	1 (5 %)	3 (7 %)	3 (9 %)	3 (6 %)	3 (14 %)
Diverse	10 (43 %)	20 (54 %)	14 (48 %)	20 (44 %)	12 (38 %)	28 (55 %)	9 (47 %)
Totalt elforbrug	24	38	29	45	33	51	19

Elforbrugets fordeling er beregnet og skønnet på udvalgte skoler, og der er stor forskel på det totale elforbrug pr. kvadratmeter på de syv skoler. Årsagen hertil er bl.a., at ventilationsanlæggenes udformning og driftstid er forskellig på skolerne. Desuden viser registreringer af belysningens brug, at det er nødvendigt at tage resultaterne med et vist forbehold, da der er stor usikkerhed på de opgjorte brugstimer, dvs. de timer de enkelte lokaler og gange er i brug, både når det drejer sig om belysning og ventilation.

I Ballerup kommune er ventilatormotorernes optagne effekt målt i tre skoler, og den optagne effekt udgjorde 70-75 % af mærkeeffekten.

Elforbruget til belysning udgør i gennemsnit mellem 3 og 10 kWh/m² svarende til mellem 9 og 32 % af skolens samlede elforbrug. Elforbruget til ventilation udgør mellem 3 og 17 kWh/m² svarende til mellem 11 og 37 % af skolens samlede forbrug. Elforbruget til pc'er udgør op til 14 % (1-3 kWh/m²) af det samlede elforbrug, så der er en meget stor del af elforbruget - mellem 38 og 55 % - der går til andre formål fx forbrug i skolekøkken og sløjdlokaler, tomgangstab, pumper og elforbrugende apparatur tilsluttet stikkontakter.

Det ville have været hensigtsmæssigt, om de forskellige anlæg havde været forsynet med separate, stationære målere, som giver mulighed for løbende registrering og kontrol med energiforbruget under driften. Forbruget kan så i mange tilfælde reduceres betydeligt ved simple konstruktionsændringer eller ved mere hensigtsmæssig tilrettelæggelse af driftsformen.

3. Ventilation

Dette kapitel behandler resultatet af 1. del af projektet "Energieffektiv skoleventilation". Projektet har til formål at foretage detaljeret analyse og modellering af de mest lovende og innovative løsninger. Det er desuden projektets formål at sikre, at lovende, energieffektive ventilationsløsninger indarbejdes i et antal byggeprojekter, der er umiddelbart forestående.

Baggrund

Opvarmning og ventilation er de mest energiforbrugende aktiviteter i skolebygninger, og energiforbruget varierer betydeligt fra skole til skole. Men det er ikke påvist, at skoler med lavt energiforbrug har et dårligere indeklima end skoler med et højere forbrug. Der må forventes betydelige muligheder for reduktion af energiforbruget ved hensigtsmæssig projektering og drift af bygningerne.

Kilderne til luftforurening i skoler varierer betydeligt afhængigt af brugen af klasseværelserne. Personer og aktiviteter vil til tider forurene luften i klasseværelserne langt mere, end selv de kraftigste ventilationsanlæg i skoler kan klare (Blomsterberg et al, 1998). Til tider vil ventilationsbehovet i et klasseværelse være i størrelsesorden 5-10 luftskifter i timen, mens det i andre perioder kan være væsentligt lavere. Disse store variationer kan de færreste skoler håndtere, uden at brugerne påtager sig et ansvar for luftkvaliteten og brugere af vinduer og lignende til udluftning. Bygningernes og deres brugeres evne til at håndtere de skiftende ventilationsbehov kan være mere afgørende for indeluftkvaliteten i brugstiden end størrelsen af det luftskifte, som tilvejebringes af skolernes installationer.

Brugertilfredsheden i en skole med effektive brugerstyrede udluftningsmuligheder kan være på højde med tilfredsheden i en skole med kraftig mekanisk ventilation. Dette kan forekomme overraskende, da udluftning gennem vinduer ofte medfører gener på grund af træk og lave temperaturer. Brugere er af gode grunde tvunget til at afveje disse gener med generne fra dårlig luftkvalitet (Gunnarsen et al, 1998). Generne fra forøget luftskifte er størst, når det er koldt, hvilket begrænser energiforbruget i den forbindelse. Der eksisterer kun begrænset viden om mulighederne for at spare energi ved brugerstyret behovstilpasning sammenlignet med traditionel varmegenvinding i større ventilationsanlæg.

Det ydre miljø med eventuelle støj- og luftforureningskilder begrænser brugen af vinduesåbninger til udluftning i visse skoler. Skoler i fredelige omgivelser uden forurening bør på den anden side kunne udnytte deres særlige muligheder for simple ventilationsløsninger, herunder brugen af vinduesudluftning.

Varmeforbruget i danske skoler ligger, for de fleste skolers vedkommende, mellem 80 og 170 kWh/m² som vist i kapitel 2. Denne store variation afspejler forskelle mellem opbygningen af klimaskærmen, herunder isoleringsstandard, forskelle mellem udnyttelse og brugstider og - for denne undersøgelse særligt vigtigt - forskelle mellem de ventilationstekniske løsninger.

I bygningsreglementet er udtrykt eksplicite funktionskrav til balanceret mekanisk ventilering af klasserum. Men samtidig tillades alternative ventilationsløsninger, hvis det kan sandsynliggøres, at der derved kan opretholdes sundhedsmæssigt tilfredsstillende forhold.

I denne undersøgelse vurderes bygningsudformningers og ventilationsløsningers konsekvenser for energiforbruget. Herunder analyseres varmegenvinding, behovstilpasning, regulerbarhed, udjævning af ventilationsbehov og mulighederne for brugerindgreb. Endvidere diskuteres om de ventilationsstekniske valg i tilstrækkelig grad understøtter udviklingen i folkeskolen, der omfatter mere differentieret undervisning, mere varierende størrelser af klasser og grupper og flere computere i stamklasser og særlige rum.

Igangværende byggeprojekter

Som en del af projektet har Statens Byggeforskningsinstitut deltaget i dialogen om igangværende byggeprojekter med projektets samarbejdspartnere.

- **Skanska**, der har købt skolerne i Farum Kommune, har ønsket at renovere skolerne for at opnå forbedringer og optimere den samlede økonomi for investeringer, drift og vedligeholdelse i et 20-årigt perspektiv. Dette har medført, at alle skolerne med mekanisk ventilation har fået varmegenvinding på deres anlæg, at ventilationsprincipperne er ændret i to skoler, blandt andet for at forbedre ventilationseffektiviteten, og at en skole, der ikke tidligere havde mekanisk ventilation, har fået installeret ventilationsunits i de enkelte klasser. Hver enkelt skole er gennemgået og diskuteret i projektet.
- **Ballerup Kommune** har efter en brand i en skole været tvunget til at genopbygge den delvist. Ventilationsprincipperne er diskuteret i projektet, og kommunens øvrige skoler er gennemgået.
- **Københavns Kommune** er ved at bygge en ny skole på Skoleholdervej og en større tilbygning til Lundehusskolen. Der er afholdt møder med de projekterende på begge projekter, hvor ventilationsprincipperne er diskuteret. På Skoleholdervej er det tanken at projektere for naturlig ventilation. Særligt principperne for forvarmning af indblæsningsluften har været diskuteret. Lundehusskolen skal have mekanisk ventilation, og det er tanken at indbygge on-off styring af ventilationen i de enkelte klasser. Mulighederne for vinduesudluftning fremmes desuden med høje og lave vinduer og vinduer i begge sider, så både skorstensvirkningen og vindtrykket kan udnyttes til at forøge luftskiftet. På den baggrund er det tanken, at skolens ventilationsanlæg kun skal være i drift i kolde perioder, hvor trækgenerne i forbindelse med vinduesudluftning vil være store. Derudover er flere andre skoler i kommunen gennemgået og diskuteret.
- **Cenergia** har projekteret Stege Skole og renoveringen af et afsnit af Egebjerg Skole inden for de sidste år. Det renoverede afsnit af sidstnævnte skole har naturlig ventilation, der understøttes af ventilatorer på varme dage. Skolen har delvist åbent plan, og det centrale rum er dobbelt så højt som klasserummene. For at udnytte skorstensvirkningen er afkaståbningen placeret ved loftet i det centrale rum. Indblæsningsluften forvarmes i jordkanaler, krybekælder og konvektorer i klasserummene. Stege Skole har naturlig ventilation, hvor udsugningsluften føres over taget i kanaler, der er ført op i den centrale høje gang for at forøge skorstensvirkningen. Indblæsningsluften forvarmes i konvektorer. Principperne for begge skoler er gennemgået.

Der er endvidere afholdt møde om ventilationsprincipper med de projekterende af Trekroner Skole. Skolen bygges efter afholdelse af en arkitektkonkurrence om projekteringen.

Metode

For at samle data som baggrund for en analyse af det årlige el- og varme-forbrug blev udvalgte skoler besøgt, og tegninger af skolerne blev gennemgået. De indsamlede data er desuden blevet brugt til at identificere fordele og ulemper ved de forskellige ventilationsløsninger. Årsforbruget af energi til ventilation og opvarmning er oplyst af skolerne. Materialet er herefter analyseret for at kunne vurdere konsekvenserne af ventilationsløsningerne for energiforbruget. Løsningerne er vurderet i forhold til opvarmingsenergi og elenergi, regulerbarhed og brugerindflydelse samt træk og andre gener.

Skolernes energiforbrug er analyseret i overensstemmelse med metoden, som er beskrevet i SBI-Anvisning 184, Bygningers energibehov. Metoden er modificeret i overensstemmelse med ISO 13790 (European Committee for Standardization, 1999) for at kunne håndtere særlige forhold som driftstider og nogle af de særlige ventilationstekniske løsninger.

Beregningerne er gennemført måned for måned baseret på middelværdier for udetemperaturen og en antagelse om, at indetemperaturen er 20 °C. De generelle benævnelser og forudsætninger kan opsummeres som vist i tabel 3.1.

I hver skole er udvalgt et normalklasserum, der typisk vil være hjemklasserum for en skoleklasse. Ventilations- og opvarmningsforhold er derpå analyseret for dette rum og de umiddelbart tilknyttede gangarealer. Skolernes samlede energiforbrug afhænger af en række andre forhold, som knytter sig til gange, specialrum og fællesrum, men dette er ikke inddraget i analysen.

Tabel 3.1. Generelle forudsætninger og benævnelser for analysen af de enkelte skoler.

Personbelastning i klasserummene	29 personer
Grundventilation	Den luftudskiftning, der er tilvejebragt af bygningen og installationerne uden for brugstiden og i brugstiden med lukkede vinduer i de naturligt ventilerede skoler
Maks. ventilation	Maksimal luftudskiftning i forbindelse med vinduesudluftning eller drift af eventuel mekanisk ventilationsanlæg
Behov for ventilation	I overensstemmelse med BR-95: Tilførsel af udeluft på 5 l/(s person) plus 0,4 l/(s m ²). Der regnes kun med ventilering af klasserummene i brugstiden klokken 8 til 14. Heri kan indgå perioder med grundventilation og maks. Ventilation, hvis skolen udluftes gennem vinduer
Transmissionstab	Varmetabet gennem facader, loft og gulv
Ventilationsvarmeforbrug	Varmeforbruget til opvarmning af ventilationsluften til 20 °C uden varmegenvinding
Varmetilskud	Varmetilskuddet i klasserummet fra personer, belysning, solindfald og halvdelen af elforbruget i ventilatorer
Varmegenvinding	Reduktion af ventilationsvarmeforbruget baseret på en virkningsgrad for varmeveksler på 60 %
Varmebehov	Summen af transmissionstab og ventilationsvarmeforbruget fratrukket varmetilskuddet og varmegenvindingen
Elbehov	Elbehovet til lufttransport i overensstemmelse med det maksimalt tilladte specifikke elforbrug til lufttransport efter BR95: 2.500 J/m ³ for anlæg med fast ydelse og 3.200 J/m ³ for anlæg med variabel ydelse
Specifikt energibehov	Varme- og elforbruget per kvadratmeter baseret på det samlede areal af det betragtede skoleudsnit
Maks. temperatur	Temperaturen i klasserum ved 26 °C ude og maks. ventilation

Bygningsbeskrivelse

Skolerne i tabel 3.2 er udvalgt til videre analyser. Hver især repræsenterer de et ventilationsprincip, som på det foreliggende grundlag må anses for at være lovende. Samtidigt har skolernes ventilations systemer været under overvejelse, renovering eller ombygning, så analysen tillige har været relevant for de igangværende byggeprojekter.

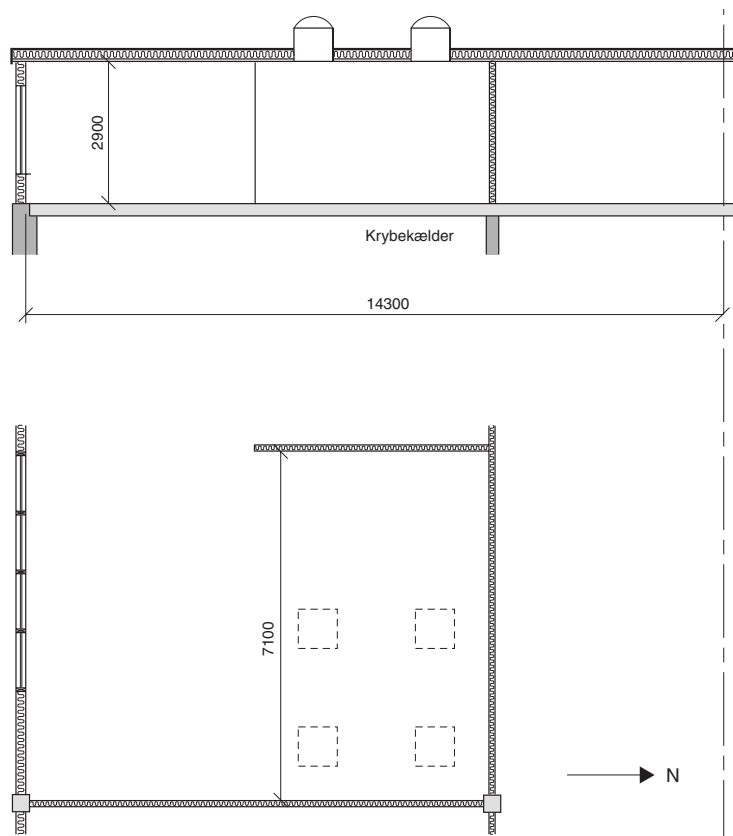
Umiddelbart vurderes det, at der i alle skolerne kan tilvejebringes sundhedsmæssigt tilfredsstillende forhold ved et lavt energiforbrug. Skolerne er opført mellem slutningen af 60'erne og slutningen af 90'erne. De repræsenterer en række forskellige løsninger med hensyn til blandt andet plan, facade, isoleringsstandard og ventilation. Forskellene mellem de målte energiforbrug, der fremgår af tabel 3.17, kan derfor kun i begrænset omfang henføres til de ventilationstekniske løsninger. Forskellene skyldes endvidere usikkerhed om afgrænsningen af, hvilke arealer og forbrug, der skal medregnes. Skolerne er valgt som eksempler på udformning af ventilation, og gennemgangen af dem skal sikre, at vurderingen af ventilationsanlæggene bliver baseret på realistiske og gennemførlige tiltag.

Tabel 3.2 De udvalgte skoler og deres ventilationsløsninger.

Skole H	Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding, fortrængningsprincippet
Skole I	Balanceret mekanisk ventilation uden varmegenvinding, opblandingsprincippet. (Den manglende varmegenvinding bryder med princippet om mulig energioekonomisk drift. Skolen er trods dette medtaget for at få flere skoler med balanceret mekanisk ventilation)
Skole J	Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding og on/off styring i de enkelte klasser via bevægelsesfølere, fortrængningsprincippet
Skole K	Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding, opblandingsprincippet. Fabriksfremstillet ventilationsaggregat med varmegenvinding og varmeflade i hvert klasseværelse
Skole E	Ventilatorunderstøttet naturlig ventilation styret af temperatur og CO ₂ med forvarmning af udeluften i jordkanaler og krybekælder
Skole L	Brugerstyret naturlig ventilation ved åbning af vinduer i såvel tag som facader. Automatisk vinduesåbning ved høje temperaturer og i forbindelse med frikvarterer
Skole M	Naturlig ventilation styret af temperatur og CO ₂ med forvarmning af udeluften i konvektorer ved facaden

Skole H

Skolen er opført i 1975. Den har balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding og med en udformning baseret på fortrængningsprincippet. Den har meget stor bygningsdybde med stor afstand til facaden i de centrale dele. Fortrængningsprincippet er indført som led i en renovering, der blev gennemført i 1998-1999.



Figur 3.1. Snit og plan af skole H. Mål i rum.

Tabel 3.3. Størrelse af det analyserede udsnit af skole H.

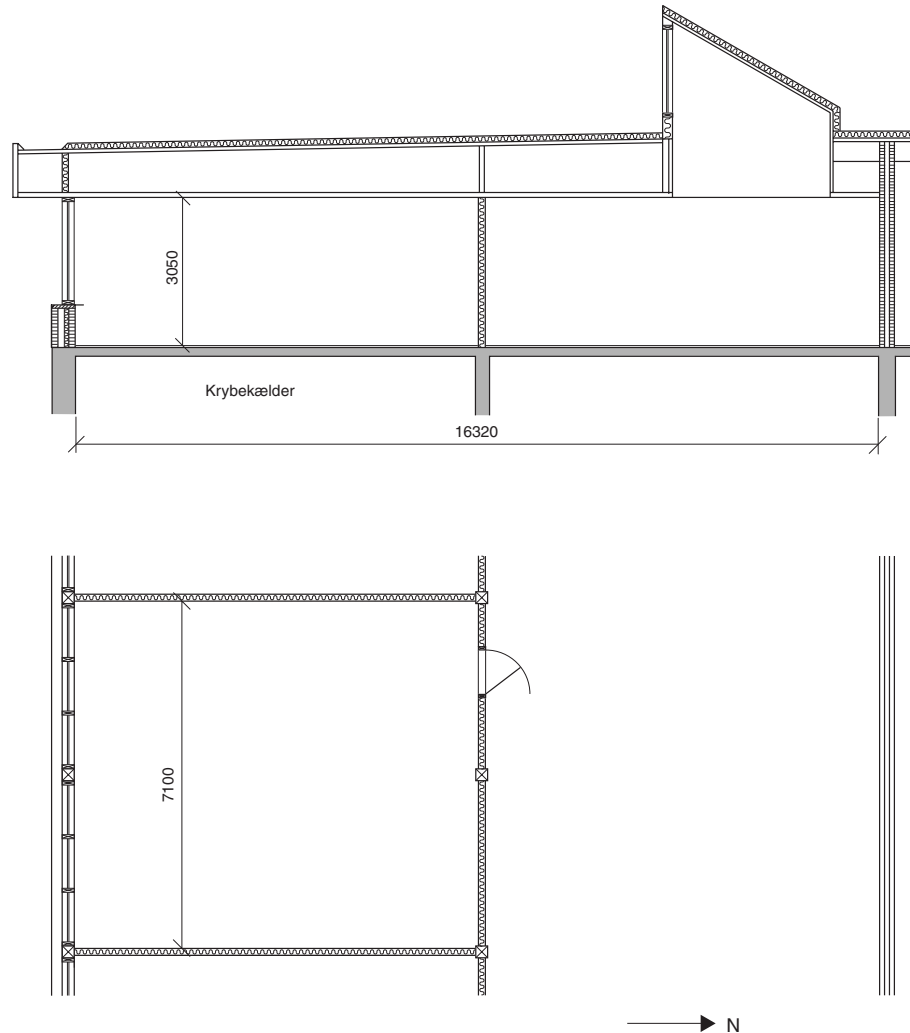
Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
67	33	100	194	202

Tabel 3.4. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole H vinter og sommer.

	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	3,1	3,1	0,8	0,6
Ventilation sommer (h ⁻¹)	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Skole I

Skolen er opført i starten af 1970'erne. Den har balanceret mekanisk ventilation efter opblandingsprincippet. Der er ikke varmegenvinding mellem indblæsnings- og udsugningsluften. Den har meget stor bygningsdybde. En del af skolen er genopført med et andet ventilationssystem efter en brand i 1999. Denne del af skolen er ikke med i analysen.



Figur 3.2. Snit og plan af skole I. Mål i rum.

Tabel 3.5. Størrelse af det analyserede udsnit i skole I.

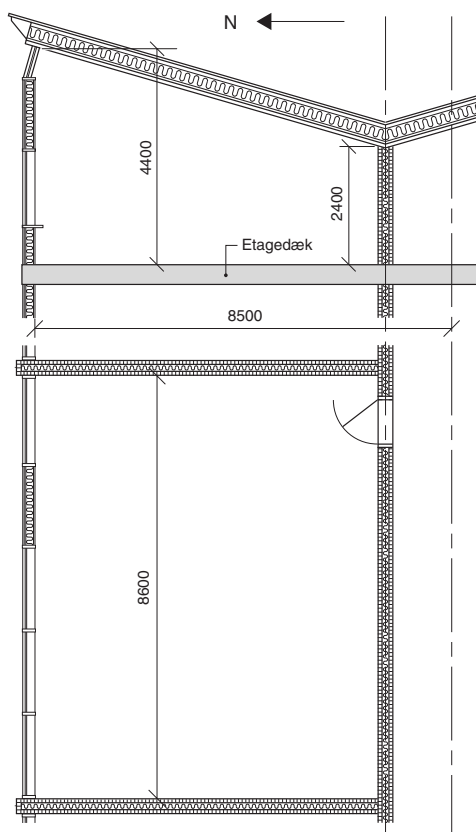
Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
57	56	113	174	262

Tabel 3.6. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole I vinter og sommer.

	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	3,5	3,5	0,9	0,7
Ventilation sommer (h ⁻¹)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Skole J

Den analyserede tilbygning til skolen er opført i 1998. Den har balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding efter opblandingsprincippet. I de enkelte klasser kan ventilationen være tændt eller slukket baseret på et signal fra en bevægelsesføler. Når et klasserum står tomt i mere end 15 minutter, afbrydes den mekaniske ventilering af det aktuelle rum af on/off spjæld i tilslutningskanalerne for udsugning og indblæsning. Der opretholdes konstante trykforhold i ventilationssystemets hovedkanaler ved regulering af omdrejningshastigheden for ventilatorerne. Skolen har begrænset bygningsdybde med et klasserum og en gang i skolens tværsnit. Skolens facader med oplukkelige vinduer både højt og lavt i klasserummene giver gode muligheder for effektiv udluftning gennem vinduerne.



Figur 3.3. Snit og plan af skole J. Mål i rum.

Tabel 3.7. Størrelse af det analyserede udsnit af skole J.

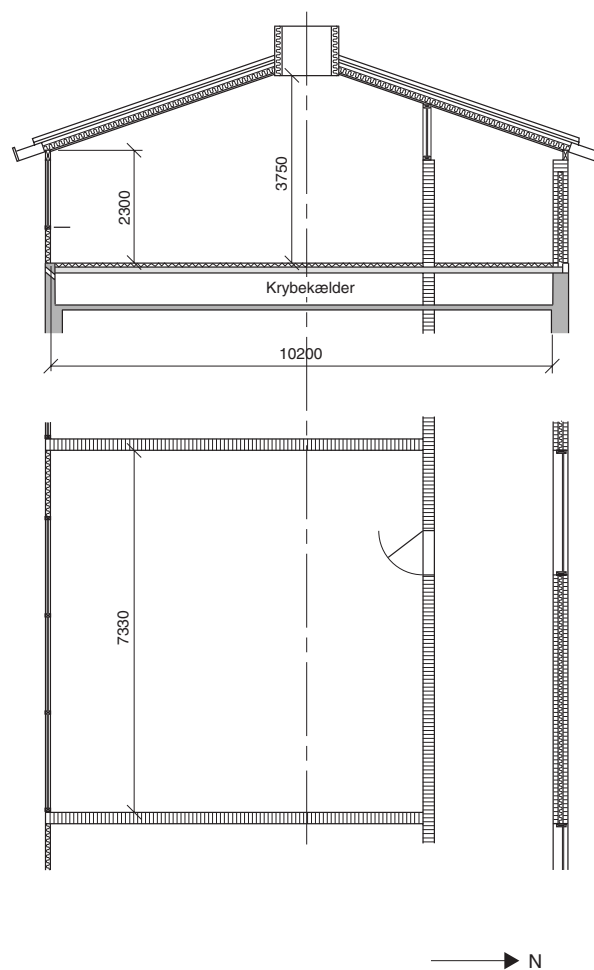
Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
60	13	73	204	39

Tabel 3.8. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole J vinter og sommer.

	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	3,0	3,0	0,8	0,6
Ventilation sommer (h ⁻¹)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Skole K

Skolen har balanceret mekanisk ventilation baseret på opblandingsprincippet. Hvert klasseværelse har eget fabriksfremstillet ventilationsaggregat med varmegenvinding forsynet med vandbaseret varmeflade og ventilatorer. Bygningsdybden er moderat med en gang og et klasserum i tværsnittet.



Figur 3.4. Snit og plan af skole K. Mål i rum.

Tabel 3.9. Størrelse af det analyserede udsnit af skole K.

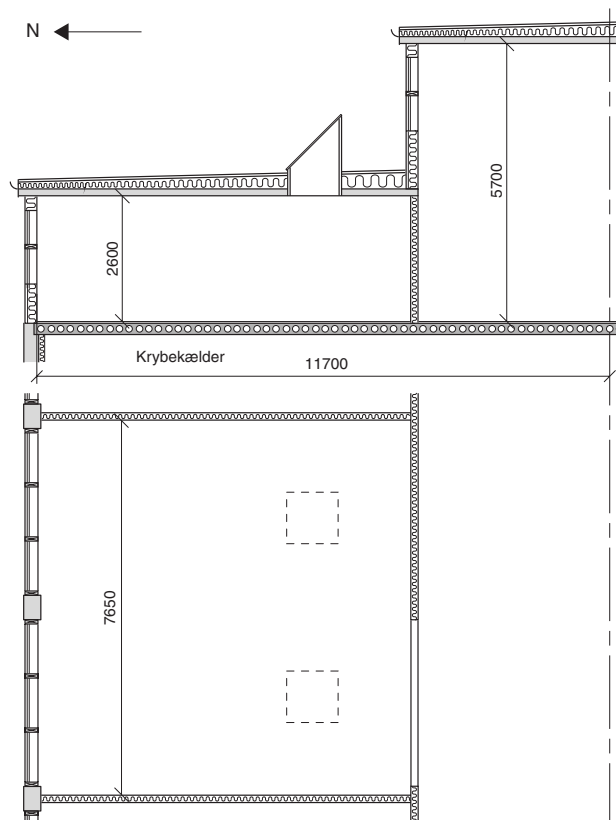
Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
55	19	74	177	118

Tabel 3.10. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole K vinter og sommer.

	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	3,5	3,5	0,9	0,7
Ventilation sommer (h ⁻¹)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Skole E

Skolen har ventilatorunderstøttet naturlig ventilation styret af temperatur og CO₂ med forvarmning af udeluften i jordkanaler og krybekælder. Lærere og elever har endvidere mulighed for at åbne vinduer i facade og tagvinduer, hvis der opstår et særligt friskluftsbehov, fx på særligt varme dage. Skolen har stor bygningsdybde med centrale rum med lang afstand til facaderne. Det analyserede område har en række eksperimentelle tiltag for at reducere energiforbruget. Dette omfatter visning af øjebliksværdier for CO₂ indholdet i hvert klasserum og ventilatorunderstøttet naturlig ventilation, der yderligere forstærkes af en solskorsten, hvor solindfaldet udnyttes til at opvarme afkastluften og derved forstærke skorstensvirkningen. Området er en mindre del af den langt større skole.



Figur 3.5. Snit og plan af skole E. Mål i rum.

Tabel 3.11. Størrelse af det analyserede udsnit af skole E.

Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
60	30	90	156	140

Tabel 3.12. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole E vinter og sommer.

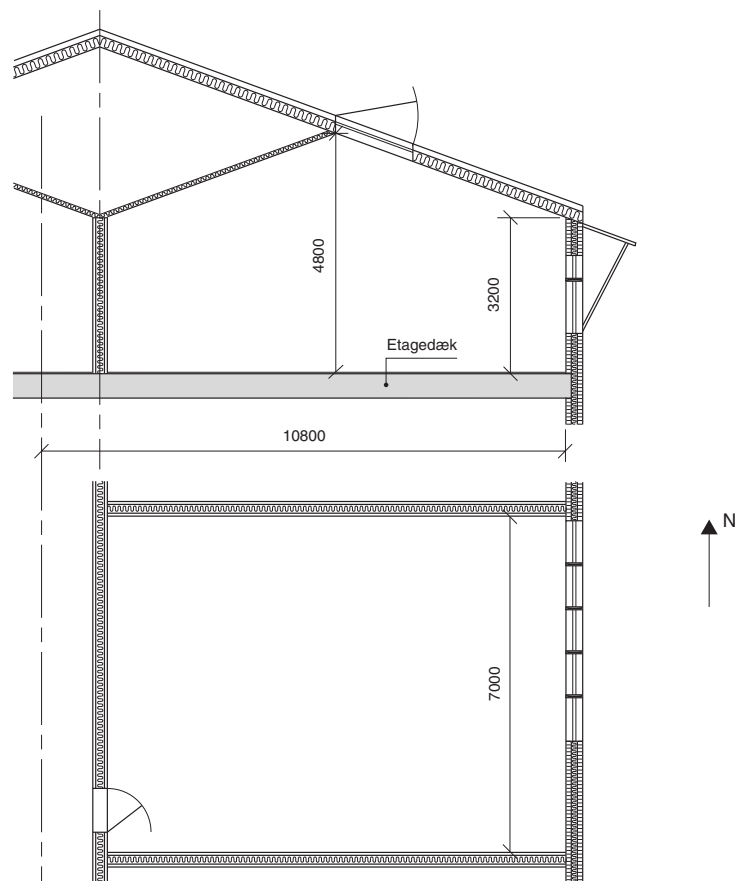
	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	11,1 ¹⁾	3,9	1,1	0,8
Ventilation sommer (h ⁻¹)	0,1	17,3 ²⁾	17,3	4,4	3,2

¹⁾ Åbne ventiler og udluftning i frikvartererne.

²⁾ Åbne vinduer i hele skoletiden.

Skole L

Skolen er oprindeligt opført i 1973 og gennemgribende renoveret i 1997-1998. Den har udelukkende naturlig ventilation ved åbning af vinduer i såvel tag som facader. Brugerne forventes at åbne vinduerne ved behov, og derudover åbnes vinduerne automatisk ved høje temperaturer og i forbindelse med udringning til frikvarter. Bygningsbredden på 22 m giver plads til et snit med et klasserum og en bred gang/fællesrum.



Figur 3.6. Snit og plan af skole L. Mål i rum.

Tabel 3.13. Størrelse af det analyserede udsnit af skole L.

Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Transmissionstal W/K
69	9	78	270	38

Tabel 3.14. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole L vinter og sommer.

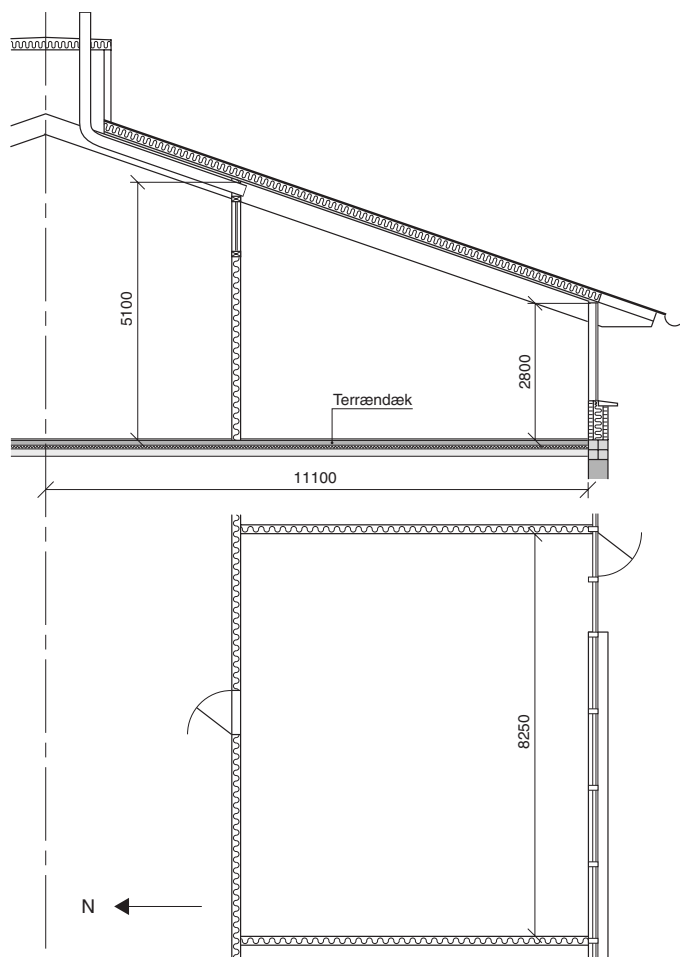
	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Naturlig vent. vinter (h ⁻¹)	0,1	8,6 ¹⁾	2,3	0,6	0,4
Naturlig vent. sommer (h ⁻¹)	0,1	8,4 ²⁾	8,4	2,2	1,6

¹⁾ Udluftning i frikvarter via motorstyrede vinduer samt et andet facade vindue.

²⁾ Motorstyrede vinduer samt et andet facadevindue åbnet hele skoletiden.

Skole M

Skolen har naturlig ventilation styret af temperatur og CO₂ med forvarmning af udeluften i konvektorer ved facaden. Konvektorerne varetager derfor både forvarmning af udeluften og temperaturstyringen af rumluften. Bygningsdybden er forholdsvis stor med et snit, der indeholder klasserum på begge sider af en indre gang med vinduer i taget. Luftudskiftningen drives af den skorstenvirkning, der opnås i kanaler, som er ført fra klasserummene op gennem taget via den indre gang. Klasserummene har fleksible foldedøre, der i variabel udstrækning kan åbnes mod den indre gang.



Figur 3.7. Snit og plan af skole M. Mål i rum.

Tabel 3.15. Størrelse af det analyserede udsnit af skole M.

Klasseareal m ²	Gangareal m ²	I alt m ²	Klassevolumen m ³	Varmetabstal W/K
59	32	91	233	86

Tabel 3.16. Forudsætninger vedrørende luftudskiftningen i skole M vinter og sommer.

	Grund	Maks.	Behov	Mid/døgn	Mid/uge
Ventilation vinter (h ⁻¹)	0,1	5,3 ¹⁾	2,6	0,7	0,5
Ventilation sommer (h ⁻¹)	0,1	9,9 ²⁾	9,9	2,6	1,9

¹⁾ Åbne ventiler og udluftning i frikvartererne.

²⁾ Ventiler og vinduer åbne i hele skoletiden.

Resultater

Tabel 3.17. Oversigt over årligt energiforbrug til opvarmning og ventilation for de udvalgte skoler baseret på aflæsninger af varmemålere og skolernes samlede areal.

	Bemærkninger	Varmeforbrug MWh	Areal m ²	Specifikt varmeforbrug kWh/m ²
Skole H	Ventilationsanlæg under renovering	959	9.280	103
Skole I	En del af skolen er under renovering efter brand	192*	9.487	200*
Skole J	Tilbygning fra 1997	824	9.166	90
Skole K	Bygning under renovering	1.550	10.600	146
Skole E	To afsnit renoveret 1995	124*	17.825	85*
Skole L	Renoverede afsnit taget i brug februar 1998, august 1998 og april 1999	599	8.195	73
Skole M	Opført 1996	920	8.000	115

* Tallene refererer til de analyserede dele af skolerne.

Tabel 3.18. Beregnede tal for årligt varmebehov til opvarmning og ventilation.

	Transmission kWh/m ²	Ventilation kWh/m ²	Varmetilskud kWh/m ²	Samlet varmebehov kWh/m ²	Elbehov til ventilation kWh/m ²
Skole H	197	27	65	159	7
Skole I	228	25	70	183	6
Skole J	53	32	56	29	12
Skole K	155	32	75	112	9
Skole E	169	35	61	143	0
Skole L	47	57	54	50	0
Skole M	93	51	68	76	0

Energiforbruget påvirkes af en del forhold, som ikke kommer til udtryk i foranstående beregninger. I beregningen er de generelle forudsætninger, som er beskrevet i tabel 3.1, nemlig fastholdt for alle skoler for at gøre beregningerne sammenlignelige. I tabel 3.20 er forudsætningerne ændret baseret på de i tabel 3.19 anførte skoler for at få en vurdering af forudsætningernes betydning for energiforbruget.

De beregnede specifikke varmebehov er mindre end de målte forbrug i de fleste skoler. Skole H's forbrug bliver overvurderet med 57 % i modelberegningerne. Det hænger sammen med, at betydelige indre arealer med et lille varmebehov ikke er med i det analyserede areal. Skole L og J har et 32-68 % større forbrug, end modelberegningerne peger på. I begge skoler analyseres 2. etage, hvor varmetabet gennem gulvet er ubetydeligt. Det beregnede forbrug er opgjort for skole J's nye tilbygning, der har et langt mindre forbrug end resten af skolen. I skole K og M har de ikke analyserede arealer formodentlig et større varmetab end det analyserede udsnit omkring et normalklasserum, mens skole I og E har rimelig overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier.

Tabel 3.19. Ændrede forudsætninger for beregningerne for de enkelte skoler.

Skole H	Ventilationseffektiviteten ændret fra 1 til 1,2 på baggrund af fortrængningsprincippet. Ventilationsbehovet i brugstiden dermed nedsat fra 3,1 til 2,6 h ⁻¹
Skole I	Elforbruget i ventilatorer nedsat fra 2.500 J/m ³ til 2.000 J/m ³ på baggrund af manglende varmegenvinding
Skole J	Klasserummene kun i brug i 4 timer om dagen. On/off styringen muliggør på den baggrund en reduktion af anlæggenes ydelse på 20 % i brugstiden
Skole K	Elforbruget i ventilatorer er nedsat fra 2.500 J/m ³ til 2.000 J/m ³ , fordi der ikke er sluttet kanaler til de små aggregater
Skole E	Ingen ændringer
Skole L	Ingen ændringer
Skole M	Ingen ændringer

Tabel 3.20. Varme- og elbehov beregnet efter de generelle forudsætninger og ændret i overensstemmelse med tabel 3.19.

	Ændret specifikt varmebehov kWh/m ²	Ændret specifikt elbehov kWh/m ²
Skole H	153	6
Skole I	184	5
Skole J	23	9,6
Skole K	113	7
Skole E	-	-
Skole L	-	-
Skole M	-	-

De ændrede forudsætninger giver, som det ses, besparelser på omkring 20 % af det beregnede elbehov i forhold til beregningerne, som er baseret på standardforudsætningerne. Besparelserne på varmebehovet er 20 % i skole J og i størrelsesorden 1-4 % for øvrige skoler.

Diskussion

Skole H

Skolen har balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding efter fortrængningsprincippet. Det beregnede specifikke varmebehov er ret højt på trods af varmegenvindingen. Dette hænger sammen med et temmelig højt varmetransmissionstab gennem de store glasfacader og den beskedne isolering mod krybekælder. Det mekaniske ventilationsanlæg giver gode temperaturforhold. I forbindelse med den store bygningsdybde er det afgørende, at den mekaniske ventilation fungerer og vedligeholdes optimalt, fordi afstanden til facaden og de oplukkelige vinduer visse steder er meget stor. Det vurderes, at fortrængningsprincippet kan forøge ventilationseffektiviteten og dermed mindske energiforbruget en smule. En mindre del af det årlige elbehov på 7 kWh/m² skyldes tryktabet i varmeveksleren og måske de ekstra kanallængder, der er nødvendige, fordi udsugningsluften skal møde indblæsningsluften i varmeveksleren.

Den mekaniske ventilation er berettiget på grund af en række forhold, men i det ekstreme tilfælde, hvor lufttransporten kunne tænkes at ske uden elforbrug, kan dette forbrug på 7 kWh/m² spares. Det kan ses i forhold til, at dette elforbrug i ventilationsanlægget muliggør en varmegenvinding på 25 kWh/m². El og varmeenergi kan ikke sammenlignes direkte, da produktionen ikke har samme CO₂-emission og pris. CO₂ produktionen per GJ vil være 2,8-3,6 gange så stor ved elproduktion som ved varmebeholdning. Ventilatorernes elforbrug muliggør en besparelse på næsten fire gange så meget

varmeenergi og kun en besparelse i CO₂ belastning, der er lidt større end den samlede CO₂ belastning fra ventilatordriften.

Skole I

Skolen har balanceret mekanisk ventilation uden varmegenvinding efter opblandingsprincippet. Der er et stort specifikt varmeforbrug som følge af højt varmetransmissionstab og manglende varmegenvinding. Den manglende varmegenvinding er et brud på princippet om, at de viste skoler skal være gode og energiokonomiske. Men skolen er analyseret, fordi ventilationsprincippet har været diskuteret i forbindelse med genopbygningen af den brændte del af skolen og for at få analyseret flere forskellige skoler med mekanisk ventilation. Den store bygningsdybde nødvendiggør mekanisk ventilation.

Skole J

Skolen har balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding og on/off styring i de enkelte klasser. Skolens varmeforbrug er meget lavt som følge af god isolering og installation af varmegenvinding. Det beregnede varmebehov er lavere end det målte for hele skolen. Det hænger sammen med, at isoleringsstandarden på den oprindelige skole ikke er så høj som standarden i tilbygningen. Det vurderes, at der kan opnås besparelser ved det installerede system, der tilpasser ventilationsanlæggets ydelse til behovet i de enkelte klasserum. Vinduerne har en udformning, der muliggør effektiv udluftning, når det bliver nødvendigt i forbindelse med særligt kraftige belastninger i de enkelte rum.

Skole K

Skolen har balanceret mekanisk ventilation efter opblandingsprincippet med aggregater i hvert klasserum. Skolen har et middel transmissionsvarmetab og har også et middel varmebehov på trods af, at der er installeret varmegenvinding i det mekaniske ventilationsanlæg. Rumudformningen med skrå lofter og stor højde i de centrale dele giver god plads til de decentrale ventilationsanlæg. Det må antages, at tryktabet i de anvendte decentrale ventilationsanlæg er betydeligt lavere end i større anlæg. Elforbruget til lufttransport må således formodes at være lavere end beregnet med de anførte standardforudsætninger.

Skole E

Skolen har ventilatorunderstøttet naturlig ventilation. Det analyserede udsnit af skolen har et lavt varmebehov pga. kraftig efterisolering af tag og facader samt montering af nye vinduer i forbindelse med en omfattende renovering, hvorved hele facaden er udskiftet og taget ændret fra at være fladt til at have en svag hældning. Varmebehovet reduceres også som følge af et varmetilskud fra jordkanaler mm. Om sommeren får man en kølevirkning ved brugen af jordkanalerne. Brugen af jordkanaler kan, ud fra et hygiejnisk synspunkt, være problematisk. Det er vigtigt at undgå indtrængning af vand og snavs og at rengøre dem jævnlige, så den uundgåelige kondensering af vand på kanalernes inderside i visse perioder om sommeren ikke giver anledning til skimmelsvampevækst. Det kanalbårne system forekommer at have begrænset kapacitet, særligt på lune vindstille dage, og der må forventes et begrænset elforbrug til ventilation. Det er vigtigt, at brugerne af skolen bliver gjort opmærksom på begrænsningerne i systemet, og hvilke handlemuligheder de har ved kraftige belastninger, herunder at de selv skal åbne vinduerne ved behov.

Skole L

Skolen har naturlig ventilation med vinduesudluftning. Varmebehovet er lille som følge af god isolering og af, at skolen har to etager. Det i bygningsreglementet krævede luftskifte kan om vinteren opnås ved at lufte ud i frikvarter-

terne med de automatiske åbninger suppleret med et facadevindue fuldt åbent. Systemet er ekstremt brugerstyret og udmærker sig ved at være logisk og klart forståeligt. Når vinduerne ikke åbnes, er der en meget lille luftudskiftning i klasserummene. Der er end ikke ventilationssprækker i vinduesrammerne. Rengøring og anden brug af skolen uden for tiden, hvor de motorstyrede vinduer åbnes regelmæssigt, må blandt andet formodes at kunne give uheldige fugtbelastninger, som de aktuelle brugere må håndtere ved åbning af vinduerne. Brugen af vinduer til udluftning giver trækgener, og det kan opfattes som et brud på intentionerne om at bygge mere fleksible skoler, at denne skole kræver udluftning mindst én gang i timen, og at det uvægerligt giver trækgener om vinteren. Dette kan dog i nogen grad bruges positivt i forbindelse med den bevidstgørelse af eleverne om indeklimaforhold, som dette medfører.

Skole M

Skolen har naturlig ventilation med forvarmning i konvektorer. Skolen har et varmebehov på lidt under middel. Dette skyldes et ret lavt varmetransmissionsstab og godt varmetilskud gennem de sydvendte vinduer. Den kanalbase-rede ventilation har begrænset kapacitet. Det er nødvendigt at supplere denne luftudskiftning med vinduesudluftninger i betydeligt omfang. Temperaturstyringen af klasserummene kan til tider fungere dårligt. Konvektorerne skal både forvarme indblæsningsluften og opvarme klasserummene, og der vil ikke altid være sammenfald mellem disse to varmebehov. På en kold vinterdag med mange elever til stede må det forventes, at varmebehovet er begrænset, men der vil samtidig være behov for forvarmning af indblæsningsluften. Det er usikkert, om systemet kan håndtere denne situation, uden at der bliver for varmt i rummene.

Balanceret mekanisk ventilation

Et anlæg for balanceret mekanisk ventilation med lufttydelser i overensstemmelse med bygningsreglementet vil med stor sikkerhed kunne tilvejebringe sundhedsmæssigt tilfredsstillende forhold i en skole. Ydelserne er ikke tilstrækkelige til at håndtere alle tænkelige belastninger, men suppleret med oplukkelige vinduer vil denne løsning være et fornuftigt valg i mange skoler. Dette gælder særligt for skoler i støjende eller forurenede omgivelser, for skoler med stor bygningsdybde eller store, sammenhængende arealer og for klasserum med særlige belastninger.

Skoler med mekanisk ventilation vil lettere kunne dimensioneres til at kunne håndtere eventuelle stigende varmebelastninger fra øget brug af computere i klasserummene. Udformningen af skolernes plan og snit vil være afgørende for, om der skal foretrækkes opblandingsventilation eller fortrængningsventilation. Behovstilpasningen byder på særlige udfordringer. Store centrale anlæg kan forsynes med individuel ydelsesstyring for de enkelte klasserum. En simpel on/off styring på baggrund af bevægelsesmeldere med spjæld i tilslutnings- eller fordelingskanaler i forbindelse med trykstyring i hovedkanalerne kan være tilstrækkelig.

Elforbruget til ventilatorer i typiske anlæg med balanceret ventilation og varmegenvinding er ofte mindre end en fjerdedel af den besparelse i opvarmningsenergi, der typisk opnås i varmevekslere.

Fabriksfremstillede ventilationsaggregater, der opsættes i hvert enkelt klasseværelse, har et betydeligt potentiale for at give bedre tilpasning af ventilationen i de enkelte rum, samt for at reducere anlægsomkostningerne og gøre ventilationen mere forståelig for den enkelte bruger. Måske kan der også opnås varmebesparelser samt reduceret forbrug i ventilatorer i det simple anlæg med begrænsede kanallængder. Erfaringerne er endnu begrænsede, og det vil være naturligt at være særligt opmærksom på støj, holdbarhed, vedligeholdelsesudgifter og nødvendig bestyknings af de enkelte anlæg. I den valgte skole er de decentrale anlæg bestykket med varmeblade.

Det er muligt, at dette ikke er nødvendigt for et anlæg med en meget effektiv varmeveksler.

Naturlig ventilation

Naturlig ventilation baseret på åbning af vinduerne kan i visse særlige tilfælde være tilstrækkelig. Det skal sikres, at vinduerne åbnes tilstrækkeligt - mindst én gang i timen - til at udskifte luften et par gange. Sådant et system kan kun fungere under optimale ydre forhold i bygninger med begrænset dybde og under inddragelse af skolens brugere. Systemet stiller krav til vinduernes udformning, hvor vindtryk og skorstensvirkning forøger luftudskiftningen, hvis tværventilering eller vertikalventilering er mulig. Det stiller også krav til brugernes opførsel, og endelig kan det begrænse brugen af lokalerne, da træk og kølig luft må forventes at give kraftige gener ved udluftning om vinteren.

Byggematerialerne skal udvælges, så de ikke forurener indeluften unødvendigt, og de skal have stor kapacitet for lagring af temperatur og luftforurening. Det vil være nødvendigt med forøget luftvolumen for at have tilstrækkelig kapacitet til at kunne begrænse udluftningerne til én gang i timen. Opvarmningssystemet skal have forøget kapacitet for hurtigt at kunne opvarme den tilførte luft. Denne løsning har store muligheder for at virke med et lille energiforbrug. Det forventes endvidere, at en del af de forstyrrelser i undervisningen, som vinduesåbninger og trækgener medfører, vil kunne retfærdiggøres på baggrund af, at løsningen er let at forstå og kan medvirke til en forøget bevidsthed om ansvaret for miljø og sundhed blandt de enkelte elever.

Naturlig ventilation baseret på permanente åbninger, kanaler og forvarmning af indblæsningsluften kan være et attraktivt supplement til vinduesudluftning. Der kan også være hjælpeventilatorer til at forøge luftudskiftningen på vindstille eller lune dage uden vindtryk eller skorstensvirkning. Ved forvarmning af ventilationsluften undgås en del af trækgenerne, og det kan være muligt at få varmetilskud fra jorden eller andre gratis varmekilder. Ved udelufttilførsel på linie med bygningsreglementets eksplicite krav og med begrænset behovstilpasning kan energiokonomien blive problematisk sammenlignet med egentlig varmegenvinding.

Særlige problemer med temperaturstyringen opstår, når forvarmningen af ventilationsluften er koblet til rumtemperaturstyringen. Med skiftende brug og belastning af klasseværelser er der sjældent sammenfald mellem behovet for varme til forvarmning for at undgå træk og for rumopvarmning.

Andre forhold af betydning

Jordkanaler byder på særlige hygiejniske problemer. Kanalerne skal udføres med stor sikkerhed mod vandindtrængning. Derudover kan der være problemer om sommeren, hvor den varme udeluft indeholder vand, der kondenserer på jordkanalernes overflader med deraf følgende risiko for skimmel- og svampevækst. Kanalerne skal kunne inspiceres, og de skal rengøres jævnligt for at undgå skimmelsvampevækst.

Skolebygninger skal være robuste, og de klimastyrende foranstaltninger skal være forståelige af hensyn til brugernes aktiviteter og uddannelse (Undervisningsministeriet, 1997). Det vil være hensigtsmæssigt, at eleverne bliver i stand til aktivt at påtage sig et ansvar for sundhed og miljø, herunder særligt energiforbruget. Skoler med komplicerede og centralt styrede ventilationsanlæg understøtter kun i mindre grad disse intentioner.

Flere undersøgelser har vist, at brugere med indflydelse på egne forhold vil være mere tilfredse med indeklimaet. Når flere personer er sammen i en klasse, er der ikke altid enighed om udluftningsbehov, og det kræver naturligvis en særlig indsats at skabe enighed og at udføre indgrebene. Dette kan forstyrre undervisningen, men samtidig kan det udnyttes til at skabe en større bevidsthed om ansvaret for belastninger af det ydre miljø i forbindelse med egne aktiviteter og ansvaret for egen sundhed blandt eleverne.

4. Belysningsforhold

Kort historisk overblik

Historisk set har lys og vinduer altid spillet en væsentlig rolle i skolebyggeriet. I de tidligste skoler var dagslys den eneste brugbare belysningskilde, og det var naturligt at betragte vinduer som en vigtig bygningsdel. Man var opmærksom på vinduets muligheder og virkninger. Lyset blev også i nogle skoler brugt i en symbolsk forstand, sådan som man sædvanligvis ser det i kirker og andre statslige autoritære bygninger. Lærerens rolle som autoritet eller klasserummets stemning kunne understreges af lysindtagets placering.

I sidste halvdel af 1800-tallet kom der for alvor gang i skolebyggeriet, specielt i de større byer. Der var særlig fokus på de sundhedsmæssige faktorer, hvorved vinduer som formidlere af lys og luft fik en fremtrædende betydning. Både læger og arkitekter diskuterede dette, og der udarbejdedes særskilte retningslinjer for vinduernes rette størrelse, placering og udformning. Denne tendens fortsatte helt til slutningen af 1950'erne, og man kan se intentionerne og interessen for funktionelle facadeløsninger med særlig vægt på dagslysendtagets placering afspejlet i adskillige af efterkrigstidens skolebyggerier. Det er dog ikke alle, som er lige vellykkede. Den stigende industrialisering betød, at det blev billigere og lettere at anvende elektrisk belysning, men ligesom man tidligere diskuterede kvaliteten af dagslyset, havde nogle, bl.a. Mogens Voltelen og Poul Henningsen, erkendt, at det samme var nødvendigt med det elektriske lys. I denne periode udarbejdede Undervisningsministeriet og Statens Byggeforskningsinstitut en serie rapporter/anvisninger under titlen "Nyt skolebyggeri", hvoraf nr. 7 specielt omhandler elektrisk lys i klasselokaler (Statens Byggeforskningsinstitut, 1959).

De nyopdagede muligheder inden for både belysning og elementbyggeri betød, at man i 60'erne ikke længere fokuserede på vinduets dagslysfremmidlende betydning, vinduet blev generelt et element i facadens æstetiske udtryk. Samtidig opstod der en generel opfattelse (misforståelse, som desværre stadig er udbredt i dag), at "god" belysning er lig ensartet belysning med en styrke, som tillader et normalt seende menneske at kunne læse og skrive ubesværet. Vores evne til at styre indeklimaet, derunder belysningen, var efterhånden på et sådant niveau, at man kunne "kompensere" for selv de mest "umulige" termiske og dagslysmæssige lysforhold. Den stigende bevidsthed om de termiske problemer i skolernes indeklima førte til, at den "adfærdsopdragende" holdning om at benytte vinduet til den nødvendige udluftning (luft dog ud! – kampagner) nu blev afløst af den holdning, at problemerne kun kunne klares med store og avancerede ventilationsanlæg. Vinduer blev nu anset som "problematisk", bl.a. på grund af at solen kunne skinne ind og bidrage til lokalernes overophedning.

Oliekriserne i 1970'erne betød, at det endnu engang gik ud over vinduerne - nu på grund af varmetabet. Vinduesarealet blev yderligere reduceret, bygningsreglementet anviste et vinduesareal på 15 % af gulvarealet. I Sverige og USA eksperimenteres der i denne periode også med vinduesløse klasselokaler, hvor fordelene bl.a. beskrives som et fuldt kontrollerbart indeklima, og at man undgår, at børnene bliver "distraherede" af udsigten!

I 1980'erne lå skolebyggeriet stort set stille. De skoler, der blev bygget, adskiller sig ikke synderligt fra den type, man byggede i 70'erne, og der er derfor ikke nogen tydelig tendens i byggeriet. Den energibevidsthed, der fulgte i kølvandet på oliekriseerne, skiftede nu til en mere "grøn" bevidsthed affødt af nye begreber som "Drivhuseffekten", "CO₂-udslip" og "huller i

ozonlaget". Energieffektiv belysning/sparepærer og rudetyper med varmeisolerende belægninger er produkter, som er en direkte konsekvens af dette. I 1992 udgav Lys & Optik og Lysteknisk selskab pjecen "God og energirigtig skolebelysning", og skolens lysforhold kom således igen til diskussion. De anviste løsninger er måske energiøkonomiske i forhold til den tids standard, men udnyttelsen af dagslyset omtales ikke.

1990'erne er på mange måder blevet sundhedens og trivselens årti, hvilket i og for sig har betydet et "comeback" til vinduet og dagslyset, idet man i stigende grad er blevet opmærksom på de positive effekter af vinduer - først og fremmest at man kan spare energi ved et højere dagslysniveau, men også at folk trives bedre indendøre, når de samtidig kan følge med i "verden udenfor". Det giver en fornemmelse af både tid og sted. Den nye folkeskolereform af 1993 har medført ændrede undervisningsformer. Differentieret undervisning, tværfagligt arbejde i mindre grupper og anvendelsen af computere i det daglige arbejde stiller nye krav til både rum- og lysforhold. De nye skoletyper, som i disse år udvikles som følge af skolens nye struktur og krav om fleksibilitet, vil antagelig nødvendiggøre, at der udvikles helt nye belysningskoncepter, hvor dagslysudnyttelsen og samspillet mellem kunstlys og dagslys prioriteres højere.

Dagslysforhold i dagens skoler

Energiforbruget til belysning varierer kraftigt fra skole til skole og udgør i nogle tilfælde mere end 50 % af det samlede elektricitetsforbrug. Tidligere undersøgelser (Anders V. Rebsdorf, 1994) viser, at effektiviteten af de installerede anlæg ikke lever op til dagens energikrav, og at kvaliteten af lyset ikke opfylder basale krav til de fysiske rammer for skoleundervisningen, herunder skiftende arbejdsformer og bordopstillinger samt udbredt anvendelse af computere.

Undersøgelser i både Sverige (Rikard Küller et al, 1992), Canada (Warren E. Hathaway, 1995) og USA (Pacific Gas and Electric Company, 1999) har endvidere vist, at dagslys, lyskvalitet og synsforhold har stor betydning for børns trivsel og udvikling. Det er derfor vigtigt, at kravspecifikationer vedrørende belysningsanlæg også medtager de kvalitetsmæssige aspekter af lyset. På Statens Byggeforskningsinstitut gennemføres der i samarbejde med Arkitektskolen i København et ph.d. studium: "Kvaliteten af lyset i skolen" (arbejdstitel). I projektet indsamles viden om lysets betydning for de fysiske rammer, og der udvikles en systematik til at beskrive typiske klasselokaler og undervisningsformer. Denne viden vil direkte kunne benyttes til analyse af de energimæssige forhold vedrørende belysningen.

Hovedparten af de belysningsanlæg, som findes i eksisterende skoler, repræsenterer en gammel og delvist forældet tradition med ringe fleksibilitet. De er baseret på lærercenteret undervisning og er dimensioneret til at opfylde ét krav, nemlig en ensartet belysning af de vandrette flader. Der tages kun i ringe grad hensyn til lokalernes faktiske brug. Der er derfor et stort behov for vejledningsmateriale, som beskriver de krav, der bør stilles vedrørende vinduer, dagslys og kunstlys i skolen samt anvisninger for og demonstration af, hvorledes disse krav opfyldes i praksis.

Metoder, dagslysforhold

Som baggrund for udvikling af bedre belysningsanlæg, gennemføres et måleprogram for analyse og dokumentation af eksisterende anlægs funktion og energiforbrug i praktisk brug.

I det tidligere nævnte ph.d. projekt udvikles samtidig en systematik til at beskrive de kvalitative aspekter af dagslys og kunstlys i skolen, herunder de

visuelle forhold, rumoplevelsen og den generelle brugertrivsel. Denne metode går kort ud på gennem iagttagelser at afdække forhold i belysningen, som traditionelle målemetoder ikke omfatter - bl.a. vanskelige adaptationsforhold.

Som et fælles resultat for nærværende projekt og for ph.d. studiet udvikles der endvidere systematikker til at vurdere den mulige dagslysudnyttelse og forbedre den visuelle kvalitet. Denne metode kan senere benyttes til at vurdere besparelspotentialet ved energitiltag og designforbedringer af typiske belysningsystemer.

Sammenfatning, dagslysforhold

Generelle dagslys- og kunstlysforhold i eksisterende skoler er søgt vurderet ved at gennemgå i alt ni skoler, med tre skoler i hver af kommunerne København, Ballerup og Farum. Skolerne repræsenterer typiske byskoler og forstadsskoler fra det 20. århundrede (fra 1915-1985) uden dog at være dækkende for alle skoletyper i denne periode. Skolerne er udvalgt i samarbejde med kommunerne (og Skanska A/S) bl.a. ud fra et ønske om forskellighed samt et ønske om, at nogle af skolerne har en arkitektonisk udformning, som har fælles træk med de nye skoler, som er planlagt og opført eller under projektering i årene omkring år 2000. Mange af de erfaringer, som er indhentet på skolerne, vil derfor kunne benyttes i forbindelse med planlægningen af de nye skoler.

Oftest antages det, at godt dagslys og høj dagslysudnyttelse forudsætter store vinduer. I de undersøgte skoler varierer forholdet mellem rudeareal og gulvareal (glasprocent) mellem 10 og 25 %, men der er ikke nogen entydig sammenhæng mellem glasprocent, lysmængde eller lyskvalitet.

Hovedparten af de undersøgte skoler er opført i 1970'erne med et rustikt design præget af mørke materialer og farver. I alle disse skoler ville dagslysforholdene blive væsentligt forbedret blot ved at gøre overfladerne lysere. Dette gælder skolerne C, D, E, F, H og K.

Blandt de undersøgte skoler forekommer det bedste dagslys i de to skoler, der har de enkleste vinduesløsninger, nemlig almindeligt sidelys fra én side gennem vinduer i facaden, begge med et rudeareal på 15 % af gulvarealet. Dette gælder skole A (fra 1915), hvor rumhøjden er 3,5 m samt skole G (fra 1962), hvor rumhøjden er 3,15 m. Medvirkende til det gode dagslys i disse skoler er, at rumdybden er forholdsvis beskeden - mindre end 2 gange rumhøjden - samt at der er lyse farver på vinduesrammer, vinduesnicher og alle overflader.

I seks af skolerne er det almindelige sidelys suppleret med lys gennem højere placerede vinduer, enten som højtplacerede vinduer trukket tilbage fra facaden som i skolerne B, C og N eller ovenlys som i skolerne D, E, og K. I de fleste tilfælde er rummene med lysåbninger rigtigt "tænkt", men flere detaljer medfører, at dagslyset alligevel ikke er tilfredsstillende. Der er to fælles hovedproblemer ved de højtsiddende lodrette vinduer: De er ikke forsynet med en solafskærmning af tilstrækkelig kvalitet, og vinduesomgivelserne er for mørke. Begge forhold medfører blændingsproblemer og store kontraster, som bevirker, at de underliggende dele af klasselokalerne virker dunkle.

To af skolerne med ovenlys er renoverede åben-plan skoler med dybe lokaler. Ombygningerne er ikke gennemført tilstrækkelig omhyggeligt, så ovenlysenes placering er ikke optimal for dagslystilførslen, ligesom der er flere konflikter med placering af belysningsarmaturerne i forhold til ovenlysene.



Figur 4.1. Skole A. Både gang og klasselokaler fremstår velbelyste med dagslys alene. Klasselokalerne er forholdsvis små med høje, sprossede vinduer i den ene langvæg, der sender lyset langt ind i rummet. Det største problem med rum der modtager kraftigt lys fra en side er, at der kan opstå blændingsproblemer, når man kigger direkte mod vinduesvæggen. Dette er også i nogen grad tilfældet her, hvor en høj brystning bevirker, at udsigten domineres af kig til himlen og dens forholdsvis kraftigere lysintensitet. Vinduesnichen og sprosserne afhjælper i nogen grad kontrastoplevelsen, men de farvede gardiner er med til at forstærke den. Lyse rumoverflader og materialer vil være at foretrække, da det vil formindske kontrastforholdene.



Figur 4.2. Skole G. Lokalet er velbelyst med en god kontrastfordeling og kun en smule himmelblænding. Orienteringen mod syd bevirker, at der er behov for solafskærmning. Dette har man valgt at løse med et udvendigt lameludhæng samt indvendige gardiner. Normalt er permanent solafskærmning ikke hensigtsmæssig i Danmark, hvor vi har gråvejrs 2/3 af tiden, men i dette tilfælde er udhænget med til at afhjælpe blændingsgener fra himlen og udjævne lysfordelingen ind gennem rummet. Anvendelse af indvendige persienner eller rullegardiner i stedet for de nuværende gardiner ville give en større lysmæssig fleksibilitet, idet de giver bedre mulighed for delvis afskærmning.



Figur 4.3. Skole B. Klasselokalerne er belyst fra to sider, idet der er et højtsiddende vinduesbånd over dør og skabsvæg i den ene side og et gennemgående vinduesparti ud mod gårdhaven i den modstående væg. Det diagonale lysindfald bevirker, at der kun er få steder i lokalet, som ikke modtager dagslys. De højtsiddende vinduer sender lys ned på vinduespartiet ud mod haven og er på den måde med til at reducere hårde kontraster mellem interiør og udsigt. Til gengæld er der blændingsproblemer ved det højtsiddende vinduesbånd, hvilket dels skyldes, at partiet omkring vinduet er meget mørkt, dels at der ikke er nogen form for afskærmning.



Figur 4.4. Skole C. Den lavere del får dagslys fra et gennemgående vinduesbånd med udsigt til skolegården, mens det største areal hovedsageligt får dagslys fra et stort højtsiddende vinduesparti placeret over nichen. Som udgangspunkt giver disse lysindtag en god og nuanceret lysfordeling i hele lokalet, og mørke hjørner er stort set undgået. Træbeklædningen i den lavere del stjæler en del af reflekslyset, og det samme gør sig gældende for loftet i det store rum, hvor man med fordel kunne udnytte den skrånende flade til at reflektere lyset tilbage på vinduespartiet for at dæmpe kontrasten. De mørke vinduesrammer skaber også, især i de højtsiddende vinduer, unødige kontrastproblemer.



Figur 4.5. Skole C. Vinduespartierne er udstyret med mørke eller mønstrede gardiner som eneste afskærmning. Disse gardiner er især uhensigtsmæssige i de højtiddende vinduer, hvor de dels er svære at nå og vedligeholde, dels er ufleksible i brug, da de ikke giver samme mulighed, som fx persiener for at variere lysindfaldet.



Figur 4.6. Skole N. Hjemklasseområder har ensidigt dagslysindfald fra dels et stort højtiddende "kvist-vindue", dels nogle mindre udsigtsvinduer samt en glasdør i lokalets lavere del. På trods af det forholdsvis store vinduesareal er der problemer med dagslysniveau og -fordeling. Dette skyldes primært vinduernes uensartede placering og størrelse i forhold til lokalernes udformning, hvilket giver store forskelle i lysniveau. Trælammellerne i "kvistvinduerne" burde være lysere og være justerbare, således at de kunne bruges til at styre lysniveauet og reducere eventuel blænding fra himlen. Problemerne med den uensartede lysfordeling forstærkes af materialevalget til vægge i nicher (tegl), lofter (træuldsbeton), og lysning omkring vinduerne (krydsfiner). Dette "rå look" bevirker, at der er en dårlig udnyttelse af reflekslyset, samt at der opstår generende store kontrastforskelle mellem kigget til himlen gennem de højtiddende vinduer og resten af lokalet.



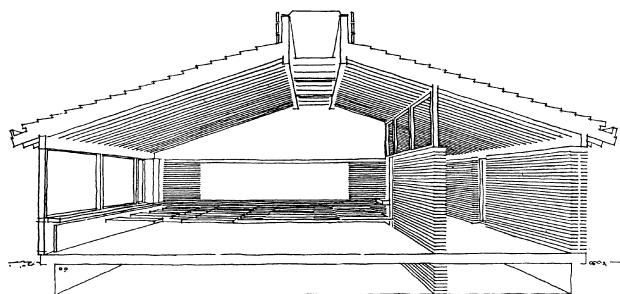
Figur 4.7. Skole D. Skolen var oprindelig en åben-plan skole, hvilket betyder, at der flere steder i skolen er både almindelige sidelysvinduer og ovenlys. Desværre har ombygningen bevirket, at disse ovenlys ikke længere altid er placeret der, hvor man kunne få mest gavn af dem, og der forekommer således urimeligt mørke områder i nogle af lokalerne. Derudover er lysarmaturerne flere steder monteret direkte under ovenlysene. En del af ovenlysenes trærammer er for nylig blevet hvidpigmenterede – det samme gælder i øvrigt også for loftdragerne - og det er tydeligt at se, at dette dels nedsætter kontrasterne, dels er medvirkende til at skabe et lysere og mere luftigt indtryk.



Figur 4.8. Skole E. Skolen er en ombygget åben-plan skole med forholdsvis dybe klasselokaler. Adgangssituationen fra fællesareal til klasser virker dunkel, da lysniveauet i fællesarealet er højere end i klasserne, og der er oplevelsesmæssigt lysere og rarere i fællesarealet end i klasselokalerne.



Figur 4.9. Skole E. Som supplement til de vinduer, der er placeret i klasselokalets ene sidevæg, findes desuden ovenlys. Disse ovenlys er desværre fortrinsvis placeret i et system i tagfladen, der ikke altid korresponderer med behovet for lys inde i klasserne. Flere af dem har fået isat en slags lameller som solafskærmning, der forekommer klodsede, og som samtidig reducerer lystilførslen drastisk. Dagslysendfaldet reduceres desuden af, at man har valgt at placere belysningsarmaturer direkte under ovenlyset. Rummets dybde i forhold til højden og det deraf følgende forholdsvis lave dagslysniveau bevirker, at der, især med sol i udsigten, opstår kontrastproblemer, således at stort set alt, der befinder sig imellem én selv og vinduerne, ses i silhuet.



Figur 4.10. Skole K. Skolen er dagslysmæssigt velplanlagt. Klasselokalerne er forholdsvis velbelysede og har både lavtsiddende vinduesbånd i den ene side samt langsgående ovenlys placeret i den bageste del af lokalet, hvor der er brug for dem. Dette giver en jævnere lysfordeling og et højere dagslysniveau end ved sidelys alene. Derudover er der et højtstående glasparti mellem gang og klasselokaler, hvilket fortrinsvis bevirker, at gangen virker luftigere. At der alligevel, specielt i solskin, er en tendens til, at lokalet fremstår forholdsvis dunkelt og med en uensartet lysfordeling skyldes fortrinsvis farve- og materialevalget. Mørke vinduesrammer bevirker, at der opstår store kontrastforskelle mellem udsigt og interiør, især når man ser ud på en solbeskinnede forgrund. De ubehandlede, mørke murstensvægge, specielt bagvæggen, forhindrer en bedre udnyttelse og fordeling af reflekslyset.

Brugsmønstre for skolernes elbelysning

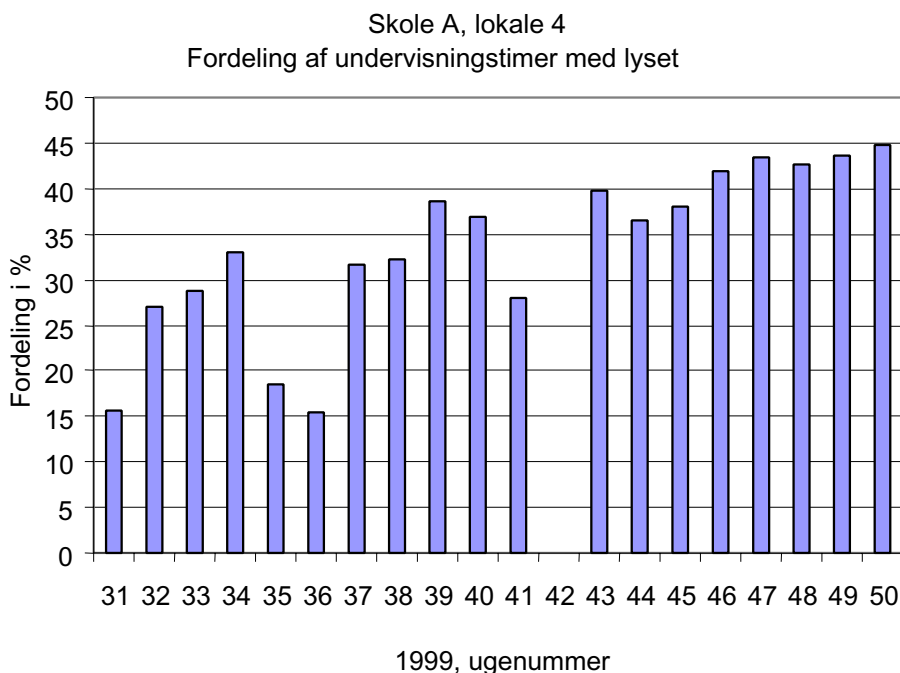
Som led i analysen af eksisterende skolers elforbrug blev der foretaget registreringer i udvalgte lokaler af, hvorledes den elektriske belysning blev brugt, og hvornår der var personer til stede i lokalerne. Der blev udvalgt to repræsentative klasselokaler eller hjemklasseområder på hver af de tre skoler i kommunerne København, Ballerup og Farum. I hvert lokale opsattes en bevægelsesmelder i form af en PIR-føler (passiv infrarød føler) samt en fotocelle i et belysningsarmatur til registrering af, om lyset var tændt. Dataindsamlingen fandt sted i 20-ugers perioder i august til februar.

Resultater, forbrugsmønstre

Sammenfattende for de ni skoler kan det siges, at antallet af timer, hvor lyset er tændt i lokalerne, uden at der er personer til stede, er ret begrænset. Elbesparelsen ved at anvende bevægelsesmeldere i de undersøgte klasselo-

kaler/hjemklasseområder ville være af størrelsesorden 5-10 % af det eksisterende forbrug.

Belysningsforbruget fordeler sig med 80-90 % til undervisningstid og 10-20 % til rengøring. Som ventet anvendes belysningen mest i ugerne omkring nytår, hvor dagene er kortest, men der kan konstateres store variationer afhængigt af brugsmønstre og vejr situationen i de enkelte uger. Forbrugets variation med årstid og vejrforhold siger noget om, i hvilken grad de undersøgte lokaler kan klare sig med dagslys alene. Som eksempel viser figur 4.11 fordelingen af antal undervisningstimer med persontilstedeværelse, hvor lyset har været tændt eller slukket. Det ses, at i ugerne om sommeren benyttes belysningen kun i 15-30 % af tiden, mens anvendelsen stiger hen mod vinterugerne til ca. 45 % af tiden.



Figur 4.11. Figuren viser andelen af det samlede antal undervisningstimer, hvor lyset er tændt.

På de øvrige skoler er den procentvise tid, hvor lyset er tændt betydeligt større. For de undersøgte skoler er lyset gennemsnitligt tændt i ca. 60 % af de timer, hvor der er undervisning (med registreret persontilstedeværelse), men i enkelte lokaler er lyset tændt i mere end 80 % af undervisningstimerne.

Dette indikerer, at energibesparelsespotentialer ved en høj udnyttelse af dagslyset i forhold til en lav udnyttelse er af størrelsesorden 25-45 % af elforbruget til belysning, altså betydeligt højere end det, der kan forventes ved alene at anvende bevægelsesmeldere. Den høje dagslysudnyttelse kan opnås ved et forhold mellem glasareal og gulvareal på helt ned til 15 %, hvis dybden af lokalet ikke er over ca. 2 gange højden fra gulv til overkant vinduer. Ved dybere lokaler bør glasprocenten være højere (20-25 %). Det bør imidlertid bemærkes, at jo dybere lokale, og jo højere vinduerne er placeret, desto vigtigere er det, at specielt den øverste del af vinduerne er forsynet med en effektiv og regulerbar solafskærmning. Anvendelse af lyse farver generelt og specielt omkring vinduerne, er en anden vigtig forudsætning for at opnå en høj dagslysudnyttelse. Herved udnyttes reflekslyset bedre, samtidig med at kontrast mellem vindue og omgivelser reduceres.

5. Krav og retningslinjer for skolebyggeri

Folkeskoleloven indeholder ikke krav til folkeskolens bygninger, men derimod en række krav til skolens pædagogiske virksomhed. De få tekniske krav der findes til skolens lokaler, fremgår af Bygningsreglement af 1. april 1995 (BR 95) (By- og Boligministeriet, 1995) samt af Arbejdstilsynets regler. I SBI-anvisning 196: Indeklimahåndbogen (Valbjørn et al., 2000) er der samlet krav og vejledende værdier til indeklimaet. Desuden er der udarbejdet en lang række blå vejledninger af Den centrale rådgivningstjeneste for skolebyggeri, som blev oprettet i samarbejde mellem Undervisningsministeriet, amter og Kommunernes Landsforening (1976-1985).

Klasserummets størrelse

Ved en arealberegning af klasserummet skal man dels benytte Folkeskoleloven og dels BR 95. Folkeskoleloven bestemmer, at der maksimum må være 28 elever i en klasse, mens BR 95 stiller krav om rumvolumen på minimum 6 m^3 pr. person, når der etableres effektiv, mekanisk ventilation. I et klasserum med et gulvareal på 60 m^2 og med 25 personer er der $2,4 \text{ m}^2$ gulvareal og ca. 8 m^3 rumvolumen pr. person, hvilket stiller særlige krav til ventilation, lydregulering, materialer og rengøring.

Temperaturer og træk

Ifølge Arbejdstilsynets meddelelse 1.01.9 fra 1996 (Arbejdstilsynet, 1996) anses temperaturen for at være passende, når den er i området $20\text{-}24 \text{ }^\circ\text{C}$, men af hensyn til luftkvaliteten bør den holdes på $21\text{-}22 \text{ }^\circ\text{C}$. Lufthastigheden bør ved stillesiddende arbejde holdes under $0,15 \text{ m/s}$, når temperaturen er i det lave komfortområde. Beklædning og aktivitet har også betydning for komfortoplevelsen.

Ventilation og luftkvalitet

BR 95 stiller krav om mekanisk ventilation, hvor indblæsning og udsugning i klasserum skal være mindst 5 l/s pr. person samt $0,4 \text{ l/s}$ pr. m^2 gulv svarende til ca. 6 l/s pr. person ved 25 personer i et lokale med et gulvareal på 60 m^2 . Mekanisk ventilation kan dog fraviges i undervisningsrum ved benyttelse af særlige byggetekniske tiltag, som fx større rumvolumener pr. person, brug af flere udluftningsmuligheder, herunder mulighed for tværv ventilation under forudsætning af, at der kan opretholdes et sundhedsmæssigt tilfredsstillende indeklima. Arbejdstilsynet anbefaler, at der dimensioneres ud fra en gennemsnitlig CO_2 -koncentration på 1000 ppm og at luftskiftet, hvis koncentrationen overstiger 2000 ppm i længere perioder, bør øges, eller personbelastningen reduceres.

Ved valg af materialer bør der tages hensyn til, at materialerne ikke bør afgive gasser og dampe af betydning. Dette kan dokumenteres gennem en indeklimamærkning, der indeholder såvel en sensorisk vurdering som en toksikologisk vurdering, baseret på en kemisk analyse af emissionerne.

Skolebyggeri skal være robust og slidstærkt og holde til mange menneskers daglige og meget forskellige brug. Der skal derfor vælges rengøringsvenlige materialer, hvorved forstås materialer, der kan holdes rene uden brug af specielle rengøringsmetoder og -midler, og materialer der ikke akkumulerer støv og snavs. Materialerne skal også være nemme at vedligeholde.

Dagslys og belysning

Ifølge bygningsreglementet skal arbejdsrum have en sådan tilgang af dagslys, at rummene er velbelyste. Dagslystilgangen vil normalt være tilstrækkelig, når vinduesarealerne ved sidelys svarer til 10 % af gulvarealet eller ved ovenlys mindst 7 % af gulvarealet.

For belysningsanlæg kræves det ifølge BR 95, at energiforbruget begrænses mest muligt under hensyntagen til rummets udformning og anvendelse, og der er krav til belysningens kvalitet og driftstid. Anlægget skal udføres opdelt i zoner med mulighed for styring efter dagslysforhold og aktiviteter. Belysningsanlæg skal udføres på grundlag af DS 700-serien "Kunstig belysning i arbejdslokaler" (Dansk Standard, 1997), hvilket er eksemplificeret i branchevejledningen "Belysning i klasselokaler" (Kahr Frederiksen, 1988) samt i "God og energirigtig skolebelysning" (Lys & Optik, 1993).

Brand

En af de vanskelige ting ved disponeringen af en skole, er brandsektioneringen. Hvis bygningen indeholder mere end én etage, må brandsektionen ikke overstige 600 m² i følge BR 95. Hvis undervisningsafsnittet er i én etage, kan brandsektionen være op til 2000 m². Dette forhold har stor betydning, hvis man planlægger at benytte sig af indskudte etager eller hemse.

Lydforhold

Lyd eller støj kan virke stærkt distraherende og kan derfor medvirke til nedsat koncentration. Det er derfor et vigtigt område, når man skal planlægge et skolebyggeri, både når det drejer sig om nybyggeri, og når det drejer sig om ombygning. Der findes fx i SBI anvisning 172, Bygningers lydisolering (Kristensen, 1992) materiale til brug ved projektering og eftervisning af lydforhold i skoler. BR 95 indeholder ret detaljerede krav til luftlydisolation, trinlydniveau, støjniveau og efterklangstid i undervisningslokaler. Disse krav er fastsat ud fra erfaringer fra 50'erne, 60'erne og 70'erne og baserer sig på det, der i dag må betegnes de gamle undervisningsformer. I rapporten "Lydforhold i undervisnings- og daginstitutionsbyggeri" fra By- og Boligministeriet (By- og Boligministeriet, 1999) er der foretaget en analyse af behov og muligheder for ændrede lydbestemmelser i bygningsreglementet til forbedring af lydforholdene i skoler. Det fremgår heraf, at der blandt andet med henvisning til de nye undervisnings- og indretningsformer, der følger af folkeskoleloven fra 1993, vil være behov for ændrede bestemmelser for lydisolation og efterklangstid.

Miljø

De miljømæssige overvejelser i forbindelse med et byggeri bør indgå allerede fra planlægningsstadiet. Dette er endnu ikke indeholdt i lovgivningen, men mange bygherrer har erkendt behovet og kræver, at der ved planlægning og projektering tages miljøhensyn. I BPS publikation 121 gives en række vejledninger til miljørigtig projektering (BPS, 1998).

Arbejds miljø

Arbejds miljølovgivningen indeholder en lang række bestemmelser i forbindelse med planlægning, projektering, opførelse og renovering af bygninger. De fleste bestemmelser er beskrevet i At-meddelelser, som udsendes af Arbejdstilsynet. Som supplement hertil er der fra Branchesikkerhedsrådet for undervisning (BSR 12) (Branchesikkerhedsråd, 1997, 1999) udsendt vejledninger om forhold, der vedrører skolers arbejds miljø. Disse vejledninger vil sammen med en række mindre publikationer fra BSR 12 være velegnede som baggrundsmateriale for projektering. BSR og Arbejds miljøfondet er nedlagt ved udgangen af 1998, og BSR er erstattet af Branche arbejds miljøråd for undervisning & forskning.

Forslag til lov om elevers og studerendes undervisningsmiljø

Undervisningsministeriet er fremkommet med et forslag til en ny lov om elevers ret til et godt undervisningsmiljø, således at undervisningen kan foregå sikkerheds- og sundhedsmæssigt forsvarligt. Desuden skal elevernes indlæringsmuligheder fremmes, og miljøet omfatter derfor også uddannelsesstedets psykiske og æstetiske miljø. Der vil blive oprettet en selvstændig, statslig institution: "Dansk Center for Undervisningsmiljø", som har til formål at udvikle et godt undervisningsmiljø i Danmark. Forslaget har været til 1. behandling i Folketinget.

6. Rum og arbejde i fremtidens skole

Samfunds- og arbejdsmarkedsændringer og deraf følgende omstilling på uddannelsesområdet

Den mest markante ændring i Folkeskoleloven af 1993 (Undervisningsministeriet, 1994) er kravet til nye undervisnings- og arbejdsformer. Der er tale om en radikal omlægning af hele undervisningsstrukturen. Skolen er et billede på samfundet, idet den imiterer "virkelighedens" arbejdsformer. Derfor kan man sige, at den nye folkeskolelov afspejler den forandring, der er sket i samfundsstrukturen og arbejdsmarkedsforholdene i de seneste 15-20 år. Der er i virkeligheden tale om et paradigmeskift, idet vi bevæger os fra et industrisamfund over i et informationssamfund. Dette er ændringer af en karakter, som vi ikke har været stillet overfor, siden landbrugssamfundet i midten af 1800-tallet blev afløst af industrialiseringen, og "folkevandringen" til byerne blev en realitet.

Undervisningsformer og arbejdssituationer i folkeskolen

Der vil fremover komme til at foregå mange flere forskelligartede aktiviteter i folkeskolen. Klassen bevares som social struktur, for den er stedet, hvor både børn og forældre fra forskellige sociale strukturer mødes og lærer hinanden at kende over et 10-11-årigt forløb. Man kan godt opstille målsætninger for en klasse og have høje forventninger til hele klassen; blot vil forskellige børn nå målet på mange forskellige måder og på flere forskellige niveauer. Denne undervisningsdifferentiering vil kunne nærme sig individualisering, hvor der bliver langt mindre klasseundervisning.

Dels vil der i en klasse kunne finde flere aktiviteter sted på én gang, hvor nogle elever arbejder i gruppe samtidig med, at nogle arbejder individuelt. Og især til gruppearbejdet er der brug for aflastningsområder tæt ved klassen eller i et af værkstedsområderne eller i det pædagogiske servicecenter.

Samtidig sker der en bevægelse bort fra overvejende at tænke i bogligt orienterede læreprocesser - som har en teoretisk karakter og er relativt kontekst-uafhængige - til at mene, at eleverne lærer bedre, hvis læreprocesserne organiseres, så der sker en kombination af teori og praksis - fx gennem at lave modeller i matematik. Her bliver læreprocesserne langt mere kontekst-afhængige og stiller dermed større krav til skolens fysiske udformning.

Samfundet kræver, at man skal kunne omstille og videreudanne sig og selv evne at være med til at organisere og udvikle et arbejdsfelt. Der vil derfor *både* foregå aktiviteter, der har karakter af opgaveløsning, hvor såvel indhold og metode er fastlagt på forhånd og projektorienterede undervisningsforløb, hvor det *ikke* på forhånd er lagt fast, hvad emnet præcis er - det er del af opgaven at definere det. Her ligger det *ikke* fast, hvilken metode og formidling, der er mest velegnet - det vil netop være en del af opgaven at finde den rette metode og formidlingsform i forhold til emnet.

Man kan således træffe en meget større spændvidde i, hvad der foregår af aktiviteter i skolen, og et meget større "flow", hvor eleverne i løbet af en undervisningsenhed skal bruge flere forskellige steder i skolen.

Lad os forsøgsvis forestille os, hvad der kan foregå i en ganske almindelig dansk folkeskole en ganske almindelig dag:

Det er midt på formiddagen en mild, men mørk gråvejrsdag i november.

2. klasse lærer multiplikation og efter en introduktion i klassen, hvor de får udleveret korkfliser på 30 cm x 30 cm, går de fleste, i grupper på to, ud af klassen for at finde så store gulvarealer, at de kan lægge fliserne ud i felter, som de derefter tegner for endelig at opstille det gangestykke, der svarer dertil. To grupper bliver i klassen. Læreren går rundt og hjælper.

3. klasse har natur/teknik, hvor de skal lave nogle spiringsforsøg. Døren i vinduesvæggen står åben meget af tiden, da eleverne skal ud for at køre jord ind i en trillebør. I øvrigt står døren også åben ud til gangen, fordi nogle børn er gået over for at hente en rulle stærk tråd i håndarbejdsafsnittet.

4. klasse har engelsk, der på denne dag foregår som klasseundervisning. 8. klasse har projektarbejde, der foregår i grupper på 2-5. De henter jævnlige bøger, båndoptager eller videokamera i det pædagogiske servicecenter. De bruger pc'er til at søge informationer og til at skrive på. Nogle lay-outer deres præsentation på pc'eren, andre synes en papmodel giver den bedste præsentation af projektet.

De har brug for gruppearbejdspladser, hvor de ikke hele tiden bliver forstyrret af andre, og hvor de kan hænge deres skemaer og plancher op - det skal kunne blive hængende uforstyrret hele ugen. På den anden side skal de også kunne komme i kontakt med læreren, så de vil helst ikke for langt væk.

De forskellige arbejdssituationer kunne også opstilles i en skematisk oversigt som angivet nedenfor:

Arbejdsform vs. aktivitet	arbejde alene	arbejde med lærer	arbejde lille gruppe (2-5)	arbejde stor gruppe	arbejde sammen hele klassen/flere klasser
arbejde v. bord stå/sidde					
arbejde v. computer					
arbejde v. tavle eller staffeli					
arbejde på gulv, evt. hynde					
sidde blødt, sofa/læsekrog					
arbejde i værksted fx høvlebænk					
arbejde i værksted, fx natur/teknik					
"passivt" arbejde, lytte, se film etc.					

Opgaven er primært, i relation til ovennævnte arbejdssituationer, at finde måder at skabe et godt indeklima, en god arbejdsbelysning og at undgå enerverende støjproblemer.

Den fysiske udformning af fremtidens skoler

Klasselokalet, som traditionelt er blevet formet efter "frontal-undervisning", er ikke længere brugbart. Tværfaglig- og projektundervisning betyder langt større krav til fleksibilitet. Der vil blive mere bevægelse, og der kræves mere plads til den enkelte elev, når han ikke længere bare skal sidde ned det meste af tiden. Sidst, men ikke mindst, skulle der gerne blive tale om en større rumlig alsidighed, både i forhold til de aktiviteter, der udspiller sig, men også

i forhold til, hvem der skal bruge rummene. Små og store børn har langt fra altid samme behov.

I materialet fra konkurrencen "Rum, form, funktion i folkeskolen" (I.M. Kirkeby, 1998), (M. Olrik et al, 1999) er det tydeligt, at selv med tre vidt forskellige udgangspunkter hhv. en nybygning, en ombygning og en tilbygning, afspejler de 21 besvarelser alligevel nogle generelle tendenser i den rumlige fortolkning af den nye folkeskolelov. Nøgleordene er:

- fleksibilitet, foranderlighed
- åbenhed, rumligt flow
- multifunktionalitet, flere aktiviteter i samme rum
- større rum.

Klasselokalet er blevet til et hjemområde - typisk et større og mere fleksibelt rum end de traditionelle klasseværelser og med flere muligheder for forskellige arbejdsformer. Der er også tendenser til en større åbenhed. De rumlige afgrænsninger og opdelinger er blevet mere "flydende", døre og vægge afløses af en tavle, en reol eller en skydedør.

Faglokalerne er blevet til regulære værksteder, og der er ofte tilstræbt en tæt kontakt mellem inde og ude, samt at flere traditionelt adskilte fag enten deler samme værksted, eller at de ligger i tæt tilknytning til hinanden.

I henhold til de ovennævnte tendenser er der, i forhold til arbejdsmiljøet, flere paradokser. De vigtigste parametre, der indgår i arbejdsmiljøet, er: 1) materialevalg, 2) ventilation, 3) lys, 4) akustik og 5) stress. Det er ikke muligt at opstille almengyldige og fuldstændige svar på alle udfordringer og modsætninger i krav til skolebygninger. Selv ved en konkret byggesag, hvor skolens størrelse og beliggenhed kendes, er der mange forskellige løsninger, og det vil være nødvendigt at anlægge et helhedssyn på indeklimaforholdene i hvert enkelt tilfælde.

Nedenstående er nogle eksempler på problemstillinger, som typisk opstår under projekteringen af en skole med hensyn til belysning, ventilation og akustik:

- En god tilgang af dagslys er en forudsætning for et godt velbefindende og indeklima samt en mulighed for energibesparelser, men der kan opstå problemer med overophedning pga. stort solindfald.
- For at undgå blænding fra den kunstige belysning kræves godt afskærmede armaturer og en fleksibel ophængning af hensyn til den mere fleksibelt organiserede undervisning, der lægges op til i den nye folkeskolelov. En individuel styring af armaturer giver mulighed for en individuel lys-sætning til forskellige brugssituationer. Det kan betyde større anlægsudgifter.
- Naturlig ventilation kræver større, åbne rum, som kan skabe problemer med lydforholdene og derfor stiller nye krav til optimeringen af den akustiske komfort, såsom efterklangstiden.
- Den nye differentierede undervisningsform, der kræver mere plads og mere fleksible rum med muligheder for at sammenlægge/opdele lokaler, kan betyde, at der bliver mere luftlyd og støj. De akustiske forhold er desuden betinget af de valgte materialer (fx fravalg af tæpper) og konstruktionsprincipper (fx valg af naturlig ventilation).

7. De videre undersøgelser

Resterende del af Fase 1

Rapporteringen af fase 1 vil, foruden denne rapport, bestå af en selvstændig By og Byg Resultater, der vil give vejledning til de projekterende og kommunerne i udformning af energieffektive belysningsanlæg, der samtidig opfylder de grundlæggende krav til belysningens kvalitet.

Fase 2

Målet med fase 2, som er bevilget i EFP-2000, er at gennemføre feltundersøgelser i forbindelse med skoler med de identificerede lovende ventilationsløsninger for at dokumentere løsningernes egnethed til at reducere energiforbruget og sikre et tilfredsstillende indeklima. Resultaterne bearbejdes videre i det internationale samarbejde i IEA Annex 36, hvor det er målet at tilvejebringe internationalt koordinerede værktøjer og vejledninger for energieffektiv renovering af uddannelsesbyggeri.

Projektets resultater drøftes nøje i følgegruppen og samarbejdsgruppen, der blev etableret under fase 1, for herigennem at sikre en umiddelbar og direkte overførsel af resultater til skolebyggeriets interessenter i Danmark.

Baggrunden for arbejdet er, at opvarmning og ventilation er de mest energiforbrugende aktiviteter i skolebygninger, og at energiforbruget varierer betydeligt fra skole til skole. Det er ikke påvist, at skoler med lavt energiforbrug har et dårligere indeklima end skoler med et højere forbrug. Væsentlige årsager til variationerne i energiforbruget er forskelle mellem mulighederne for varmegenvinding, behovstilpasning, behovsudjævning og brugergreb. Besparelspotentialet ved optimering af de nævnte forhold er betydeligt.

I fase 1 er der udarbejdet en oversigt over lovende, energieffektive ventilationsløsninger. På grundlag heraf er i samarbejde med de tre samarbejdspartnere udvalgt følgende ventilationsprincipper til nærmere analyse:

- Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding baseret på fortrængningsprincippet.
- Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding baseret på opblandingsprincippet.
- Balanceret mekanisk ventilation med on/off styring i de enkelte klasser via bevægelsesfølere.
- Ventilatorunderstøttet naturlig ventilation styret af temperatur- og CO₂-følere med forvarmning i jordkanaler.
- Naturlig ventilation styret af temperatur og CO₂ med radiatorforvarmning af udeluften.
- Naturlig ventilation via vinduer i tag og facader, der åbnes automatisk ved høje temperaturer og frikvarterer.
- Et fabriksfremstillet ventilationsaggregat med varmegenvinding i hvert klasseværelse.

Udgangspunktet for valg af løsninger har især været ønsket om yderligere belysning af det energibesparelspotentiale, der ligger i optimering af de ovennævnte forhold. Som grundlag for analyserne er udvalgt 7 skoler, hvor der gennemføres nybyggeri eller omfattende renovering, og hvor de anvendte principper er indarbejdet i projekterne. I skolerne måles energifor-

brug, og i udvalgte lokaler måles temperaturer, luftstrømme, CO₂-koncentration mv., og der indhentes oplysninger om gener, tilfredshed samt elevernes og lærerernes muligheder for at justere eget indeklima. Målingerne analyseres med henblik på at identificere muligheder for energibesparelser og begrænsninger i anvendelsen af de anvendte løsninger.

8. Litteratur

Balslev Jørgensen, L., Lund, H., & Nørregård-Nielsen, H. E. (1980). *Danmarks arkitektur: Bd. 5. Magtens bolig*. København: Gyldendal.

Blomsterberg, Å., Sikander, E., & Ruud, S. (1998). *Moderna självdragsventilerade skolor: Utvärdering av ventilation och fukt* (Anslagsrapport A13:1997). Stockholm: Byggnadsrådet.

Boligministeriet. (1995). *Bygningsreglement 1995*. København.

BPS-centret. (1998). *Håndbog i miljørigtig projektering 1-2* (BPS publikation 121-1/2). Taastrup.

Branchesikkerhedsrådet for Kontor og Administration, BSR 6. (1997). *Sikkerhedsorganisationens arbejde med indeklima: Branchevejledning* (2. udg.). København: Arbejds miljøfondet.

Branchesikkerhedsrådet for Undervisning, BSR 12. (1999). *Branchevejledning om arbejdsstedets indretning på undervisningsområdet*. København.

By- og Boligministeriet. (1999). *Lydforhold i undervisnings- og daginstitutioner*. København.

Dansk Standard. (1997). *Kunstig belysning i arbejdslokaler* (5. udg.) (DS 700:1997). København.

ELO-Sekretariatet. (1999). *ELO nøgletalsrapport*. Taastrup.

Energistyrelsen. (2000). *Undersøgelse af energiforbruget i kommunerne i 1998*. København.

European Committee for Standardization, CEN. (1999). *Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for heating* (ISO PrEn 13790). Bruxelles.

Gunnarsen, L., & Santos, A. M. B. (1998). Relative importance of temperature, draft, noise and window area in offices. In *Proceedings of the EPIC' 98: The 2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings*. Lyon, November 19-21. 1998. Vol. 3 (pp. 862-867). Lyon.

Hathaway, W. E. (1995). Effects of school lighting on physical development and school performance. *Journal of Educational Research*, 88(4), 228-243.

Kahr Frederiksen, J. (red.). (1988). *Belysning i klasselokaler* (Branchevejledning, 7). København: Branchesikkerhedsrådet for Undervisning, BSR 12.

Kirkeby, I. M. (red.). (1998). *Rum, form, funktion i folkeskolen: Folkeskoleloven. Folkeskolebyggeri. Temahæfte*. Forskningsministeriet, & Byggedirektoratet. København: Undervisningsministeriet.

Kirkeby, I. M. (red.). (1998). *Skolen: Et fysisk landskab – et mentalt rum*. Skanderborg: Amtscentralen for Undervisning, Århus Amt.

Kristensen, J. (1992). *Bygningers lydisolering: Nyere bygninger* (SBI-anvisning 172). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Küller, R., & Lindsten, C. (1992). Health and behaviour of children in classrooms with and without windows. *Journal of Environmental Psychology* 12(4), 305-318.

Larsen, S. (1993). *Den videnskabende skole*. Hellerup: Steen Larsen.

Olrik, M., & Deichmann, F. (red.). (1999). *Rum, form, funktion i folkeskolen: Folkeskoleloven. Folkeskolebyggeri. Dommerbetænkning*. Forskningsministeriet, & Byggedirektoratet. København: Undervisningsministeriet.

Pacific Gas and Electric Company. (1999). *Daylighting in schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance. Condensed report*. San Francisco, CA: Heshong Mahone Group.

Rebsdorf, A. V.: *Bevægelsesmeldere til styring af belysningsanlæg. Del 2. Forsøg og model* (Teknisk Rapport; 340). Lyngby: DEFU.

Statens Byggeforskningsinstitut, & Undervisningsministeriets Byggeforskningsudvalg. (1959). *Elektrisk lys i klasserum: Synsfunktion, belysning, anlæg* (Nyt skolebyggeri 7). København: Statens Byggeforskningsinstitut.

Undervisningsministeriet. (1994). *Formål og centrale kundskabs- og færdighedsområder – folkeskolens fag*. København.

Undervisningsministeriet. (1997). *Skolebyggeri – med eksempler*. København.

Valbjørn, O., et al. (red.). (2000). *Indeklimahåndbogen* (SBI-anvisning 196). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Yderligere litteratur:

Arkitekten, (1999), 101(4, 5, 20).

Coninck-Smith, N. de. (1989). *Vor lærdoms bygning: Folkeskolens bygninger 1814-1940* (Rapport nr. 2, 1989). København: Miljøministeriet, Planstyrelsen.

Department for Education and Employment, DfEE (1999). *Lighting design for schools* (Building bulletin 90). London: The Stationary Office.

Hinträger, C. (1914). *Die Volksschulhäuser in den verschiedenen Ländern: Bd. I. Volksschulhäuser in Schweden, Norwegen, Dänemark und Finnland* (Handbuches der Architektur. Fortschritte auf dem Gebiete der Architektur Nr. 8). Leipzig.

Københavnske kommuneskolebygninger gennem et halvt aarhundrede (1928). *Arkitekten Maanedshæfte*, 30(mar/apr.), 84-98.

Lundahl, G. (1999). Barn, rum, relationer. *Arkitektur*, 99(4), 4-11, 70-72.

Nørgaard, E., & Coninck-Smith, N. de. (red.). (1990). *At lære og være – i hvilke rammer?* Vejle: Kroghs Forlag.

Siegumfeldt, B. (1992). Arkitektur og kulturoverføring. *Arkitekten*, 94(14), 411-415.

Statens Byggeforskningsinstitut, & Undervisningsministeriets Byggeforskningsudvalg. (1957). *Klasserummet: Funktion og udformning*. (Nyt skolebyggeri 5). København: Statens Byggeforskningsinstitut.

Summary

By og Byg Results 003: Energy efficient schools

Pilot study on heating, ventilation and lighting quality

This report presents the first results of the "Programme for Energy Efficient Schools". The aim of this research programme is to provide the necessary basis for the design and operation of energy efficient schools of the future. Special efforts were made to develop methods for reducing energy consumption for lighting and ventilation also emphasising the creation of a healthy and stimulating indoor climate and at the same time incorporating the requirements to the school of the future.

The main purpose of the present investigations was to survey the energy consumption and assess the energy saving potential in a number of schools. A number of promising and innovative ways of ventilating classrooms was identified and analysed which will be implemented in the immediate future. Furthermore a brief outline of the daylight conditions in some typical schools is presented. The final chapter of this report deals with new trends in teaching and class work organisation and some general trends in the design of future schools.

Interdisciplinary and project-oriented teaching methods require more flexibility and more focus on the individual pupil. A pupil will participate in many different activities in the course of a day with special requirements to space, installations and lighting conditions. The scope for flexibility is particularly in focus as the danger exists that too flexible solutions become confusing and useless. Key words for some general trends in the physical interpretation of the Danish Primary Education Act are: flexibility, changeability, multifunctionality, more activities in the same room and larger rooms.

The use of energy

An overview was prepared that shows the heat, electricity and water consumed annually by a 100 schools from 1996-8. Heat consumption increased slightly over the years while electricity consumption was constant and water consumption decreased by 16 %. In 1998 heat consumption was on average 130 kWh/m² (67-220) while electricity and water consumption was 23 kWh/m² (7-60) and 0.26 m³/m² (0.11-0.57) respectively.

The large variations in consumption were caused by differences in insulation standards, the types and maintenance standards of installations, energy awareness of the operating staff, operation times of heating and ventilation systems, user behaviour and different air change rates.

The use of electricity was analysed in seven schools based on registrations of operation times and power consumption to lighting fixtures and ventilators. The electricity consumption to lighting averages from 3-10 kWh/m² corresponding to 9-32 % of the total electricity consumption of the school. The electricity consumption for ventilation ranges from 3-17 kWh/m² corresponding to 11-37 % of the total electricity consumption of the school. The electricity consumption for computers accounts for up to 14 % (1-3 kWh/m²) of the total electricity consumption. Moreover, a very large part of the electricity consumption - between 38 and 55 % - is used for other purposes, e.g. outdoor lighting, appliances plugged into electric sockets, school kitchen, woodwork room, pumps etc. The distribution of electricity consumption varies greatly from school to school. One reason is that there is great variation in operation times, i.e. the hours that each individual room or corridor is in

use, both with respect to lighting and ventilation. The power was measured in three schools in Ballerup Municipality and the fan effect constituted 70-75 % of the nominal power.

Energy efficient ventilation

In a number of schools ventilation systems and principles have been analysed to identify promising solutions. They were analysed regarding to energy consumption, ability to be controlled and degree of individual control.

Prerequisites for reduced energy consumption are ventilation rates that can be adjusted to existing demands and demands that are evened out by increased volume of classrooms and deposition of heat and air pollution in heavy and porous construction products. Furthermore it is essential that heat recovery systems should be installed where possible.

Balanced mechanical ventilation offers ample scope for heat recovery and high air change rates. The rates specified in the requirements of the Danish Building Regulations are not necessarily sufficient to handle all possible loads in a classroom, but with a supplementary provision of hinged windows this ventilation principle will be the obvious choice in many schools. This is the case particularly in surroundings with noise or air pollution or for schools with large building depth, interconnected rooms or rooms with particular loads. Schools with efficient mechanical ventilation will often be better prepared for increased heat loads i.e. from computers. The choice between displacement or mixing ventilation depends mainly on building layout and possible pathways for ducts. Comparatively high CO₂ generation in connection with electricity production is reason to pay attention to the consumption of electricity for air transport. It can be reduced by installing short simple duct systems and by avoiding pressure-demanding components. The adjustment of ventilation rates according to demands is particularly challenging. Central systems should allow adjustment of rates in each room according to demands. A simple on/off damper in inlet and exhaust ducts controlled by occupancy sensors could be sufficient if the pressure in main ducts is controlled.

Airing through hinged windows combined with a list of prerequisites - including the proper use of windows by teachers and pupils - may be sufficient to run a school energy efficiently. Furthermore school users should be ready to accept draught and periodic cold discomfort at airing during winter conditions. Such a system is only operable if outdoor conditions are not polluted. The school should have reduced building depth, increased room volume and staff and pupils should agree on a comprehensive scheme for operating the windows. The scheme requires window design where wind pressure and stack effects increases the air change rate if cross ventilation or vertical ventilation is possible.

Preheating of inlet air to reduce cold annoyance in systems for natural or fan-assisted natural ventilation may utilise soil ducts or similar. But in practice air exchange rates may often be too limited in such systems. In systems with airflows complying with the Danish Building Regulations, energy consumption without heat recovery becomes a problem.

Factory-made ventilation units with heat exchangers in each classroom may become an attractive alternative in particular if the development of improved products continue. Experience is still limited and it would be prudent to focus on noise, durability and maintenance costs.

When designing a school, it must be considered how the users will act and will want to affect the indoor climate. Users who are willing to share the responsibility for the indoor climate quality is the key to improved indoor climate and reduced energy consumption in schools. Moreover, these conditions may promote the awareness among school children that they share a responsibility for health and environment.

Lighting conditions

General provisions for daylight and artificial lighting were assessed in nine schools. It is often assumed that good daylight and high degree of daylight utilisation require large windows. In the investigated schools the glazing area/floor area ranged from 10-25 %. But no clear relation was found between this ratio and the lighting levels or lighting quality.

Among the investigated schools the best daylight conditions were found in the two schools with the simplest windows. Both had light from facade windows from one side with a glazing area of 15 % of floor area. Other factors contributing to the good conditions were that the depth of rooms was limited to double the ceiling height, and light colours on window frames, niches and all other surfaces.

There are some inherent problems with small highly placed windows. Often they do not have sufficient solar shading and often their immediate surroundings are dark. Both conditions may lead to glare and sharp contrasts and the lower parts of the rooms may seem dark.

In two schools the rooms were very deep and had clearstory windows supplementing the facade windows. However, the clearstory windows were not placed where light is most needed, i.e. in the back part of the rooms. Furthermore, several examples were found where lighting fixtures were placed directly under the clearstory windows. The deep rooms compared with the ceiling height caused rather low lighting levels and as a consequence there were big differences between light and dark areas of the room, particularly in sunlight. Everything between an observer and the facade windows was only seen in silhouette.

As a part of the analysis of electricity consumption in schools the use of electric lighting and the occupancy of classrooms was monitored. Electricity savings by occupancy sensors alone would be 5-10 % of the present consumption. Furthermore, with good daylight utilization the savings could increase to 25-45 %. High use of daylight may be achieved at glazing area/floor area ratio down to 15 % if the depth of the room is less than double the height from the floor to the upper edge of the window. In deeper rooms the window area should be larger.

Bilag

Bilag 1. Skoleoversigt

Bilag 2. Spørge- og registreringsskemaer

Bilag 3. Energiforbrug for 1996 og 1997

Bilag 4. Deltagere i "Program for energieffektive skoler"

Bilag 1. Skoleoversigt

Index	Skolenavn
1	Hornum, 9600 Aars
2	Sønderbro skole, 2300 København S
3	Hillerødgades skole, 2200 København N
4	Tingbjerg skole, 2700 Brønshøj
5	Aars skole, 9600 Aars
6	Østermarksskolen, 9600 Aars
7	Parkskolen, 2750 Ballerup
8	Grantofteskolen, 2750 Ballerup
9	Egebjergskolen, 2750 Ballerup
10	Rugvænget skole, 2750 Ballerup
11	Østerhøjskolen, 2760 Måløv
12	Hedegårdsskolen, 2750 Ballerup
13	Lundebjergskolen, 2740 Skovlunde
14	Måløv skole, 2760 Måløv
15	Rosenlundskolen, 2740 Skovlunde
16	Højagerskolen, 2750 Ballerup
17	Nymarksskolen, 5300 Kerteminde
18	Fjordvangskolen, 5300 Kerteminde
19	Mesinge skole, 5370 Mesinge
20	Rørupskolen, 5560 Aarup
21	Aarupskolen, 5560 Aarup
22	Hornsyld skole, 7130 Juelsminde
23	Stouby skole, 7130 Juelsminde
24	Stenderup skole, 7130 Juelsminde
25	Langhøjskolen, 8961 Allingåbro
26	Allingåbro skolen, 8961 Allingåbro
27	Rougsøskolen, 8961 Allingåbro
28	Stavnsholtskolen, 3520 Farum
29	Bybækskolen, 3520 Farum
30	Stenvadskolen, 3520 Farum
31	Solvangskolen, 3520 Farum
32	Søndermarksskolen, 7190 Billund
33	Langelinie skole, 7100 Vejle
34	Mølholm skole, 7100 Vejle
35	Vestbygården skole, 7100 Vejle
36	Charlotteskolen, 7100 Vejle
37	Søndermarksskolen, 7100 Vejle
38	Petersmindeskolen, 7100 Vejle
39	Nørremarksskolen, 7100 Vejle
40	Højen skole, 7100 Vejle
41	Grejsdal skole, 7100 Vejle
42	Damhavens skole, 7100 Vejle
43	Alsgades Skole, 1764 København V
44	Amager Fælled Skole, nord, 2300 København S
45	Amager Fælled Skole, syd, 2300 København S
46	Bellahøj Skole, 2700 Brønshøj
47	Bispebjerg Skole, 2400 København NV
48	Brønshøj Skole, 2700 Brønshøj
49	Brønshøj Gamle Skole, 2700 Brønshøj
50	Christianshavns Skole, hovedskolen, 1422 København K
51	Christianshavns Skole, filial, 1422 København K
52	Den Classenske Legatskole, 1552 København V
53	Dyvekeskolen, 2300 København S
54	Enghave Plads Skole, 1670 København V

55	Engskolen, 2730 Herlev
56	Frederiksgård Skole, 2720 Vanløse
57	Frederikssundsvejens Skole, 2400 København NV
58	Gerbrandskolen, 2300 København S
59	Grundtvigskolen, 2400 København NV
60	Grøndalsvængets Skole, 2400 København NV
61	Havremarkens Skole, 2200 København N
62	Holbergskolen, 2400 København NV
63	Husum Skole, 2700 Brønshøj
64	Hyltebjerg Skole, 2720 Vanløse
65	Højdevangens Skole, 2300 København S
66	Jagtvejens Skole, 2200 København N
67	Katrinédals Skole, 2720 Vanløse
68	Kildevældsskolen (nord), 2100 København Ø
69	Kildevældsskolen (syd), 2100 København Ø
70	Kirkebjerg Skole, 2720 Vanløse
71	Klostervængets Skole, 2100 København Ø
72	Korsager Skole, 2700 Brønshøj
73	Lundehusskolen, 2100 København Ø
74	Matthæusgades Skole, 1666 København V
75	Nyboder Skole, 1350 København K
76	Ny Carlsberg Vejens Skole, 1760 København V
77	Oehlenschlägersgades Skole, 1663 København V
78	Peder Lykke skolen, 2300 København S
79	Rødkilde Skole, 2720 Vanløse
80	Rådmandsgades Skole, 2200 København N
81	Sankt Annæ Gymnasium, 2500 Valby
82	Skolen i Charlotttegården, 2200 København N
83	Skolen på Islands Brygge, 2300 København S
84	Skolen på Kastelsvej, 2100 København Ø
85	Skolen ved Sundet, 2300 København S
86	Strandparkskolen, 2450 København SV
87	Strandvejsskolen, 2100 København Ø
88	Sundbyøster Skole, 2300 København S
89	Sundpark Skole, 2300 København S
90	Sølvgades Skole, 1307 København K
91	Vanløse Skole, 2720 Vanløse
92	Voldparkens Skole, 2700 Brønshøj
93	Østrigsgades Skole, 2300 København S
94	Kommuneskolen Tønder, 6270 Tønder
95	Holmeskolen, 6270 Tønder
96	Abild skole, 6270 Tønder
97	Jejsing skole, 6270 Tønder
98	Møgeltønder skole, 6270 Tønder
99	Tårnborgh, 4220 Korsør
100	Søndermarkskolen, 3700 Rønne
101	Åvangsskolen, 3700 Rønne
102	Østre Skole, 3700 Rønne
103	Skalmejeskolen, 7400 Herning
104	Snebjerg skole, 7400 Herning
105	Hammerum skole, 7400 Herning
106	Herningholm Skole, 7400 Herning
107	Vallerødskolen, 2960 Rungsted Kyst
108	Hørsholm skole, 2970 Hørsholm
109	Rungsted skole, 2970 Hørsholm

Bilag 2. Spørge- og registreringskemaer

Spørgeskema angående skolers energiforbrug.

SBI Februar 1999 Spørgeskemaundersøgelse om skolers energiforbrug

SKOLE: _____ adresse: _____

Evt. kontaktperson: _____

Kontaktpersons telefonnr., faxnr. og e-mail: _____

Antal elever: _____ Hvilke klassetrin undervises: _____

Fysiske rammer: (arealer angives i henhold til BR 95)

Byggeår: _____ Nuværende areal: _____ m² antal etager: _____

Oprindelig bygning: _____ Areal: _____ m² antal etager: _____

Evt. **større** tilbygning: _____ Areal: _____ m² antal etager: _____

Evt. **større** renoveringer: _____ Areal: _____ m² antal etager: _____

Hvad er renoveret: _____

For typisk klasselokale:

Gulvareal (m²) _____ rumhøjde (m) _____ glasareal (m²) _____ vinduesareal (m²) _____

Hvor mange timer pr. uge benyttes skolen til alm. skoledrift?: _____ timer/uge

I hvilket omfang anvendes skolen til andre aktiviteter end skolens drift (aftenskole, møder...)?

(ca. timer/uge, samt skønnet areal der bruges hertil): _____ timer/uge areal: _____ m²

Er der SFO på skolens område: Ja Nej

Er arealet hertil indregnet i ovenstående: Ja Nej

Areal og antal timer/uge, der anvendes til SFO: _____

Beskriv bygningsformen kort (fx: etagebyggeri, kamskole, åben-plan-skole): _____

Forbrug:

Hvis muligt ønskes oplysningerne også for de foregående to år:
1996 1997

Vandforbrug: _____ 1998 _____ m³/år _____

Varmeforbrug: _____ kWh/år *) _____

El til belysning (hvis kendt): _____ kWh/år _____

El til ventilation (hvis kendt): _____ kWh/år _____

Elforbrug totalt: _____ kWh/år _____

Evt. kommentarer: _____

*) eller anden afregningsenhed

(Spørgeskemaet fortsætter)

Forbrug (fortsat):Opvarmningsform: Olie Elvarme Gas Fjernvarme andetEventuelle særligt energikrævende installationer (fx svømmebad), beskriv: _____

_____**Omfang af mekanisk ventilation**

	Ingen udsugning	indblæsn. & udsugn.	køling	Drift timer/uge:	regulering Ja nej
Klasselokaler:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Skolekøkken:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Sløjdløkkale:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Andet:.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Andet:.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Andet:.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

BelysningsanlægInstalleret effekt inklusiv tavlelys i et typisk klasselokale (samme som på side 1) i W^2/m _____Er belysningsanlægget renoveret: Ja Nej Hvis ja, hvilket år og hvordan: _____

_____Findes der automatisk belysningsregulering: Ja Nej Hvis ja, hvilken form: _____

_____Eventuelle bemærkninger: _____

Tak for hjælpen

Registreringsskema af driftstider og effektforbrug.

Statens Byggeforskningsinstitut.
Program for energieffektive skoler, fase 1

Registrering af driftstider og effektforbrug af lysarmaturer og ventilatorer

Skole: _____

Udfyldt af: _____

Dato _____

Registrering af lys

Klasseværelser (gerne i grupper af ens udstyrede og benyttede værelser)	1	2	3	4	5	6	7	8
Antallet af værelser i gruppen								
Areal af et klasseværelse i m ²								
Brugstid af et klasseværelse i timer (af 60 min.) per uge								
Samlet effekt af lysarmaturer i et klasseværelse i W								
Lysstofrør (L) eller glødelys (G)								
Samlet effekt af tavlelysene i et klasseværelse i W								
Lysstofrør (L) eller glødelys (G)								

Andre rumtyper (gerne i grupper)	1	2	3	4	5	6	7	8
Antallet af rum i gruppen								
Totalt areal af rum(mene) i gruppen i m ²								
Brugstid af et rum i timer (af 60 min.) per uge								
Samlet effekt af lysarmaturer i et rum i W								
Lysstofrør (L) eller glødelys (G)								
Samlet effekt af andre armaturer i et rum i W								
Lysstofrør (L) eller glødelys (G)								

(Skemaet fortsætter)

Gange	1	2	3	4	5
Areal af gang i m ²					
Driftstid af ganglys i timer (af 60 min.) per uge					
Samlet effekt af ganglys i W					
Lysstofrør (L) eller glødelys (G)					

Registrering af ventilation

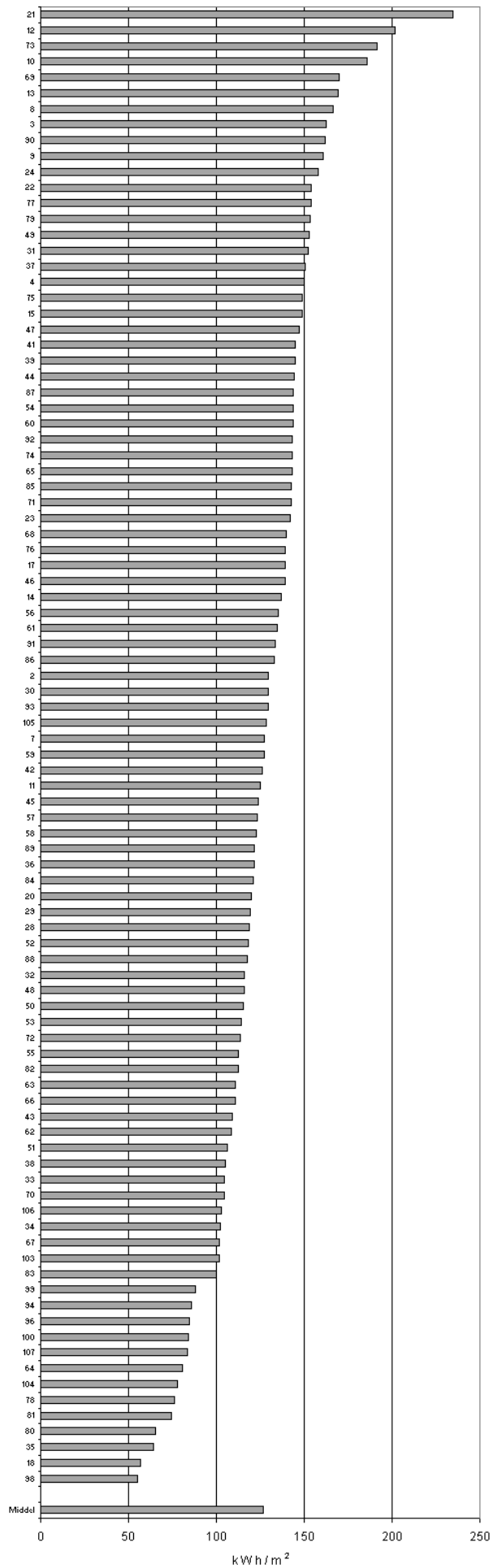
Ventilationsanlæg	1	2	3
Driftstid i timer (af 60 min.) per uge			
Installeret eleffekt W			

Registrering af forbrug til varmtvand i kWh/uge _____

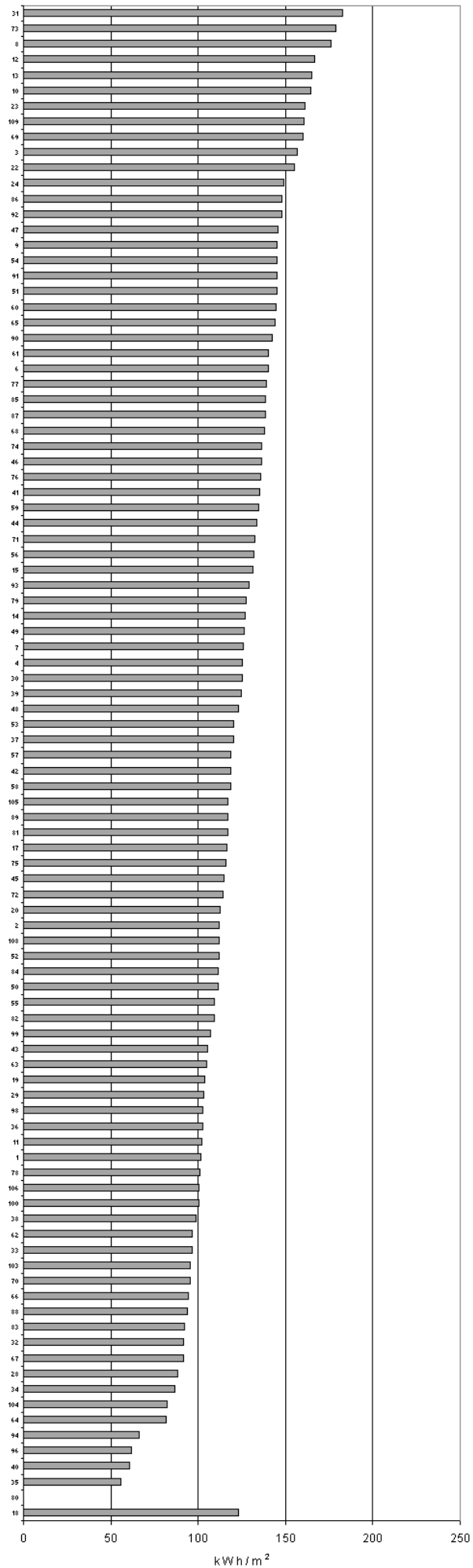
Registrering af antallet af pc'er på skolen _____

Tak for hjælpen.

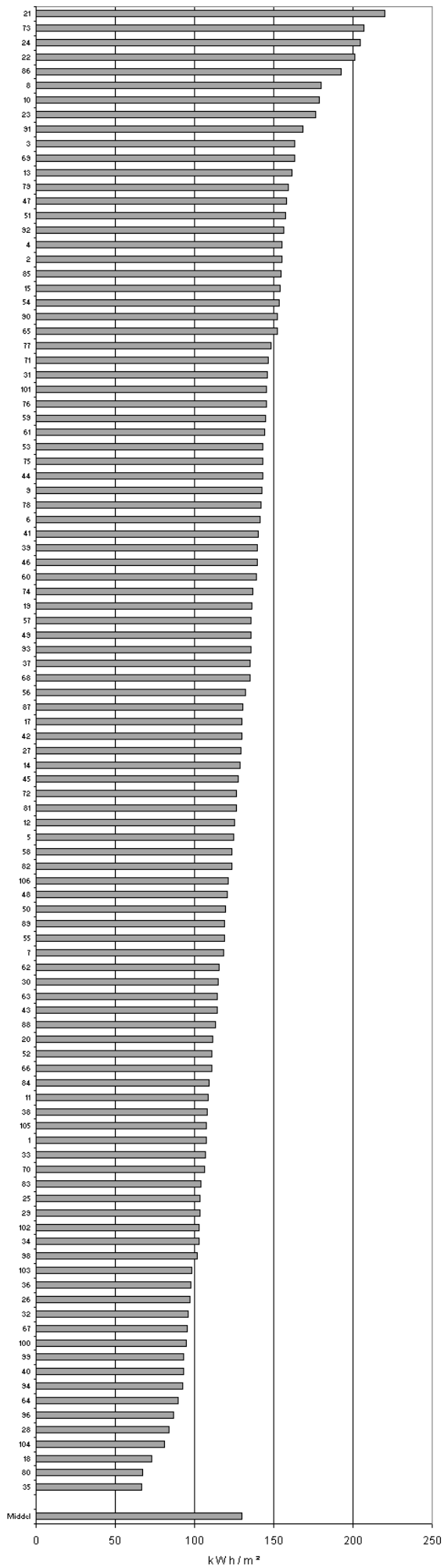
Bilag 3. Varme-, el- og vandforbrug for 1996, 1997 og 1998



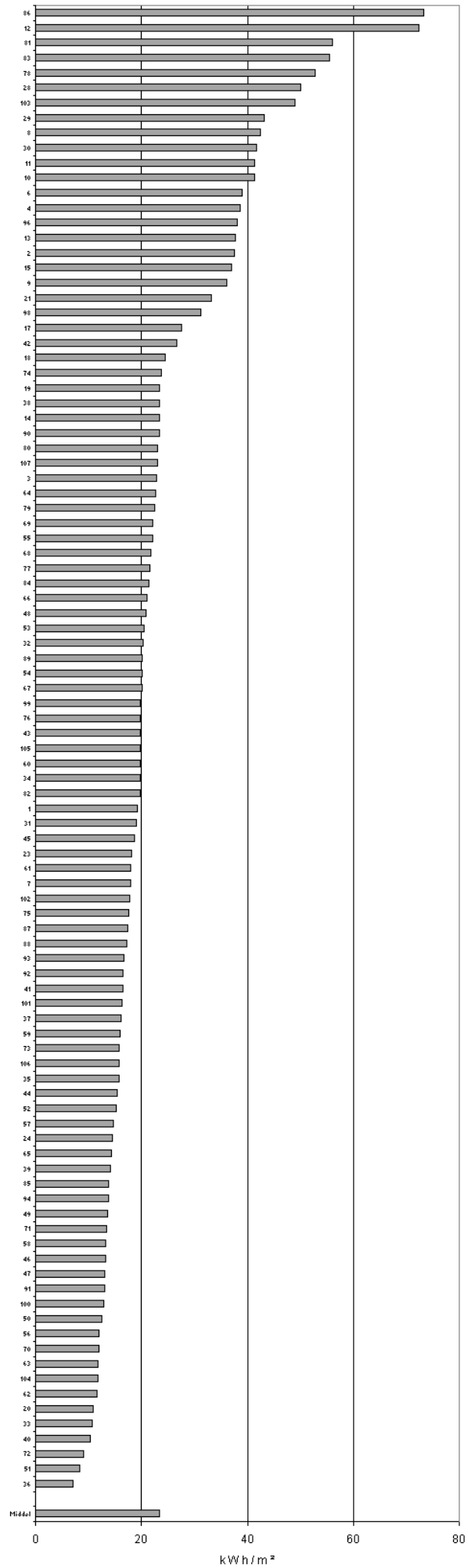
Varmeforbrug i kWh/m² for 1996. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.



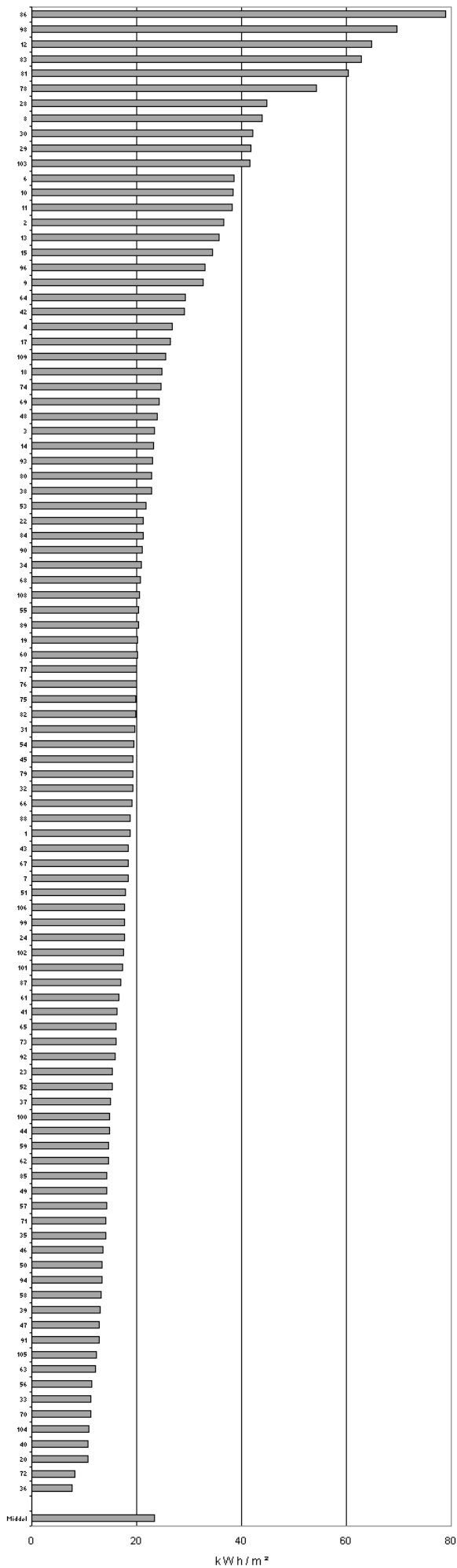
Varmeforbrug i kWh/m² for 1997. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.



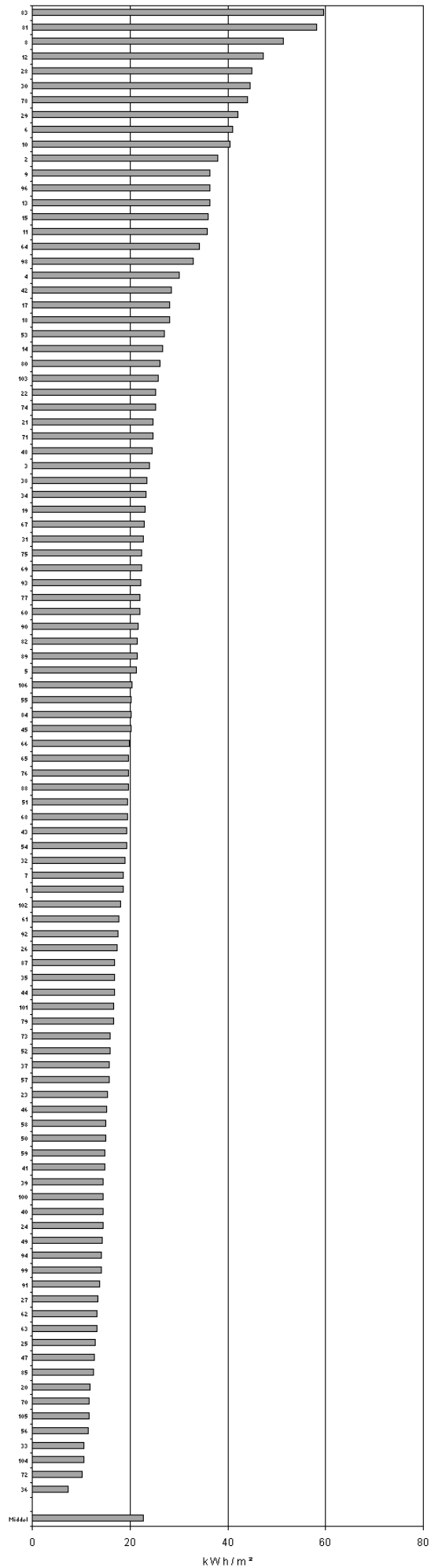
Varmeforbrug i kWh/m² for 1998. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.

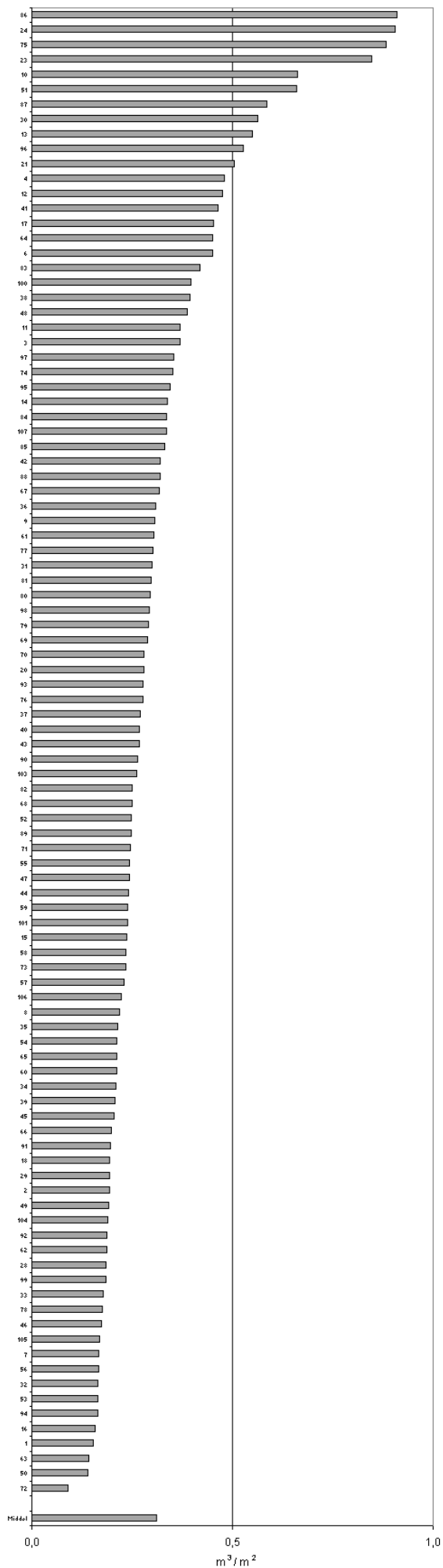


El-forbrug i kWh/m² for 1996. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.

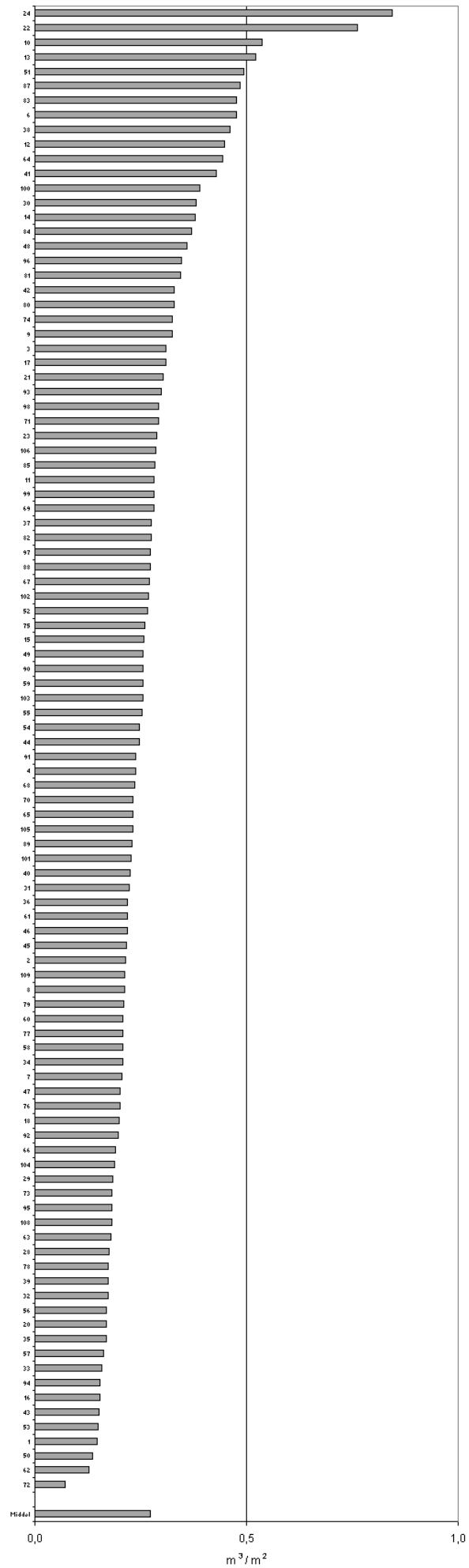


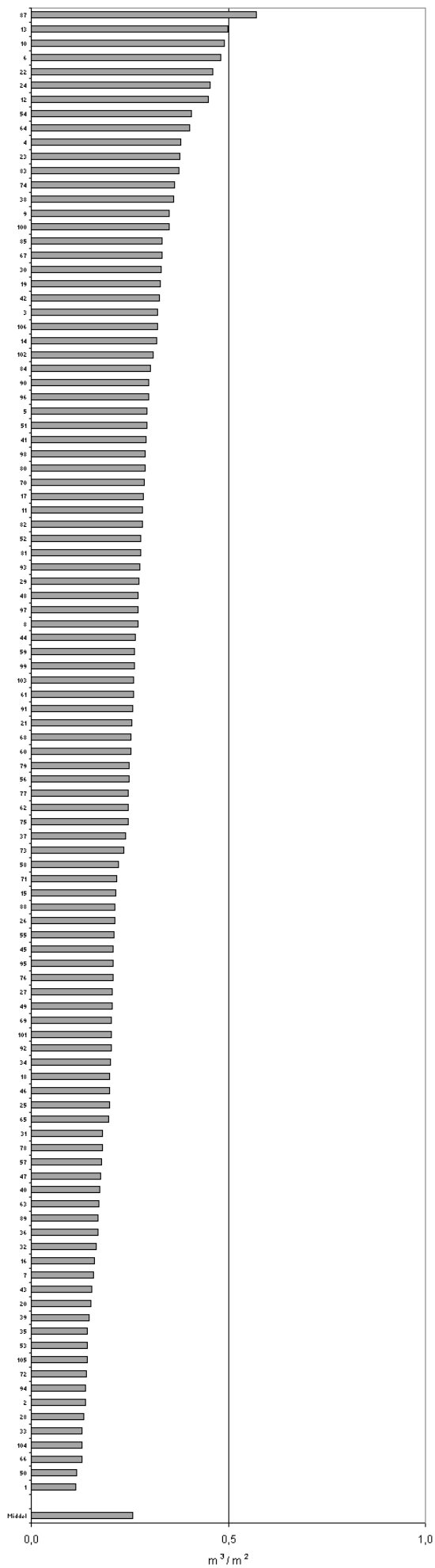
El-forbrug i kWh/m² for 1997. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.





Vandforbrug i m^3/m^2 for 1996. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.





Vandforbrug i m³/m² for 1998. Tallene på y-aksen refererer til skoleoversigt i bilag 1.

Bilag 4. Deltagere i ”Program for energieffektive skoler”

Følgegruppe

Henrik Njor, Birch & Krogboe
Ove Nielsen, By- og Boligministeriet
Peter Blichfeldt, Danmarks Lærerforening
Mogens Hansen, Danmarks Lærerhøjskole
Dan Hoffmeyer, DELTA Akustik & Vibration
Poul Erik Pedersen, DELTA Lys & Optik
Per Vagn-Hansen, Embedslægeinstitutionen i Storstrøms Amt
Bjørn Hafstrøm, Energistyrelsen
Mikael Olrik, Forskningsministeriet
Lone Carstensen, Holmegårdsskolen
Ove Neumann, KHR A/S arkitekter
Vibeke Clausen, Lysteknisk Selskab
Jørn Tredal, Rambøll
Per Olsen, Rådgivningstjenesten for Skolebyggeri
Inge Mette Kirkeby, Statens Byggeforskningsinstitut

Projektdeltagere

Birgit Jørgensen, Ballerup Kommune
Per Jørgensen, Ballerup Kommune
Jens Ole Hansen, Cenergia ApS
Ove Mørck, Cenergia ApS
Svend Odgaard Mikkelsen, Københavns Kommune
Ole Folmann, Skanska Jensen A/S
Søren Aggerholm, Statens Byggeforskningsinstitut
Karl Terpager Andersen, Statens Byggeforskningsinstitut
Kirsten Engelund Thomsen, Statens Byggeforskningsinstitut
Lars Gunnarsen, Statens Byggeforskningsinstitut
Kjeld Johnsen, Statens Byggeforskningsinstitut
Lisbeth Skindbjerg Kristensen, Statens Byggeforskningsinstitut
Erwin Petersen, Statens Byggeforskningsinstitut
Steen Traberg-Borup, Statens Byggeforskningsinstitut

Kommunerne skal over de næste år bygge og ombygge et stort antal skoler på grund af stigende elevtal og nedslidning. Der er derfor behov for at få viden om, hvordan fremtidens skoler kan projekteres og forvaltes, så de både bliver energieffektive og samtidig får et godt indeklima.

Rapporten afslutter første del af forskningsprogrammet "Program for energieffektive skoler". Denne del af programmet har haft til formål at kortlægge energiforbruget i en række skoler og vurdere potentialet for energibesparelser til ventilation og belysning. Rapporten beskriver en række lovende innovative ventilationsløsninger og gennemgår dagslysforholdene i ni eksisterende skoler. Desuden vurderes de potentielle energibesparelser, som kan opnås ved at udnytte dagslyset bedre.

ISBN 87-563-1071-4

ISSN 1600-8049

1. udgave, 2001

