



INDEKLIMA I SKOLER

WP 2.1

IDENTIFIKATION AF KARAKTERISTIKA FOR
SKOLEBYGNINGER MED DÅRLIG OG GOD
LUFTKVALITET UD FRA LET TILGÆNGELIGE
DATA OM SKOLEBYGNINGERNE

FORMIDLINGSRAPPORT

IDENTIFIKATION AF KARAKTERISTIKA FOR SKOLEBYGNINGER
MED DÅRLIG OG GOD LUFTKVALITET UD FRA LET TILGÆNGELIGE
DATA OM SKOLEBYGNINGERNE

FORUNDERSØGELSE TIL INDSATSOMRÅDET "BØRNEKLIMA"

ARBEJDSPAKKE WP 2.1

FORMIDLINGSRAPPORT

INTRODUKTION

Arbejdspakke WP 2.1 er en del af en større forundersøgelse *Indeklima i skoler* foretaget for Realdania af Center for Indeklima og Energi ved Danmarks Tekniske Universitet. Forundersøgelsen er en del af indsatsområdet i Realdanias initiativplan *Børnenes indeklima*.

Indeklima i skoler bearbejder både eksisterende viden samt bidrager med ny viden om de bygningsmæssige faktorer der kan fremme et komfortabelt, sundt og stimulerende indeklima i skoler.

Forundersøgelsen er opdelt i tre overordnede arbejdsplaner, med hvert sit tema, som yderligere er underopdelt i mindre arbejdsplaner. De mindre arbejdsplaner i WP 1 og WP 2 vil udmøntes i en formidlingsrapport som denne. Hver arbejdsplan adresserer forskellige undersøgelser vedrørende indeklimaet i skoler:

- **WP 1: Status for renovering og indeklima i danske og udenlandske skoler.**
 - **WP 1.1: Oversigt over skolerenoveringer med fokus på at skabe bedre indeklima.**
 - **WP 1.2: Kortlægning af kommunernes planer for opførelse af nye og renovering af eksisterende skolebygninger.**
 - **WP 1.3: Status over skolars indeklima og omfanget af skolerenovering i udvalgte nabolande.**
 - **WP 1.4: Gennemgang af nyere videnskabelig litteratur indenfor indeklima i skoler.**
- **WP 2: Helhedsvurdering af indeklima i klasseværelser.**
 - **WP 2.1: Identifikation af karakteristika for skolebygninger med dårlig og god luftkvalitet ud fra let tilgængelige data om skolebygningerne.**
 - **WP 2.2: Variation i indeklima indenfor og mellem bygningstypologier.**
 - **WP 2.3: Karakterisering af luftkvalitet, støj, temperatur, lys og øvrige bygningsmæssige forhold i udvalgte danske skolebygninger.**
 - **WP 2.4: Indeklima i andre lokaler end klasselokaler.**
- **WP 3: Kortlægnings- og interventionsstudier med fokus på adfærd.**
 - **WP 3.1: Kortlægning af elevers og læreres udluftningspraksis.**
 - **WP 3.2: Vurdering af effekt og varighed af metoder til at påvirke elevers og læreres udluftningsadfærd.**



INDHOLD

Indledning.....	1
Bygningstypologier.....	2
Hvordan er indeklimaet i bygningstypologierne?.....	4
Hvilke karakteristika har betydning?.....	5
Hvad kan vi konkludere?.....	7

INDLEDNING

Det er efterhånden velkendt og veldokumenteret at skoleelevers indlæring og præstationer påvirkes af indeklimaet i deres klasseværelser. Et dårligt indeklima giver anledning til bl.a. dårligere resultater i forskellige tests og reduceret koncentrationsevne.

Indeklimaet består af mange forskellige faktorer - temperatur, fugt, træk, lydtrykniveau, belysningsniveau- der alle er medvirkende til oplevelsen af et godt eller dårligt indeklima. Vurderingen af indeklimaet er ofte forbundet med CO₂-koncentrationen, som er en målbar indikator for, hvor godt et lokale er ventileret i forhold til hvor mange personer der er i lokalet. Når ventilationsraten pr. person stiger, falder CO₂-koncentrationen.

Masseeksperimenterne 2009 og 2014 viste, at mekanisk ventilation ikke overraskende bidrager til at sænke CO₂-koncentrationen i klasseværelserne, men endnu er det ret uklart, hvilke andre bygningskarakteristika, der har betydning for klasseværelsernes luftkvalitet og skolernes energiforbrug.

Det ønskes med denne arbejdsmappe at beskrive og undersøge indeklimaet i forskellige skolebygninger samt identificere de bygningsmæssige faktorer, der har størst betydning for skolernes indeklima.

Undersøgelsen tager udgangspunkt i en række simple byggetekniske karakteristika for skolebygningerne, der deltog i Masseeksperimenterne. Endvidere rådes over BBR data for flertallet af de medvirkende skoler. Sammen med målinger og øvrig information om de medvirkende skoler, vil denne arbejdsmappe undersøge om skolerne groft kan grupperes i forhold til klasseværelsernes luftkvalitet eller fællestræk i bygnings- og andre kendte karakteristika så som byggeår, areal, ventilationsforhold, placering etc.

De generelle egenskaber for typer af skolebygninger og deres luftkvalitet kan derved beskrives og et eventuelt mønster i de problemramte skoler og klasseværelser identificeres.

I nærværende formidlingsrapport præsenteres de vigtigste resultater af statistiske analyser af de indsamlede data. For en detaljeret gennemgang af baggrunden for resultaterne henvises til *WP 2.1 Analyse Rapport*.

CO₂-koncentrationen i klasselokaler må maksimalt være 1000 ppm i længere perioder for at indeluften skal opleves som acceptabel.

Typisk ligger CO₂-koncentrationen udendørs på mellem 380 - 400 ppm.

BYGNINGSTYPOLOGIER

Måden hvorpå de danske skolebygninger er bygget har udviklet sig med tiden. Undervisningsprincipper udvikles og nye metoder bliver introduceret, som resulterer i nye krav til de fysiske rammer på skolerne. En overordnet inddeling af danske folkeskoler er ved bygningstypologier: Landsbyskolen, Etageskolen, Aulaskolen, Kamskolen, Åbenplansskolen og Projektarbejdsskolen. Disse kan ses på næste side.

Hver typologi er en bygningstype, der er typisk for en given periode for nybyggede skoler. Tidsintervallerne er vejledende og nogle bygninger kan afvige fra normen. Flere skoler er blevet udvidet siden de blev bygget, og kan derfor bestå af en kombination af flere bygningstypologier. Bemærk at der er et hul i tidsintervallerne, da der ikke er nogen bestemt typologi i 1980-1990. I denne periode blev færre skoler bygget, og der var fokus på modernisering af eksisterende bygninger.

Det er disse bygningstypologier og deres byggetekniske karakteristika der tages udgangspunkt i, når data for denne undersøgelse bearbejdes.

Undersøgelserne beror på data fra Masseeksperimentet 2014, hvor punktvis målinger af CO₂-koncentrationer i klasselokaler fandt sted. Disse data er suppleret med kontinuerlige målinger af CO₂-koncentrationerne i nogle af de deltagende skoler samt information fra online spørgeskemaer vedrørende byggetekniske karakteristika. Dette udgør tilsammen data for 77 skoler (185 klasselokaler), som svarer til 6% af de i alt 1.290 (2015 niveau) folkeskoler i Danmark.



Ingrid Jespersens skole, København. Etageskole.



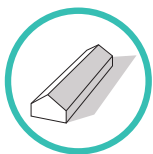
Kirkebjerg skole, Vanløse. Aulaskole.



Ørestad skole, København. Projektarbejdsskole.

LANDSBYSKOLEN (1720-1880)

Landsbyskolen er en fritliggende bygning, typisk placeret i midten af landsbyerne. På grund af sin centrale beliggenhed er mange af skolerne gennem tiderne udvidet og blandet med nyere bygningstypologier.

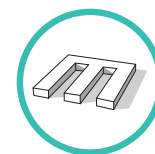


Typiske karakteristika:

- Antal etager: 1
- Størrelse af klasseværelse: -
- Højde af klasseværelse: Op til 3 m
- Typisk ventilationsform: Manuel åbning af vinduer

KAMSKOLEN (1960- 1970)

Kamskolen er en bygning sektioneret i grene, hvor hver gren indeholder en bestemt funktion. Grundarealet er ofte stort, da bygningerne består af én etage. Facaden er typisk med en bagvæg af letbeton og en forvæg af mursten.

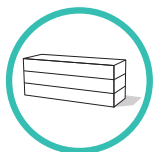


Typiske karakteristika:

- Antal etager: 1
- Størrelse af klasseværelse: 50 - 60 m²
- Højde af klasseværelse: 2,8 - 3,0 m
- Typisk ventilationsform: Mekanisk udsugning

ETAGESKOLEN (1880-1930 og 1945- 1960)

Etageskolen er en stor central skole, som samler eleverne fra større områder. Skolen har en central indgang med trapper. På hver etage er klasseværelserne placeret langs en korridor.

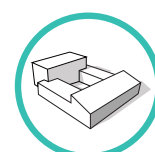


Typiske karakteristika:

- Antal etager: 3 - 4
- Størrelse af klasseværelse: Ca. 50 m²
- Højde af klasseværelse: 3,7 - 4,2 m
- Typisk ventilationsform: Manuel åbning af vinduer el. central, balanceret mekanisk

ÅBENPLANSKOLEN (1970- 1980)

Åbenplanskolen er en videreudvikling af Kamskolen til at støtte en undervisningsstrategi der involverer eleverne i projektorienteret undervisning. Indretningen af rummene gør det muligt at socialisere bedre og lave mere gruppearbejde.

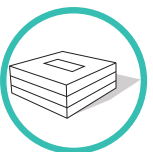


Typiske karakteristika:

- Antal etager: 1 - 2
- Størrelse af klasseværelse: Varierende
- Højde af klasseværelse: 2,5 m
- Typisk ventilationsform: Manuel åbning af vinduer el. hybrid

AULASKOLEN (1930- 1945)

Aulaskolen har en aula eller et atrium centreret i bygningen. Klasseværelserne har store vinduer, og facaden er typisk af beton eller mursten. Hulmure begynder at blive udbredt og luften i hulrummet virker som et isolerende lag.



Typiske karakteristika:

- Antal etager: 2 - 3
- Størrelse af klasseværelse: Ca. 50 m²
- Højde af klasseværelse: 2,9 - 3,3 m
- Typisk ventilationsform: Central, balanceret mekanisk

PROJEKTARBEJDSKOLEN (1990- 2013)

Projektarbejdsskolen sidestiller elever og lærer og begge er taget i betragtning i udformningen af skole og fællesområder. Formen af bygningerne varierer og sjældent er to skoler ens. Nogle særlige karakteristika er højloftede rum med store vinduer og store udearealer.



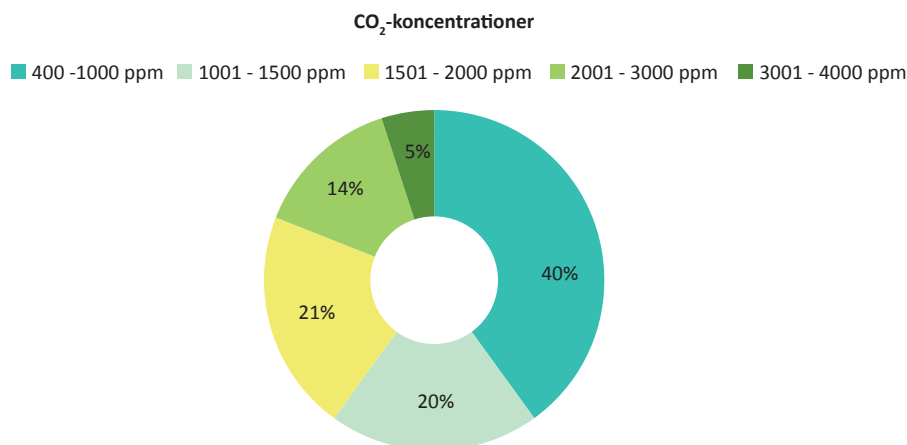
Typiske karakteristika:

- Antal etager: 1 - 3
- Størrelse af klasseværelse: Varierende
- Højde af klasseværelse: 2,8 m
- Typisk ventilationsform: Manuel åbning af vinduer el. hybrid

HVORDAN ER INDEKLIMAET I SKOLERNE?

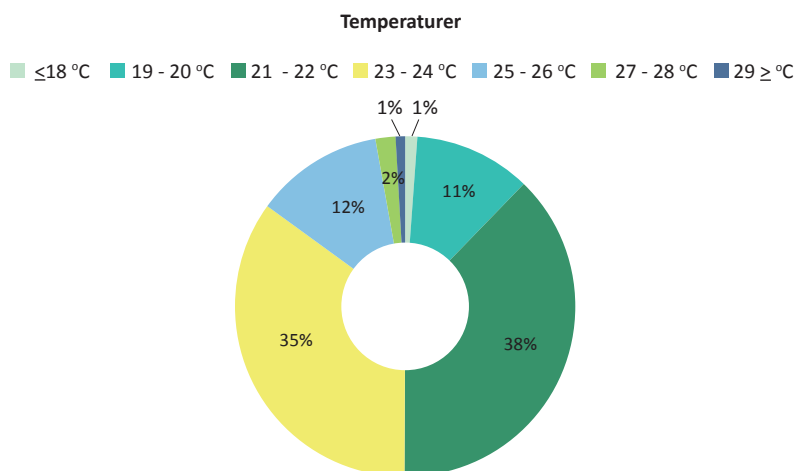
KLASSELOKALERNES INDELUFT ER DÅRLIG

Ved målingerne af CO₂-koncentrationerne i de deltagende skoler, ses det af nedenstående figur, at CO₂-koncentrationerne overstiger det maksimalt tilladelige på 1000 ppm i 60% af klasselokalerne.



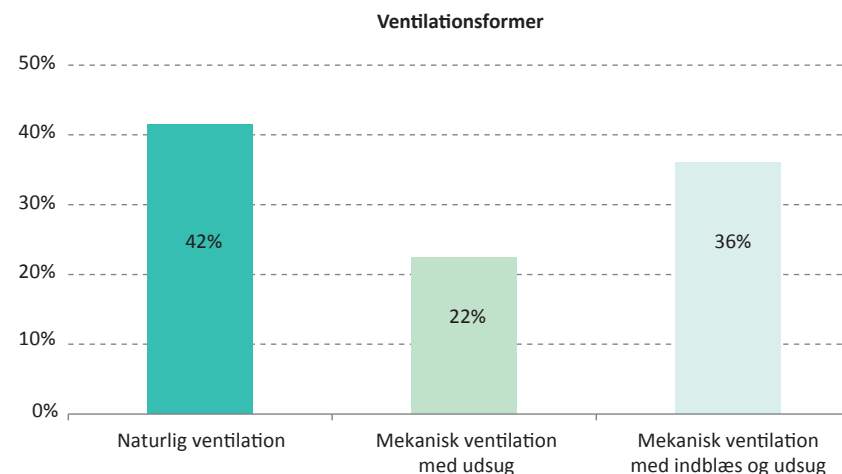
TEMPERATUREN ER I ORDEN

Ved målingerne af lufttemperaturen i de deltagende skoler, ses det af nedenstående figur, at de fleste klasselokaler ligger i de anbefalende temperaturintervaller på 20 - 26 °C, og kun få klasseværelser har temperaturer lavere eller højere end dette.



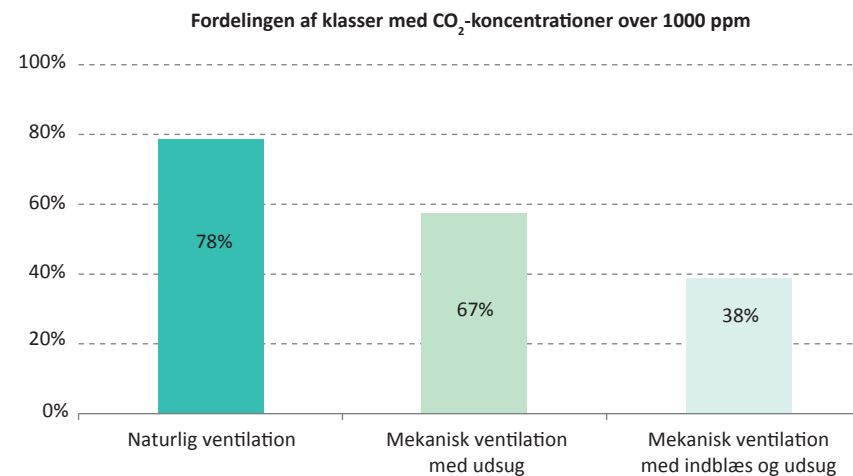
NATURLIG VENTILATION ER HYPPIGST FOREKOMMENDE

Ved de deltagende skoler blev der registreret hvilken form for ventilation der var i klasselokalerne. Der kan ses af nedenstående graf, at naturlig ventilation primært med manuel åbning af vinduer forekom i 42% af klasselokalerne.



VENTILATIONSFORM OG INDEKLIMA HÆNGER SAMMEN

Ved at sammenligne ventilationsform med andelen af klasserne som havde CO₂-koncentrationer over de maksimalt tilladelige på 1000 ppm, ses der en tydelig sammenhæng på nedenstående graf. De naturligt ventilerede klasselokaler havde højere CO₂-koncentrationer end de mekanisk ventilerede.



HVILKE KARAKTERISTIKA HAR BETYDNING?

STATISTISKE ANALYSER

Foruden indledende deskriptive analyser, blev data analyseret ved hjælp af fire overordnede statistiske metoder, for netop at undersøge om der er sammenhæng mellem CO₂-koncentrationen og de forskellige bygningsmæssige forhold. Der er anvendt følgende metoder i kronologisk rækkefølge: En simpel regressions analyse, en korrelations analyse, en multivariabel regressions analyse og en residual analyse. Disse vil ikke gennemgås i denne rapport, men der henvises i stedet til *WP 2.1 Analyse Rapport*.



BYGNINGSMÆSSIGE KARAKTERISTIKA

Der blev analyseret følgende bygningsmæssige karakteristika:

Bygningstypologi, etage, ventilationsform, rumhøjde, rumdybde, rumbredde, højde/dybde forhold, højde/bredde forhold, bredde/højde forhold, dybde/bredde forhold, rumvolumen, antal afelever, volumen pr. elev, omkringliggende bygninger/natur, afstand til nærmeste bygning/beplantning, antal vinduer i klasselokalet (totalt og oplukkelige), orientering/placering af vinduer, udluftningsvaner, lugt, larm, brug af fællesområder, temperatur.

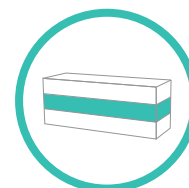
Igennem analyserne kunne der ses, at nogle bygningskarakteristika udviste signifikante relationer med CO₂-koncentrationen, mens andre ikke gjorde. De endeligt udvalgte betydende bygningskarakteristika er baseret på høje signifikansniveauer og kvaliteten af de observerede værdier ud fra udvalgte modelkombinationer.

Følgende bygningsmæssige karakteristika indgik i de endelige resultater:



BYGNINGSTYPOLOGI

Bygningstypologiernes påvirkning af CO₂-koncentrationen var ikke entydig igennem alle analyserne, men udviste signifikante relationer.



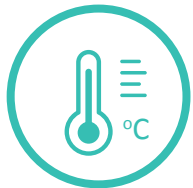
ETAGE

Klasselokalets etageplacering viste ikke entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen igennem alle analyserne, men udviste signifikante relationer.



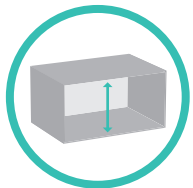
VENTILATIONSFORM

Ventilationsformen viste entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen. Naturlig ventilation viste de højeste koncentrationer. Balanceret mekanisk ventilation viste de laveste CO₂-koncentrationer.



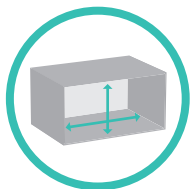
TEMPERATUR

Temperaturen viste entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen. Øget temperatur viser formindskelse af CO₂-koncentrationen.



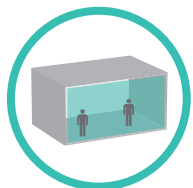
RUMHØJDE

Rumhøjden viste entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen. En øget rumhøjde gav anledning til formindskelse af CO₂-koncentrationerne.



HØJDE/BREDDE OG BREDDE/HØJDE

Højde/bredde forholdet og bredde/højde forholdet af klasselokalerne viste entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen. Jo mere kvadratisk forholdet var (tæt på 1), desto mere blev CO₂-koncentrationen formindsket ved højde/bredde forholdet og øget ved bredde/højde forholdet.



VOLUMEN PR. ELEV

Volumen pr. elev udviste entydige påvirkninger af CO₂-koncentrationen. Øget volumen pr. elev viste formindskelse i CO₂-koncentrationen.

HVAD BETYDER DET?

Bygningstypologien udviste signifikante relationer gennem alle analyserne, men ikke en entydig påvirkning af CO₂-koncentrationen. Bygningstypologi er netop baseret på opførelsesår, og tager således ikke højde for at bygningen kan være renoveret, have udskiftet installationer eller lignende, som netop gør at bygningen ikke forbliver i sin originale form. Yderligere kan en skole bestå af forskellige bygningstypologier, idet mange skoler ofte er blevet udbygget siden deres oprindelse, hvilket gør at én bygningstypologi ofte heller ikke kan repræsentere en hel skole. Det kan dermed ikke konkluderes entydigt hvilken indflydelse bygningstypologi skulle have på indeklimaet i klasseværelset.

Temperaturerne udviste klare relationer og entydige påvirkninger: Højere temperatur hang sammen med lavere CO₂-koncentration. Denne relation hænger godt sammen med, at jo varmere der er i klasselokalet jo større sandsynlighed er der for at eleverne vil åbne vinduerne, og dermed formindske CO₂-koncentrationen. Denne relation er dermed influeret af brugeradfærd.

Rumforholdene viste både signifikante relationer og entydige påvirkninger. Det kunne ses at en øget rumhøjde gav formindskelse i CO₂-koncentrationen. Højde/bredde forholdet viste, at desto mere kvadratisk forholdet var (tæt på 1), desto mere blev CO₂-koncentrationen formindsket. Bredde/højde forholdet viste at desto mere kvadratisk forholdet var (tæt på 1), desto mere blev CO₂-koncentrationen øget.

Yderligere sås at større volumen pr. elev gav anledning til lavere CO₂-koncentrationer.

HVAD KAN VI KONKLUDERE?

Denne arbejdsmappe har haft til formål at undersøge og beskrive indeklimaet i forskellige skolebygninger, samt at skabe et overblik over de bygningsmæssige faktorer, der har størst betydning for skolernes indeklima. Undersøgelserne har primært beroet på at undersøge og estimere CO₂-koncentrationerne i klasselokaler, ved både at anvende simple deskriptive data og statistiske analyser på indsamlede data.

KLASSELOKALERNES INDELUFT ER GENERELT DÅRLIG

Undersøgelserne af skolerne viste, at CO₂-koncentrationerne i klasselokalerne overskred de maksimalt tilladte 1000 ppm i mere end halvdelen af klasselokalerne. Der kunne ses at naturlig ventilation forekom i 42% af klasselokalerne, og at forekomsten af høje CO₂-koncentrationer var hyppigere i de naturligt ventilerede lokaler end de mekanisk ventilerede klasselokaler. Det kunne ses at lufttemperaturerne i de fleste tilfælde lå inden for de anbefalede intervaller.

VENTILATIONEN DOMINERER INDELUFTEN

Ud fra disse undersøgelser kunne det ses at den mest dominerende faktor var ventilationsformen, hvor det fremgik tydeligt at naturligt ventilerede lokaler gav anledning til højere CO₂-koncentrationer end lokaler ventileret med balanceret mekanisk ventilation. Det kan konkluderes at de andre bygningskarakteristika generelt ikke udviser klare relationer med CO₂-koncentrationen i klasselokalerne, og det dermed er svært at skulle forudsige indeklimaegenskaber for klasselokalerne baseret på disse.

BRUGERADFÆRD AFGØR MEGET

De målte CO₂-koncentrationer blev sammenlignet med beregnede CO₂-koncentrationer baseret på bygningskarakteristika. De beregnede CO₂-koncentrationer tog ikke højde for alle påvirkninger, idet der var afvigelser på de målte og beregnede CO₂-koncentrationer med over 500 ppm i nogle skoler. Igen gennem analyserne kunne der ses, at de karakteristika som er afhængig af brugeradfærd og som er mere subjektive, (så som lugt, udluftningsvaner mv.) udviste store udsving i relationerne og gav en stor usikkerhed i resultaterne. Dette viser, at brugeradfærden spiller en stor rolle for CO₂-koncentrationen, og går således ind og tilsidesætter bygningskarakteristikaenes betydning for indeklimaet.

BYGNINGSTYPOLOGI KAN VÆRE EN INDIKATOR FOR INDELUFTEN

Denne arbejdsmappe kan overordnet set konkludere, at bygningstypologi kan være en indikator på, hvordan indeluftkvaliteten i et klasselokale kan være, idet der blev set nogle sammenhænge mellem bygningstypologi og ventilationsform i de indledende undersøgelser (se *WP 2.1 Analyse Rapport* for disse). Der forekom oftest naturlig ventilation i klasselokaler i ældre bygningstypologier, og oftest mekanisk ventilation i nyere bygningstypologier. Dette er dog ikke et endegyldigt svar, idet de ældre bygningstypologier sagtens kan være renoveret, og dermed have et nyere ventilationsanlæg end den oprindelige bygningstypologi foreskriver. Undersøgelsen viste at bygningskarakteristika reelt ikke har så meget at sige i forhold til indeklimaet i klasselokalerne, og at der umiddelbart ikke er nogen klar sammenhæng, idet netop ventilationsformen og brugeradfærden bliver de afgørende faktorer for hvordan klasselokalernes luftkvalitet er.



INDEKLIMA
I SKOLER

