

Branchevejledning for indeklima i skoler

Peter Noyé, NIRAS

31. maj 2022

#3
Good health
and well-being

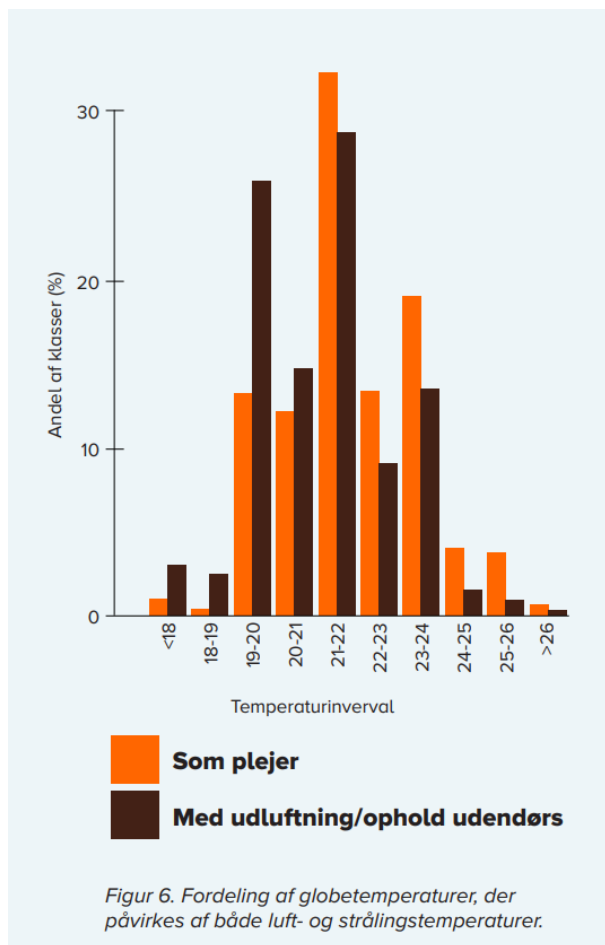
#4
Quality
education



Hvorfor er der brug for fokus på
indeklima i skoler?

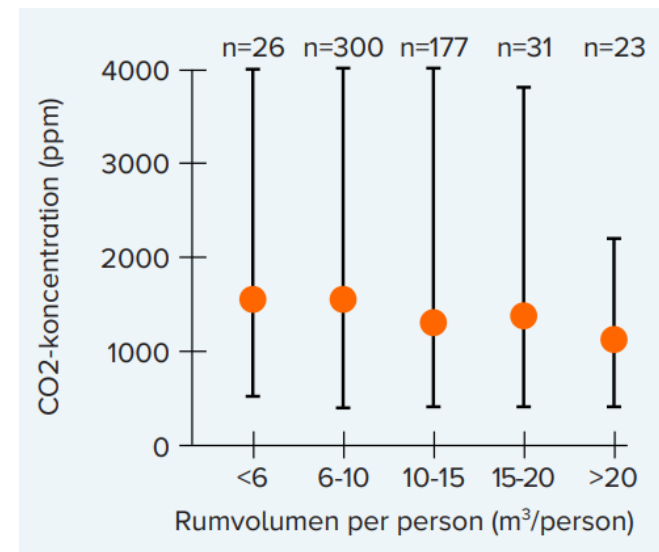
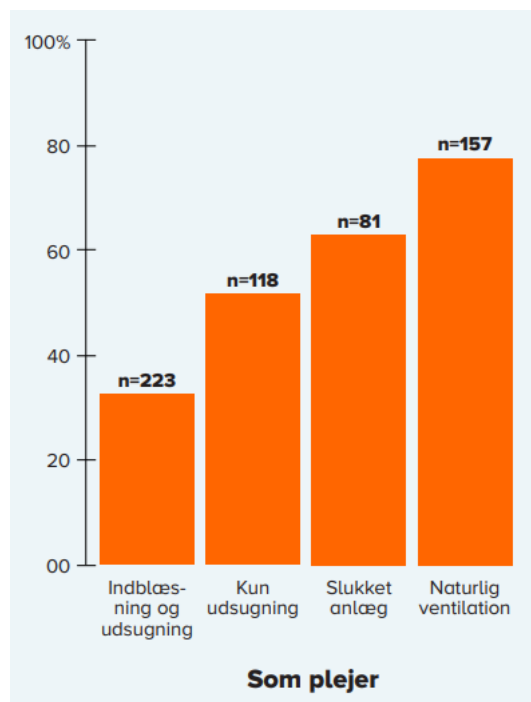
Masseeksperimentet

Målt i november og december

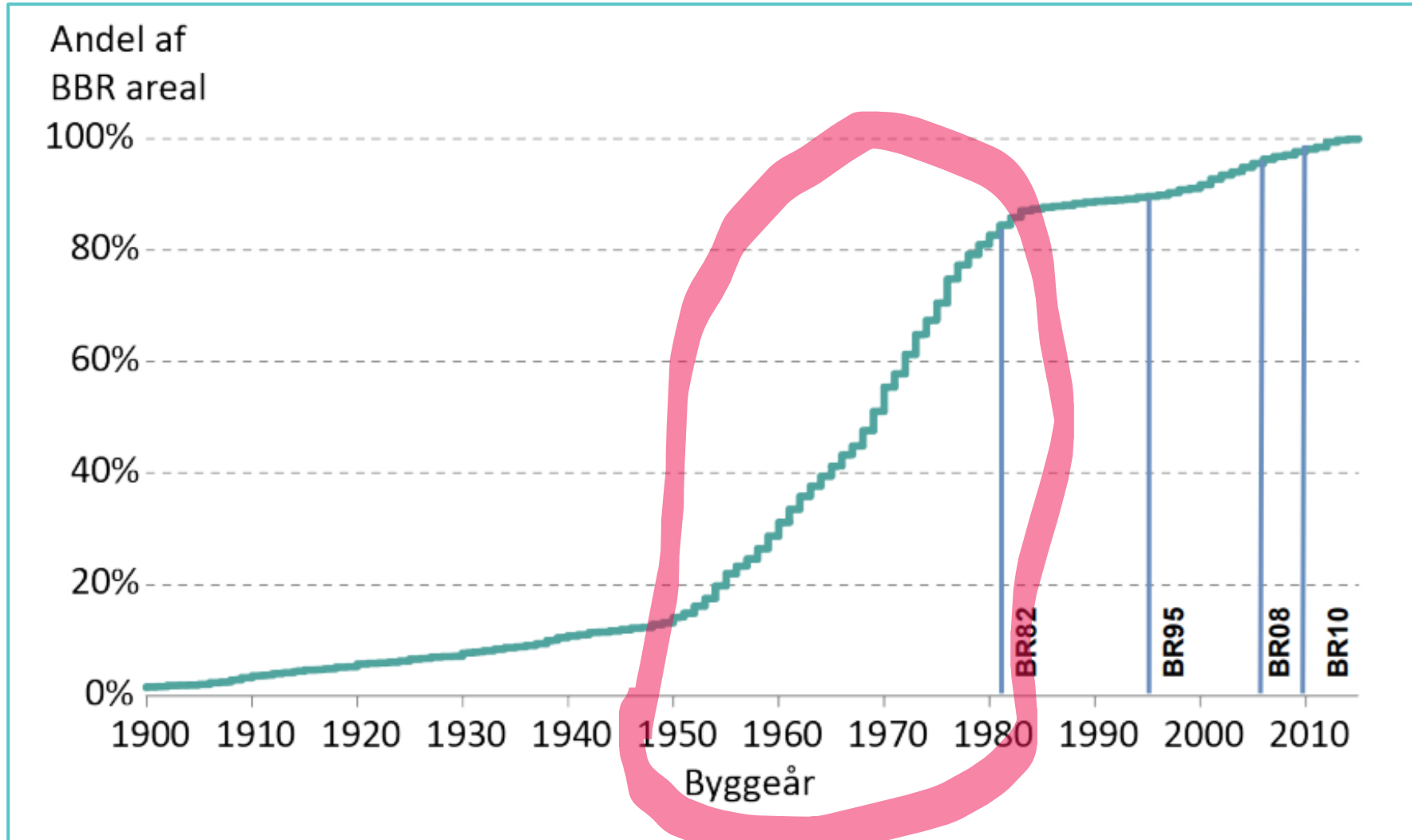


Ventilationsform	2021	2014	2009
Indblæsning og udsugning	38%	36%	30%
Udsugning	21%	22%	18%
Slukket	14%		
Naturlig	27%	42%	52%

Andel med mere CO₂ i rummet 1000 ppm



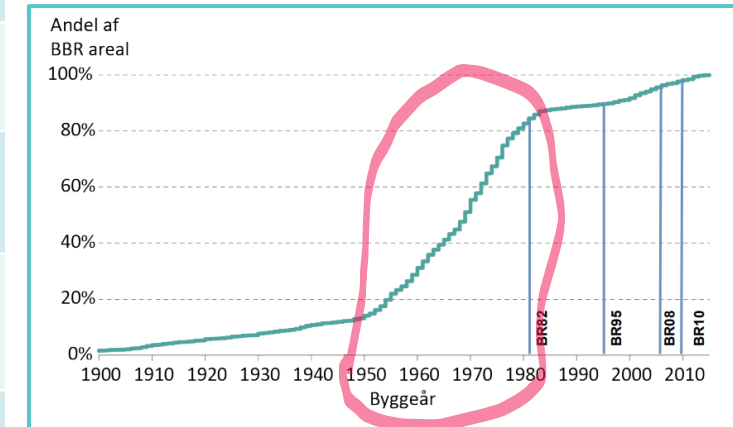
Mange af vores skoler er opført før indeklimaafokus



Bygningsreglementets krav og udviklingen over tid

1980'erne	1990'erne	2020'erne
Ingen krav til ventilation i skoler	5,0 L/s pr person	CO ₂ -koncentration på 1000 ppm → 9,4 L/s pr person
Ingen krav til temperatur	Krav til temperatur indgår i Bygningsreglementet	Forskning viser at høje temperaturer påvirker læring negativt
Begyndende fokus på dagslys	10% glas ift. gulvareal	10% glas ift. gulvareal <u>korrigeret</u> eller 300 lux sda → Mere glas
Efterklangstid < 0,9 sek Særundervisning efterklangstid < 0,6 sek	Efterklangstid < 0,9 sek Særundervisning efterklangstid < 0,6 sek	Efterklangstid < 0,6 sek → mere akustik dæmpning og dermed mindre termisk masse
Fokus på varmetab	Fokus på energiforbrug	Fokus på energiforbrug og ressourceforbrug
Køling kræver dispensation	Køling kan anvendes når andre tiltag ikke er tilstrækkelige	Køling indgår på lige fod med øvrige tiltag. Effektivitet sikres vha. krav til ressource- og energiforbrug
Beton og mursten udgør en stor del af bygningerne → Stor termisk masse		Økonomi og fokus på bæredygtighed medfører lettere materialer → Mindre termisk masse
Under 19 elever pr klasse	Under 19 elever pr klasse	Knap 22 elever pr klasse Andelen af store klasser med > 25 elever er steget fra 17% i 2010 til 28% i 2019

Byggeår for skolerne i Danmark



Studier af indeklima og præstation

Temperatur og luftkvalitet

Building and Environment 173 (2020) 106749

Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/buildenv>



The relationships between classroom air quality and children's performance in school

Pawel Wargocki^{a,*}, Jose Ali Porras-Salazar^b, Sergio Contreras-Espinoza^c, William Bahnfleth^d

^a International Centre for Indoor Environment and Energy, DTU Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark
^b School of Architecture, University of Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
^c Department of Statistics, University of Bio-Bio, Bio-Bio, Chile
^d Department of Architectural Engineering, Pennsylvania State University, PA, United States

ARTICLE INFO

Keywords:
Children
Learning
Cognitive performance
Elementary schools
Carbon dioxide

ABSTRACT

The data from published studies were used to derive systematic relationships between learning outcomes and air quality in classrooms. Psychological tests measuring cognitive abilities and skills, school tasks including mathematical and language-based tasks, rating schemes, and tests used to assess progress in learning including end-of-year grades and exam scores were used to quantify learning outcomes. Short-term sick leave was also included because it may influence progress in learning. Classroom indoor air quality was characterized by the concentration of carbon dioxide (CO₂). For psychological tests and school tasks, fractional changes in performance were regressed against the average concentrations of CO₂ at which they occurred; all data reported in studies meeting the inclusion criteria were used to derive the relationship, regardless of whether the change in performance was positive or negative. The analysis predicts that reducing CO₂ concentrations will improve the performance of psychological tests and school tasks with respect to errors made.

Building and Environment 157 (2019) 197-204

Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/buildenv

Temperature and children's

Sergio Contreras-Espinoza^d

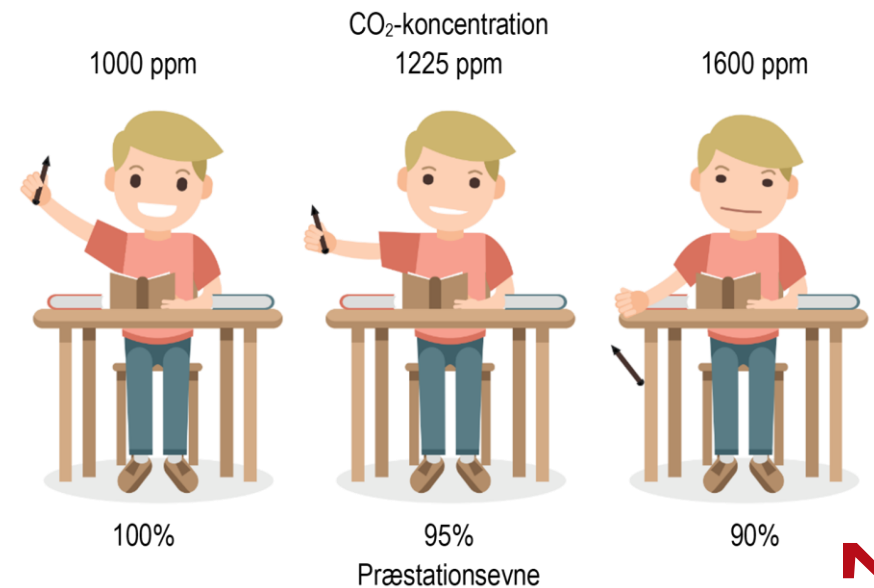
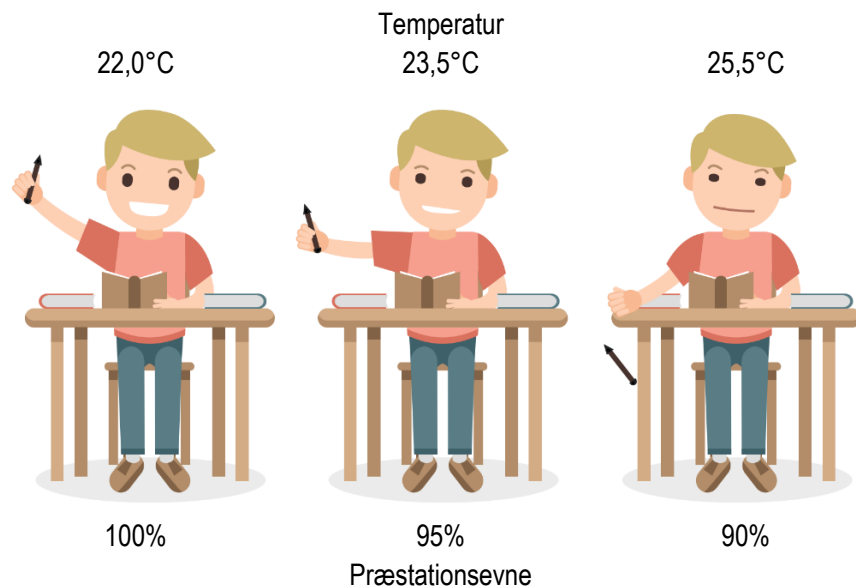
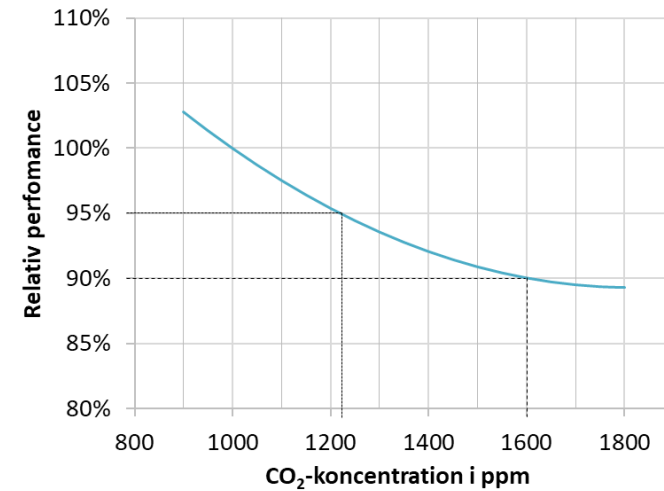
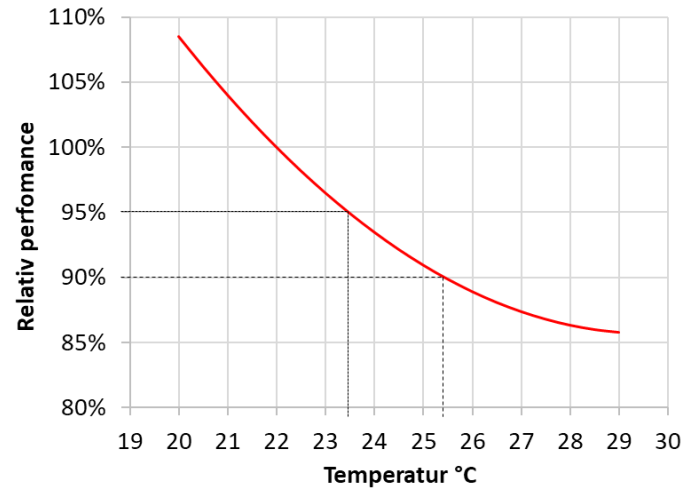
Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark

meta-analysis of published evidence on the effects of temperature in school classrooms and children's performance in school. Psychological tests measuring school tasks including mathematical and language-based tasks, rating schemes, and end-of-year grades and the examination results were converted to fractional changes in performance. Due to the lack of complete measurements, thermal conditions and school tasks was regressed against the relationship, the fractional change in performance was regressed against the average temperature at which the data were used regardless of whether the change in learning outcome was positive or negative. For other learning outcomes, no relationship was created because the increase on average temperature with respect to errors made.



Studier af indeklima og præstation

Temperatur og luftkvalitet



Godt indeklima er god samfundsøkonomi

Mere end 500.000 danske børn og unge, og omkring 50.000 ansatte tilbringer en stor del af deres tid i skolen

Indeklimatet aflæses direkte i præstation og indlæring – og sygefravær



Samfundsøkonomisk gevinst over 30 år i nutidsværdi	
Skole	
650 elever, 30 lærer	
Øget indlæring	2,9 - 10,1 mio. kr.
Mindre sygefravær	11 - 22 mio. kr.
Elever	1,16 mio. kr.
Lærere	
I alt	15 - 33 mio. kr.



Branchevejledning for indeklima i skoler

Branchevejledning for indeklima i skoler

Støttet af Realdania

NIRAS

HOE
ARTELIA GROUP



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**



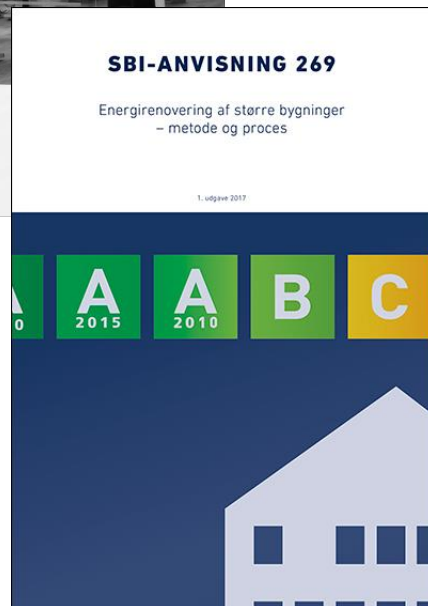
NIRAS

Branchevejledning for indeklima i skoler

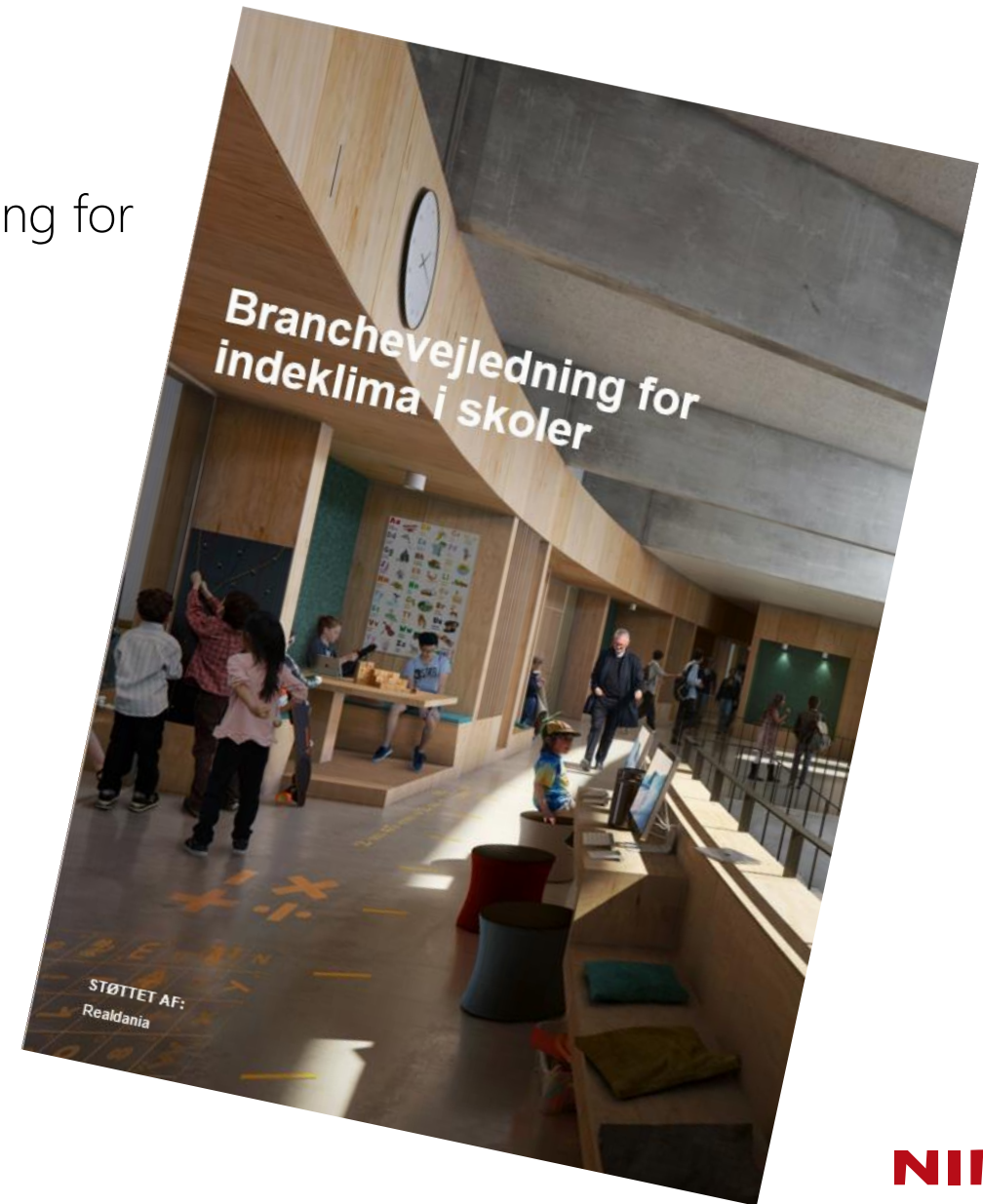
Specifik viden om skoler og deres udfordringer



Supplement til "Branchevejledning for indeklimaberegninger"



Helheds- og projektorienteret som SBI-anvisning 269



Branchevejledning for indeklima i skoler

Fire dele

- Hvorfor er indeklima vigtigt i skoler?
 - Baggrundsviden, lovgivning og samspil
- Kravspecifikationer for indeklima i skoler
 - Realistiske krav til indeklimaet, afvejet i forhold til hinanden
 - Forudsætninger for brug af lokalerne til dimensionering af anlæg
- Metoder til at opnå et godt indeklima i skoler
 - Indeholder et grundigt studie af løsningsmuligheder for klasselokaler
 - Opstiller fordele og opmærksomhedspunkter for en række løsningsmuligheder
- Metodebeskrivelse fra start til slut
 - Herunder indsamling af relevant viden





Krav og forudsætninger

Kravspecifikationer

- Krav til termisk, atmosfærisk, akustisk og visuelt indeklima
- Krav er opstillet for "Klasselokaler" og for "Arealer der benyttes til gruppearbejde"
- Krav er opstillet i to klasser: "Standard" og "Standard+"
- Definition af brugsmønstre, som kravene skal overholdes for



Termisk indeklima



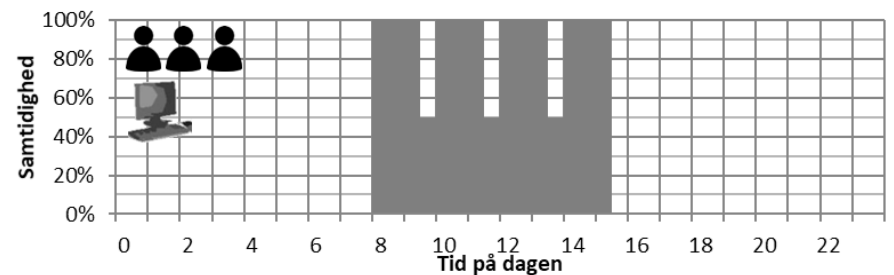
Atmosfærisk indeklima



Akustisk indeklima



Visuelt indeklima



Kravspecifikationer – Inddeling i to klasser

- **Standard +**
- **Standard**

-
- BR18 krav
 - Minimumskrav

Termisk indeklima

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler



Termisk indeklima

Indeklimaklasse	Standard+	Standard	BR18-krav	Minimum	Noter
Termisk indeklima					
Operativ temperatur i °C			≤ 26 ¹		
- sommer (maj – september)	22,0 – 25,5	22,0 – 26,0		22,0 – 26,5*	
- overgang (april og oktober)	21,0 – 25,5	21,0 – 26,0		21,0 – 26,5	
- vinter (november – marts)	21,0 – 24,5	21,0 – 24,5			
Relativ luftfugtighed i %	≥ 20	≥ 20			
Trækrisiko/draught rate i % ²	≤ 15	≤ 20	≤ 20	≤ 25*	

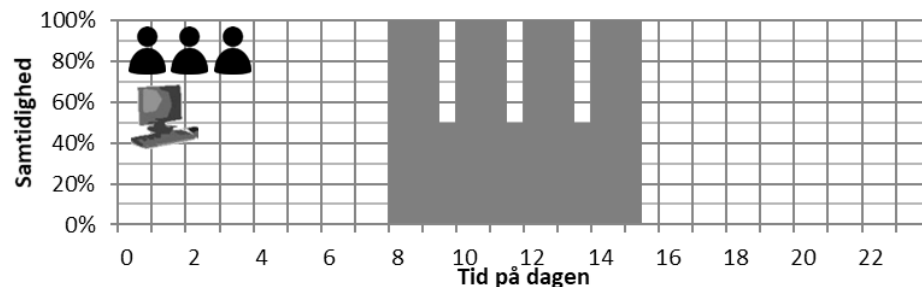
¹Toleranceoverskridelser tælles for hele året

²Trækrisiko vurderes for udvalgte situationer, se side 38

Forudsætninger

Klasselokale

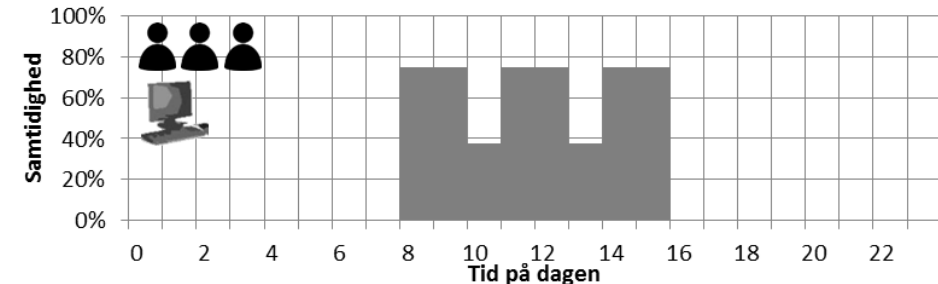
- 28 elever og 2 lærere $\approx 2 \text{ m}^2$ pr person
- Udstyr pr person:
Tablet eller bærbar pc = 10 – 30 W
- Dimensionerende samtidighed



- Varmelast fra personer og udstyr: 60 W pr m^2
- Krav til dagslys og udsyn

Mødelokale

- 2 – 3 m^2 pr person
- Udstyr pr person:
Bærbar til min. hver anden = ca. 30 W
- Dimensionerende samtidighed



- Varmelast fra personer og udstyr: 35 W pr m^2

Fortætning af skolerne?

- Folkeskoleloven tillader 28 elever i klasserne
- De fleste kommuner arbejder med fortætning
- Hvis der er ønske om fortætning og udnyttelse af maksimalt antal elever i klasserne i årene fremover, skal lokalerne kunne klare
- Dyrt at ændre anlæg mm senere
- Langt dyrere at fortsætte med 4 klasser i forhold til både energi, husleje og lærerkræfter

4 klasser



3 klasser



Atmosfærisk indeklima



Atmosfærisk indeklima

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler

Indeklimaklasse	Standard+	Standard	BR18-krav	Minimum	Noter
Atmosfærisk indeklima					
CO ₂ -koncentration i ppm ³	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1200*	³ Ved udeniveau på 400 ppm
Luftmængde i L/s pr person	≥ 9,4	≥ 9,4		≥ 7,1*	

Sammenhæng mellem CO₂-koncentration og ventilationsluftmængder

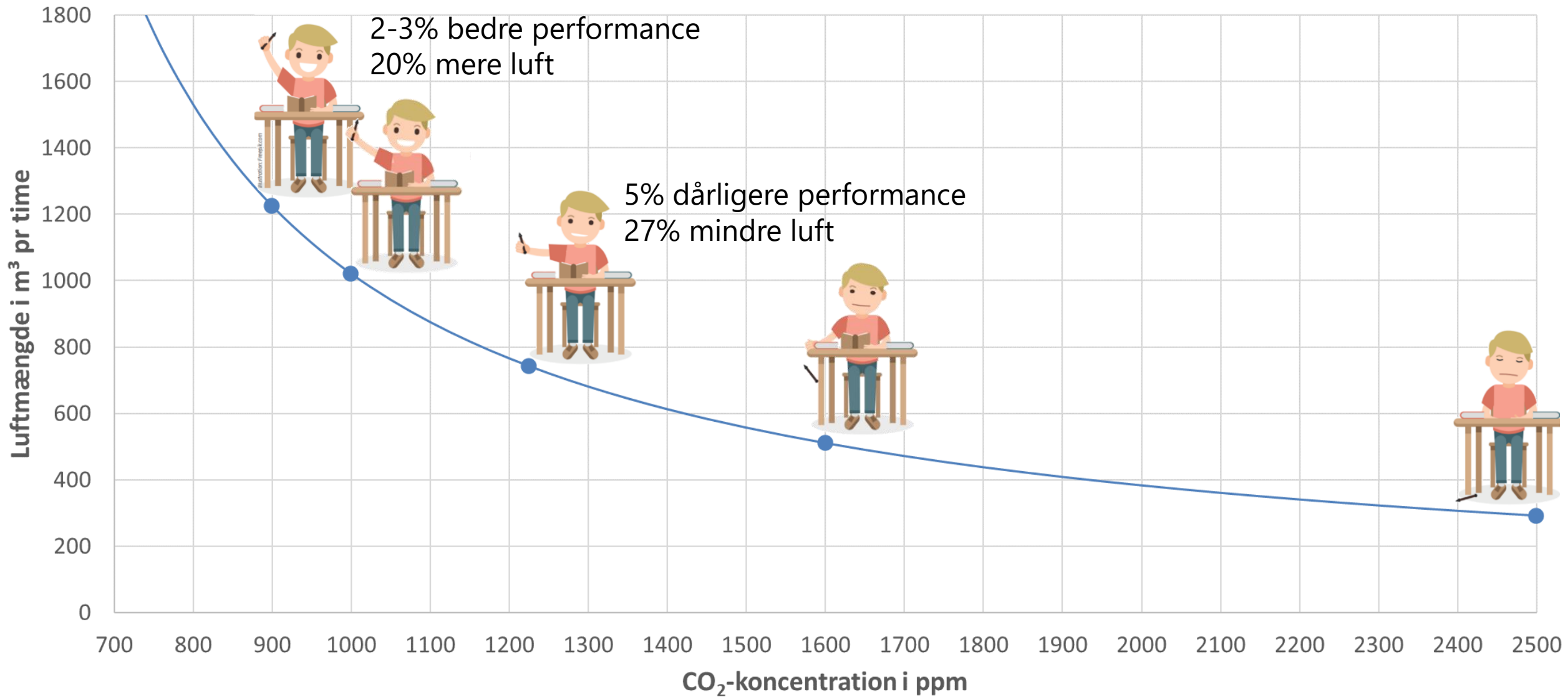
CO ₂ -koncentration	L/s per person	ved 28 elever og 2 lærere		ved 10 personer	
		m ³ /h		m ³ /h	
900 ppm	11,3	1224		408	
1000 ppm	9,4	1020		340	
1100 ppm	8,1	874		291	
1200 ppm	7,1	765		255	

Eksempel - Overskridelser

I et klasselokale skal det sikres, at CO₂-koncentrationen holdes under det fastsatte niveau i løbet af hele skoledagen med 28 elever og 2 lærere, som er de dimensionerende forhold for lokalet.

Overskridelser af de fastsatte niveauer er acceptable, hvis to klasser for eksempel samles i ét lokale for at se en film eller under et forældremøde om aftenen.

Atmosfærisk indeklima



Akustisk indeklima



Akustisk indeklima

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler					
Indeklimaklasse	Standard+	Standard	<i>BR18-krav</i>	<i>Minimum</i>	Noter
Akustisk indeklima					
Efterklangstid i sekunder ⁴	$\leq 0,4$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$		
Støj fra tekniske installationer, L_{Aeq} , i dB	≤ 27	≤ 30	≤ 30		
Støj fra vej- og jernbanetraфик, L_{den} , i dB	≤ 30	≤ 33	≤ 33		
Trinlyd, $L'_{n,w}$, i dB	≤ 58	≤ 58	≤ 58	$\leq 63^*$	
Luftlydisolation mellem undervisningslokaler (vandret/lodret), R'_w , i dB	$\geq 52 / \geq 51$	$\geq 48 / \geq 51$	$\geq 48 / \geq 51$	$\geq 45^* / \geq 51$	
Luftlydisolation mellem undervisningslokaler og fællesarealer m. dørforbindelse, R'_w , i dB	≥ 40	≥ 36	≥ 36		

⁴ I møbleret rum. Ved rumhøjder over 3,2 m konsulteres akustiker. Gælder for hvert af 1/1-oktavbåndene 125, 250, 500, 1000, 2000 og 4000 Hz. Ved 125 Hz kan den angivne maxsværdi tillægges 20%.

Visuelt indeklima – dagslys og udsyn



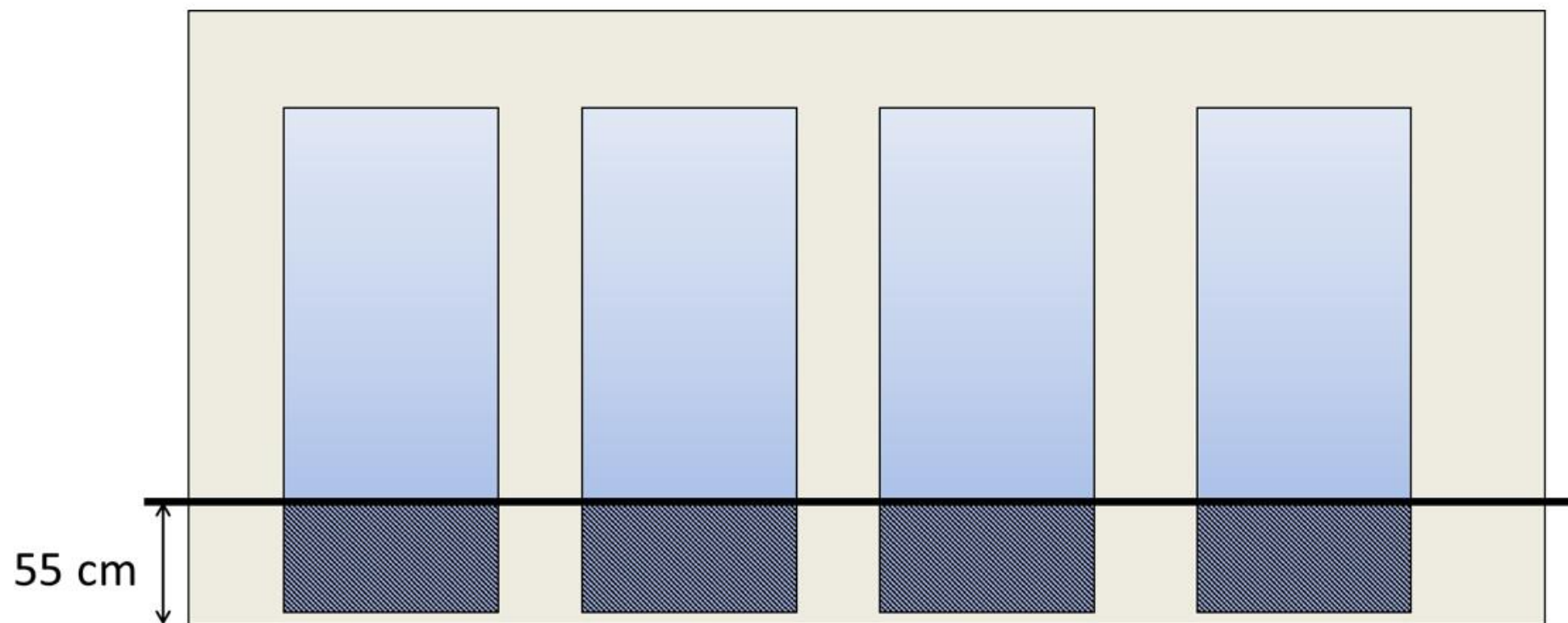
Visuelt indeklima

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler					
Indeklimaklasse	Standard+	Standard	<i>BR18-krav</i>	<i>Minimum</i>	Noter
Visuelt indeklima					
<i>Dagslys</i>					
Korrigeret glas/gulv i % ⁵	≥ 12	≥ 10	≥ 10	≥ 8*	⁵ Glas under 55 cm over gulv tælles ikke med.
eller belysningsstyrke i lux ⁶	≥ 300		≥ 300		
Farvegengivelse for glas, Ra-værdi	≥ 90	≥ 85			
<i>Udsyn</i>					
Solafskærmningstid i forhold til brugstid i % ⁷	≤ 15	≤ 20	<i>Tilfredsstillende</i>	≤ 25	⁶ Ved mindst halvdelen af det relevante gulvareal i mindst halvdelen af dagslystimerne jf BR18
Udsynskvalitet	Høj	Middel			

⁷ For den del af brugstiden, der ligger mellem kl. 7 og kl. 18. For afskærmninger med delvist udsyn kan benyttes vægtningsfaktorer angivet i Appendiks B. Udsynsklasser

Visuelt indeklima - dagslys



Figur 10 For at sikre et godt dagslys på bordene i klasselokaler, indgår glas under 55 cm ikke i beregningerne i forbindelse med korrigeret glasareal i forhold til gulvareal.

Visuelt indeklima - belysning



Visuelt indeklima

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler					
Indeklimaklasse	Standard+	Standard	BR18-krav	Minimum	Noter
<i>Elektrisk belysning</i>					Appendiks B - Udsynsklasser.
Belysningsstyrke i lux	≥ 500	≥ 300 ^{8,9}	≥ 300 ^{7,8}		⁸ Cylindrisk lysstyrke min 150
Farvegengivelse for belysning, Ra-værdi	> 90	≥ 90	≥ 80	≥ 80	⁹ Bør kunne justeres op til 500, hvis lokalet benyttes til aften- eller voksenundervisning
Blænding fra elektrisk belysning	≤ 19	≤ 19	≤ 19		
Flicker/Flimmer fra elektriske lyskilder i PstLM / SVM ¹⁰	≤ 1,0 / ≤ 1,0	≤ 1,0 / ≤ 1,0	≤ 1,0 / ≤ 1,0		¹⁰ For alle lysniveauer ned til 10%
Belysningsstyrkens regelmæssighed	0,6 for hele rummet	0,6 for hele rummet	0,6 for hele rummet		¹¹ Variation i farvetemperatur fra 2700 K til 6500 K
Automatisk styring	Dagslys	Dagslys	Dagslys		¹² Lysscenerier er beskrevet i afsnittet om visuelt indeklima. Styring placeres lettilgængeligt i lokalet
Manuel overstyring af belysning	Lysstyrke og farvetemperatur ¹¹ + min. tre lysscenerier ¹²	Lysstyrke (dæmpning)		On/off	



Løsninger

Grundigt studie af løsningsmuligheder

Klasselokaler ligner hinanden i hele landet

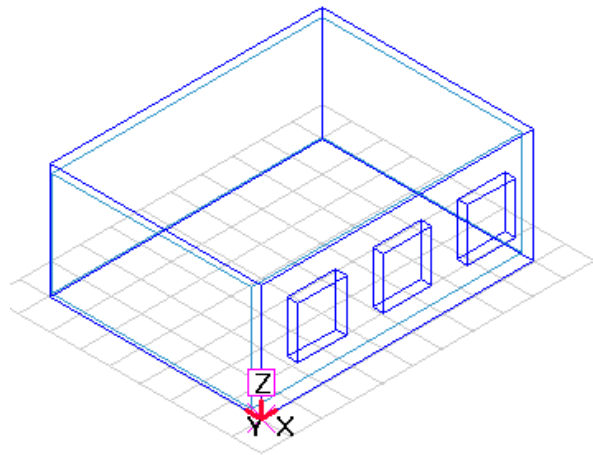
Fremgangsmåde:

- 13 parametre og tilhørende variationer
- Ca. 44.000 simuleringer af klasselokaler i BSim
- Primære fokus ved evaluering:
 - Krav til varme timer
 - Energiforbrug til ventilation og køling

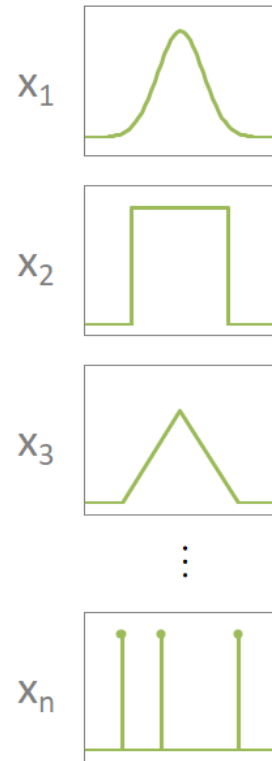
Variabel	Enhed	Variationer			
BYGNINGEN / PASSIVE TILTAG					
Termisk masse	-	Tung	Let		
Natkøling	% af luftmængde	0	25	100	
Natsænkningstemperatur	°C	18	21		
Kold start (1°C koldere om morgenen)	-	Med	Uden		
HVAC					
Maks luftmængde	m ³ /h	700	1000	1300	1600
Køling af ventilationsluften	-	Med	Uden		
VARMEBELASTNINGER					
Antal personer (og deres udstyr)	-	21	24	27	30
Belysning	W/m ²	10	5	5	
	Styring	Manuelt	Manuelt	Dagslys	
SOLINDFALD					
Orientering af vinduer		Nord	Syd	Øst	Vest
Brugstid af solafskærmning (udvendig)	% af brugstiden	0	15	20	25
Glas-gulv-% (u. korrektioner)	%	10	15	20	25
g-værdi af glas	-	0,37	0,51		
Udhæng, dybde	m	0	0,5	1,0	1,5

Statistiske undersøgelser med Monte Carlo simuleringer

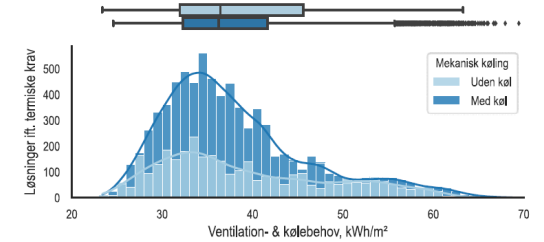
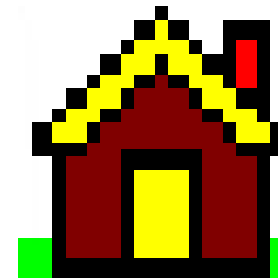
Klasselokale



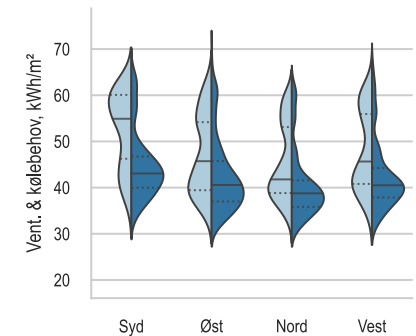
Variationer



44.000
Monte Carlo
simuleringer



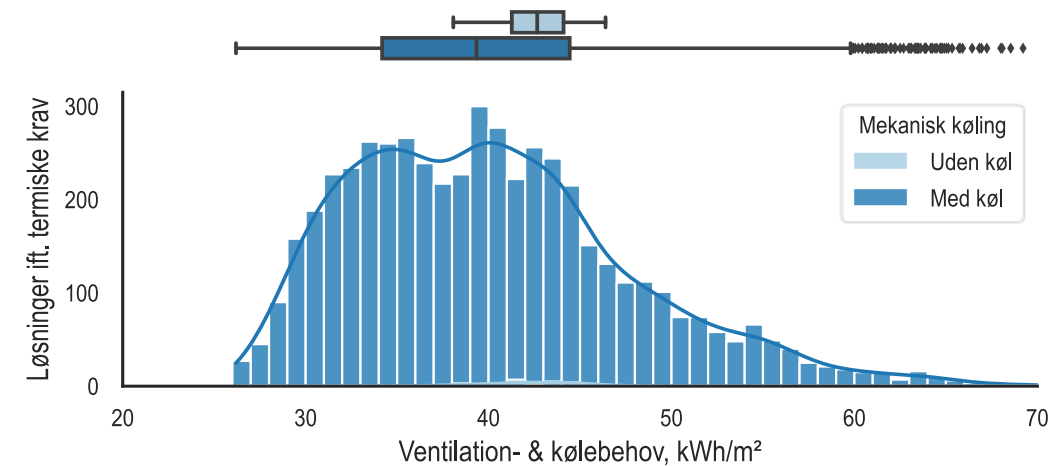
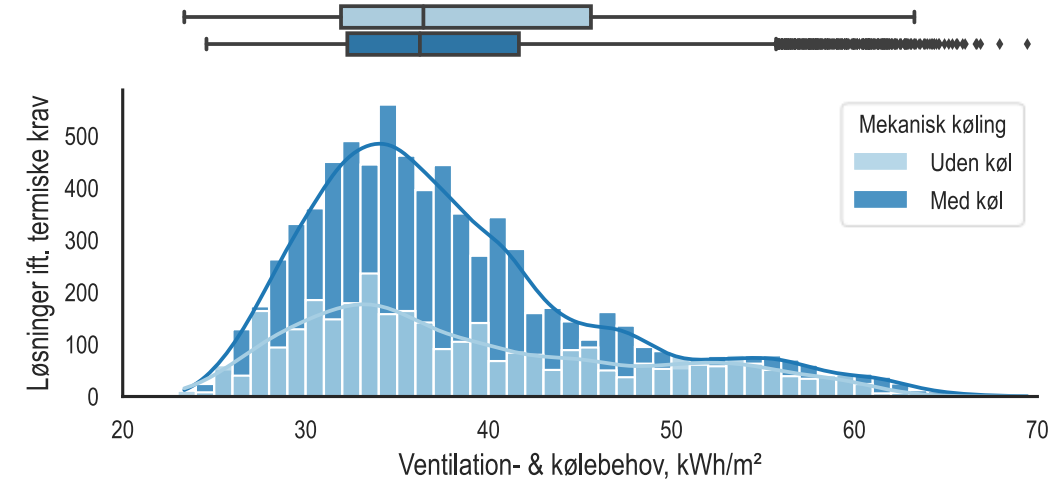
Input	Følsomhedsanalyser *	
	h > 26 °C Energi, V+K	
Køling	24%	5%
Maks. luft	17%	25%
Termisk masse	14%	8%
Natkøling	9%	13%
Orientering	8%	6%
Solafsk. i brug	7%	6%
Personer	7%	15%
Belysning	4%	5%
Glas-gulv-%	3%	2%
g-værdi	3%	2%
Udhæng	1%	2%
Nedsænkning	1%	10%
Kold start	0%	1%



Hvad skal der så til?

En forståelse for, at skolen er blandt de mest krævende indeklimaer at løse

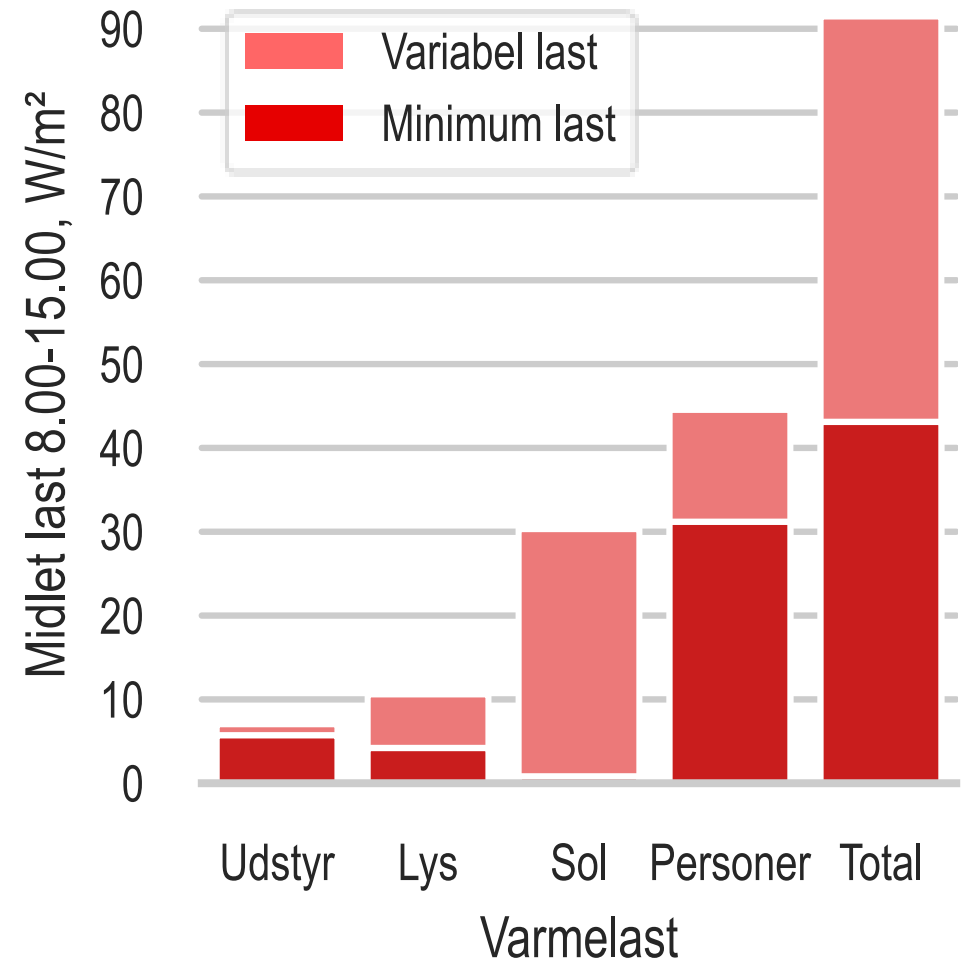
- At indeklima er vigtigere end energibehov
- At klimastyringsbehovet er meget stort
- At det kræver særlige virkemidler
- At det kræver en teknisk driftsorganisation
- At det koster penge, både anlægs- og driftsøkonomisk
- Men at det samfundsøkonomisk er særdeles attraktivt



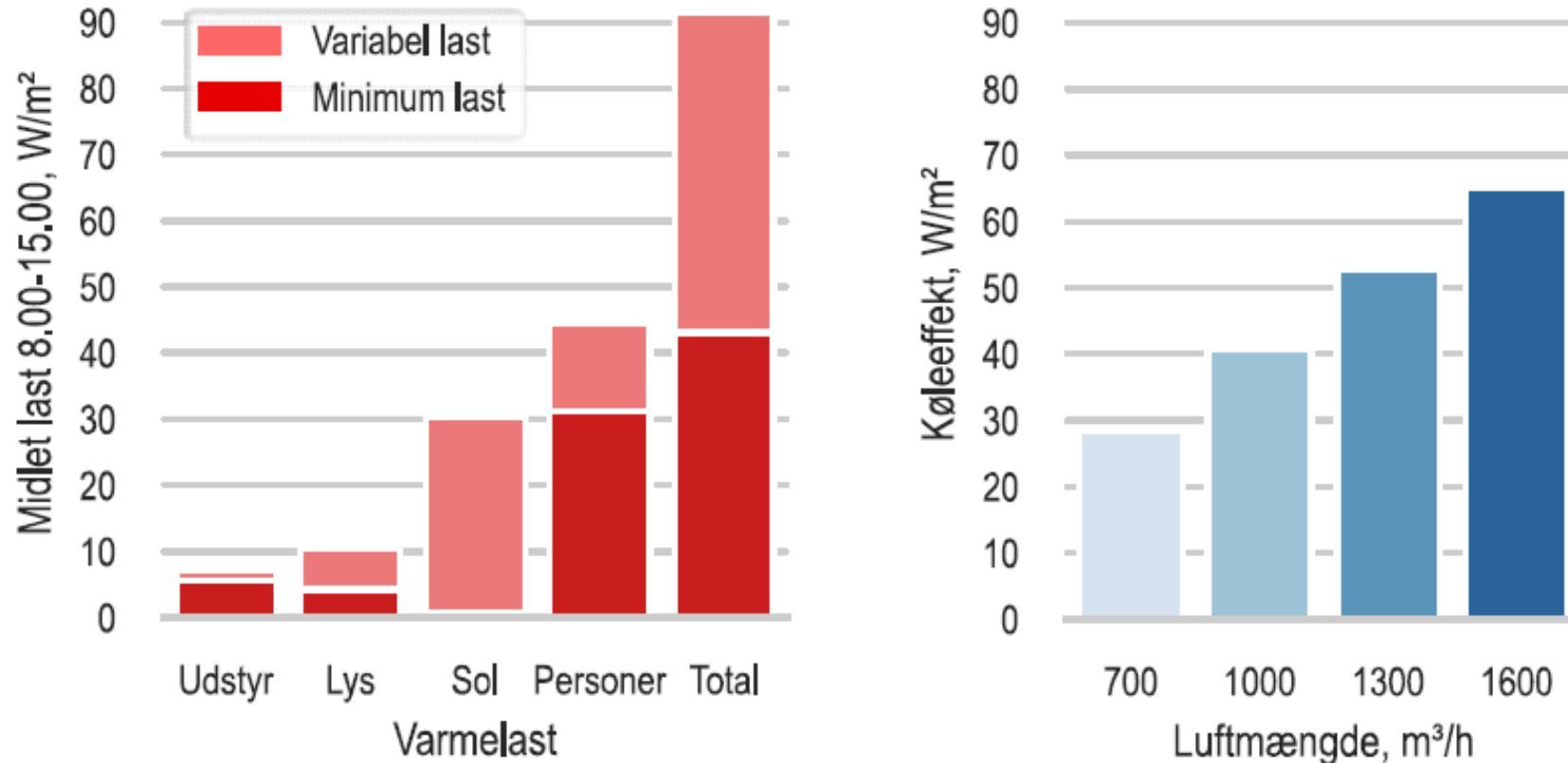
Problematikkens størrelsesorden

Hvorfor er det så så svært?

- Vi bygger med mere dagslys - og vinduer
- Vi bygger termisk lettere byggerier
- Vi bygge med mindst muligt areal
- Vi putter flere elever ind i hver klasse
- Og så er vi blevet mere ambitiøse – eller bare klogere
- Klasselokalet er belastet som et mødelokale
 - Med vinduer og 100% samtidighed



Svært at holde (varme)balancen...



Figur 17 Søjlediagrammet til venstre viser de minimale samt variable bidrag til varmeafgivelsen i brugstiden for 44.293 forskellige modeller. Til højre ses køleeffekterne ved forskellige luftmængder under antagelse om en temperaturdifferens på 7 °C.

Følsomhedsanalyse

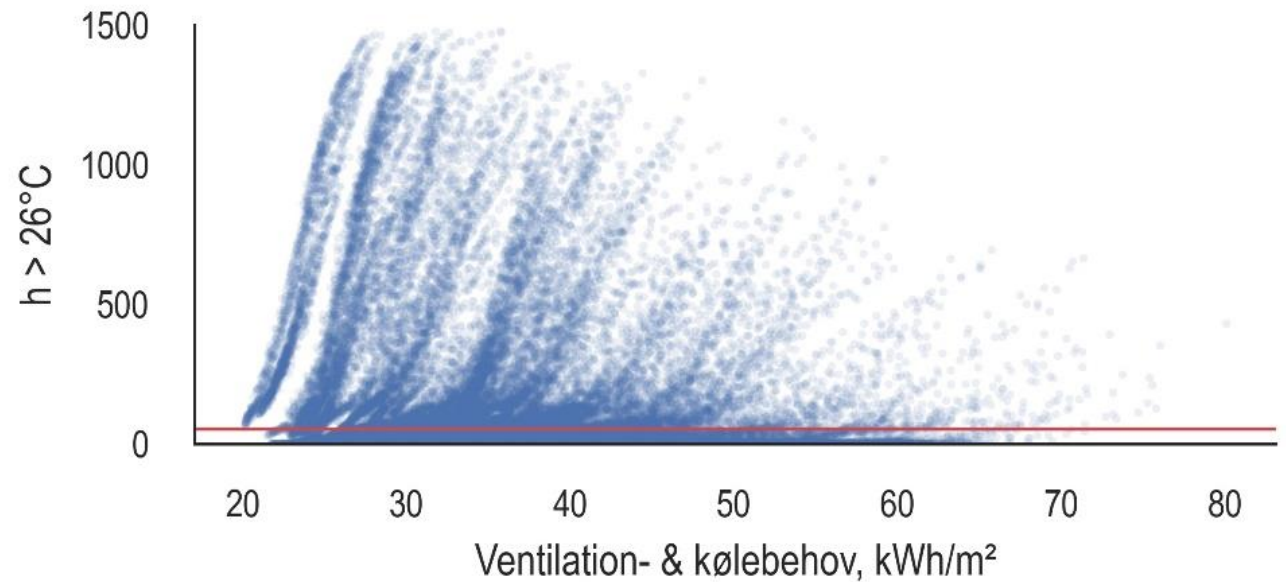
- Viser de tretten parametre, der er varieret på i analysen og deres relative betydning for henholdsvis det termiske indeklima og energiforbruget
- Køling betyder absolut mest i jagten på at opnå et lovmæssigt tilstrækkeligt indeklima. Herefter luftmængde, termisk masse, natkøling, osv.
- Natkøling og maks. luftskifte har stor indvirkning på energiforbruget (i begge retninger)

Input	Følsomhedsanalyser *	
	$h > 26 \text{ }^\circ\text{C}$	Energi, V+K
Køling	24%	5%
Maks. luft	17%	25%
Termisk masse	14%	8%
Natkøling	9%	13%
Orientering	8%	6%
Solafsk. i brug	7%	6%
Personer	7%	15%
Belysning	4%	5%
Glas-gulv-%	3%	2%
g-værdi	3%	2%
Udhæng	1%	2%
Natsænkning	1%	10%
Kold start	0%	1%

* Foretaget med global følsomhedsmetode, SA_{TOM}, og 44.293 Monte Carlo simuleringer (Østergård et al., 2017)

Energiforbrug og temperatur

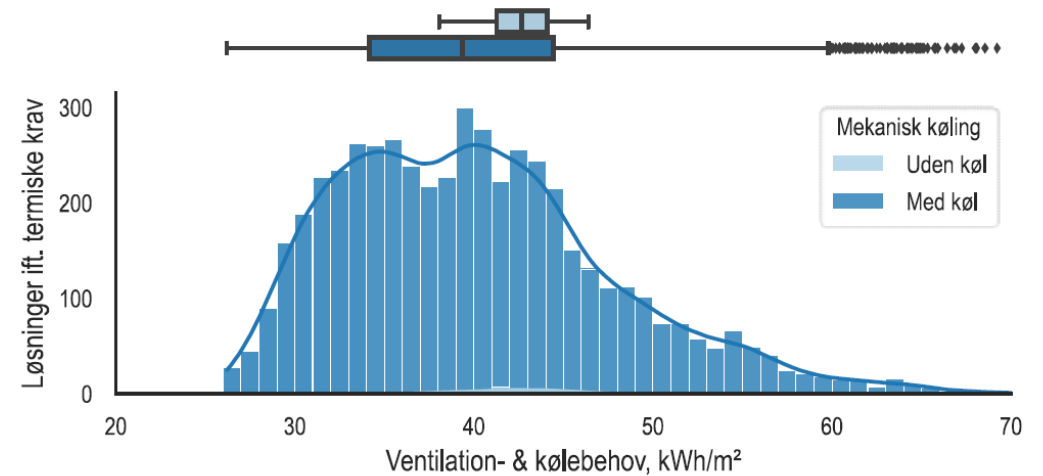
- Ca. 44.000 simuleringer plottet
- 42% af simuleringerne overholder indeklimakravene (under den røde linje)
- Når først det går galt, så går det ofte meget galt (mange timer over 26°C)
- Energiforbruget spænder vidt!
 - Faktor 4 fra bedst til dårligst performance



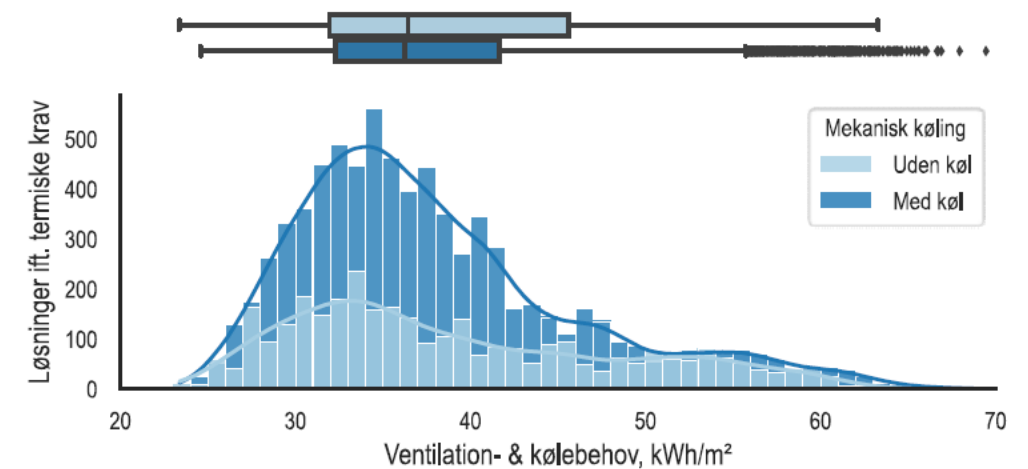
Løsningsrum med og uden køling

- Lette bygninger kan nærmest ikke løses uden køling
- Løsningsrummet for tungebygninger uden køl er væsentligt mindre end med køl
- Energiforbruget til ventilation og kølebehov behøver ikke være stort hvis der anvendes køling
- Løsningsrummet for tunge bygninger byder på flere muligheder med lavt energiforbrug til ventilation og køling end ved lette bygninger

Lette bygninger



Tunge bygninger



Mekanisk køling – skal vi virkelig?

Miljø

- Tidligere meget miljøskadelige kølemidler på markedet er i dag fjernet
- Mindre spildplads til føringsveje, da kanaldimensionen er mindre end uden køling

Drift og driftsøkonomi

- Køl kræver drift, men alle nye bygninger bliver teknisk komplicerede
- I dag er køling ofte forbundet med lavere energibehov, fordi der skal flyttes mindre luft
- Uanset køling kræves teknisk driftspersonalet med en højere grad af viden

Når køling fravælges på forhånd, skrues der i stedet på forudsætningerne, så indeklimaet holder i beregningerne:

- Antallet af elever
- Samtidighed
- Urealistisk udluftning

Uden køling skal vi bygge tungt
Højst sandsynligt med

- Mere luft
- Færre elever

Vigtigste konklusioner

Syd, øst og vest vendte lokaler har behov for køling og automatisk solafskærmning

- Det er lettere at undvære mobil solafskærmning end køling

Laveste energiforbrug opnås med køling

- Natkøling med mekanisk ventilation er energikrævende

Tunge bygninger har generelt lavere energiforbrug end lette

Dimensionér med de rette luftmængder

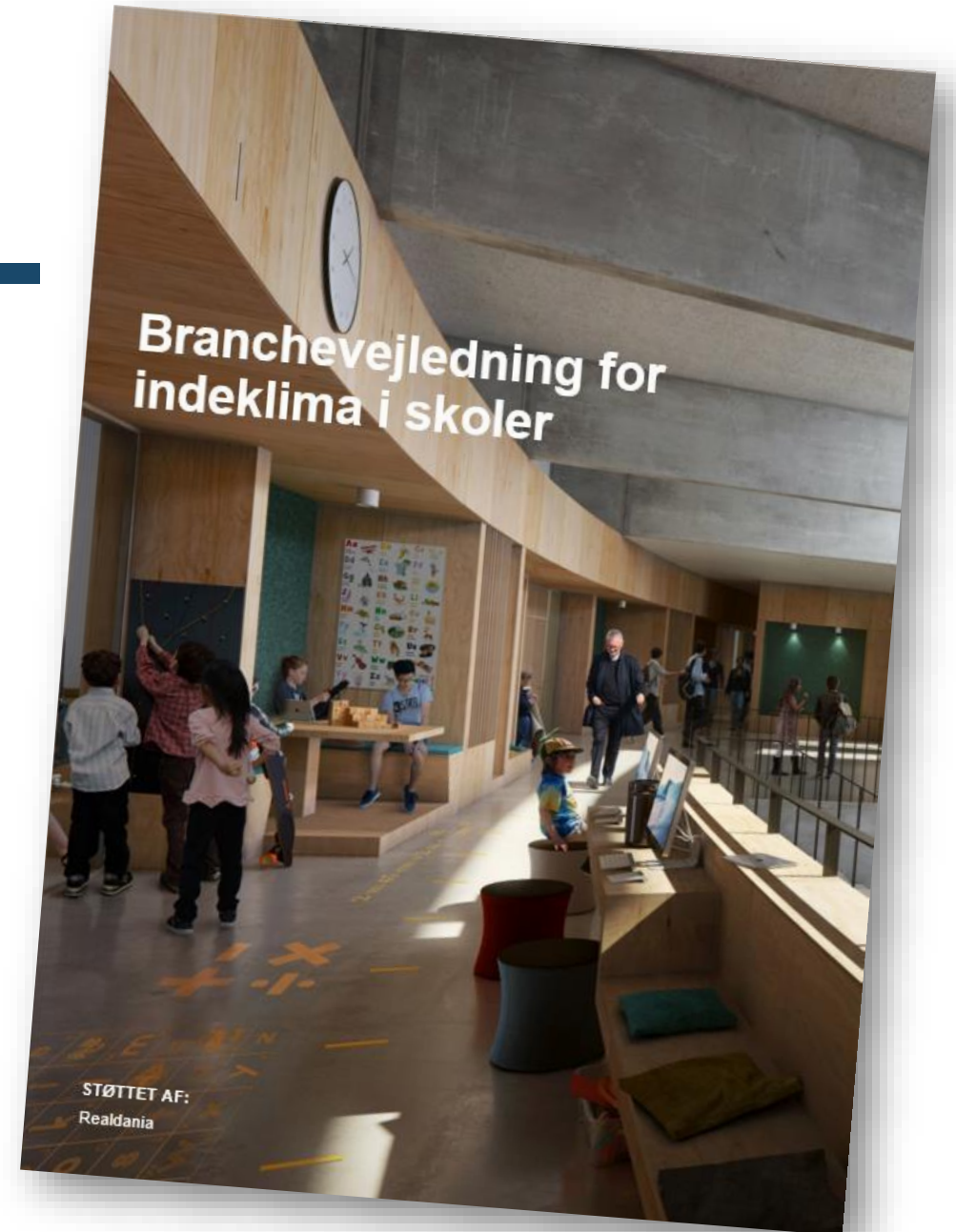
- Generelt er det termiske indeklime dimensionerende for den nødvendige luftmængde



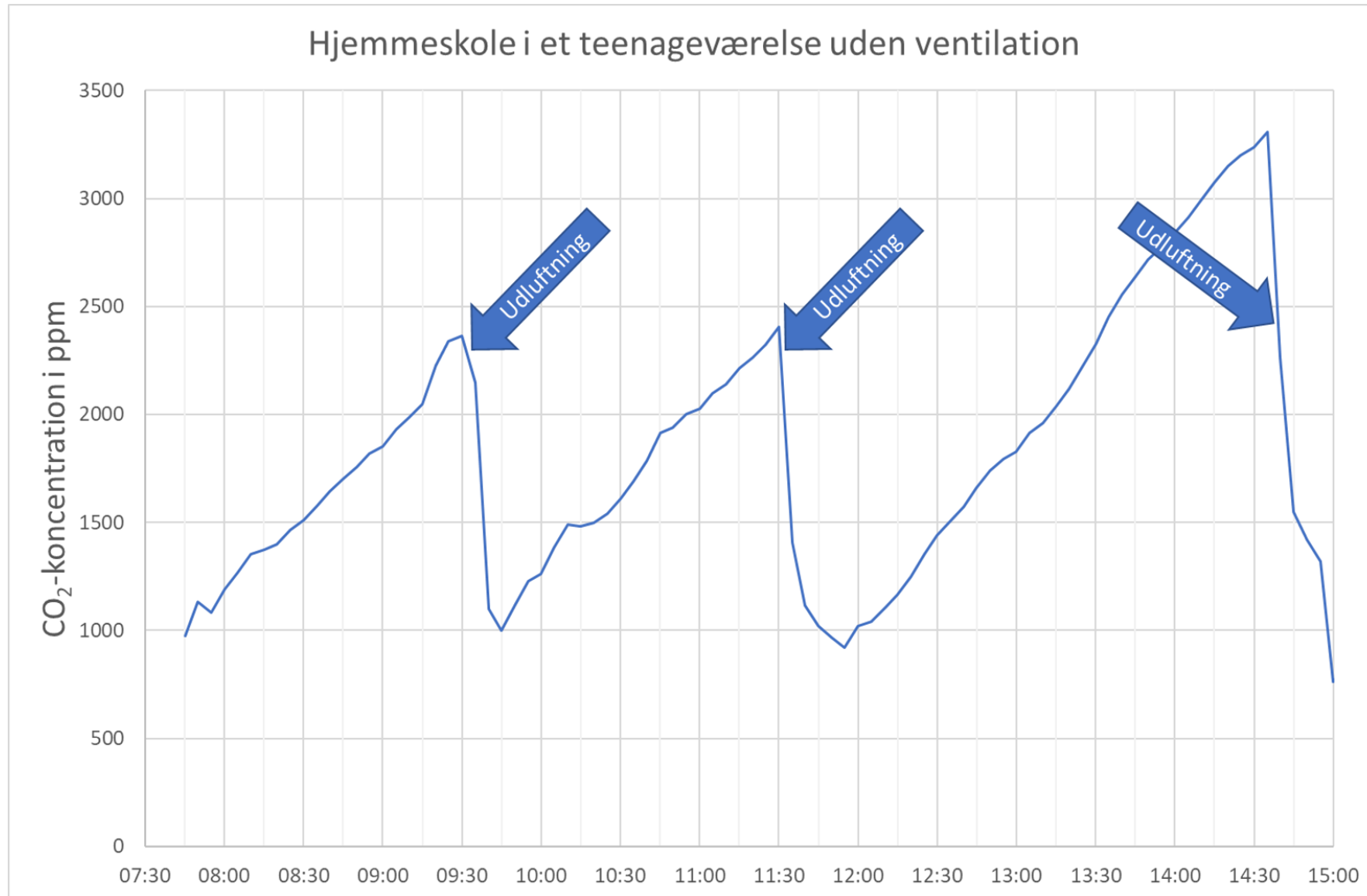
Termisk indeklime



Tak for jeres
opmærksomhed!



Hjemmeskolen



Skole uden køling

– beregnet behov for manuel udluftning: 765 timer årligt

Det vil sige, at vi har åbne vinduer i ca.

500 timer < 18°C ude

450 timer < 17°C ude

380 timer < 16°C ude

320 timer < 15°C ude

250 timer < 14°C ude

190 timer < 13°C ude

100 timer < 12°C ude

tak for kaffe

