Branchevejledning for indeklima i skoler

STØTTET AF:
Realdania

Titel	Branchevejledning for indeklima i skoler
Udgave	1. udgave, 1. oplag
Udgivelsesår	2021
Forfattere	Mette Havgaard Vorre, Peter Noyé, Steffen E. Maagaard, Kasper Bach Johannsen, Torben Østergaard, Martha Katrine Sørensen, Maria Djekic Arent Andersen
Sprog	Dansk
Sidetal	104
Emneord	Indeklima, skoler, temperatur, luftkvalitet, akustik, lys, specifikationskrav, dokumentation
ISBN	978-87-7511-884-7
Udgiver	Teknologisk Institut
Forsidefoto	SUNDskolen er endnu ikke opført. Bygningen skal svanemærkes. Bygherre: Guldborgsund Kommune. Arkitekt: Henning Larsen, ETN arkitekter og Skala Arkitekter. Ingeniør: MOE Fotograf: ©Sora (personerne på billedet er fiktive personer)

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

Rådgivning vedr. indeklima kan være omfattende og komplekst, og ofte har individuelle forhold stor betydning. Det er derfor ikke muligt at beskrive alle forhold fuldstændigt og fyldestgørende i denne vejledning, der udelukkende er til informationsbrug. Informationerne i denne publikation er derfor alene af generel karakter og kan aldrig erstatte individuel rådgivning.

Parterne bag Branchevejledningen til indeklima i skoler fraskriver sig ethvert ansvar for ethvert tab, der måtte følge ved brug af vejledningen, uanset hvordan tabet måtte være opstået.

Forord

Arbejdet med Branchevejledningen for indeklima i skoler blev initieret i en netværksgruppe med bred repræsentation i branchen faciliteret af Dansk Byggeri. Omdrejningspunktet for netværksgruppen var drøftelser af udfordringer med indeklima i skoler.

Branchevejledningen for indeklima i skoler er en pendant til Branchevejledning for indeklimaberegninger, hvor målgruppen er bred og hvor fokus er på faktorer til indeklimaberegninger.

Branchevejledning for indeklima i skoler er udarbejdet af en projektgruppe fra NIRAS, MOE og Teknologisk Institut, som består af:

Mette Havgaard Vorre, NIRAS

Peter Noyé, NIRAS

Kasper Bach Johannsen, MOE A/S

Steffen E. Maagaard, MOE A/S

Torben Østergaard, MOE A/S

Maria Djekic Arent Andersen, Teknologisk Institut

Martha Sørensen, Teknologisk Institut

I forbindelse med tilblivelsen er der afholdt møder med følgegruppen og workshops for henholdsvis byggebranchen og bygherrer.
Branchevejledningen har desuden været rundsendt til de involverede parter til høring og kommentering. Herved har alle interesserede i branchen haft mulighed for at bidrage til udarbejdelsen af Branchevejledningen. Følgende parter har deltaget i workshops og/eller kommenteret i forbindelse med høring af branchevejledningen:

DTU Sektion for Indeklima, BUILD Aalborg Universitet, Teknologisk Institut, FRI, DI Byg, Veltek, Tekniq, Bygherreforeningen, Rådet for Grøn Omstilling, Concito, Realdania, Sweco, Rambøll, MicroShade, DoBconsult, Alpha akustik, VELUX, Saint-Gobain og øvrige enkeltpersoner.

Projektgruppen takker de mange, der har bidraget til udarbejdelsen af Branchevejledningen i form af tid og/eller faglige bidrag, samt økonomisk støtte.

Udvikling af Branchevejledningen er støttet af Realdania.

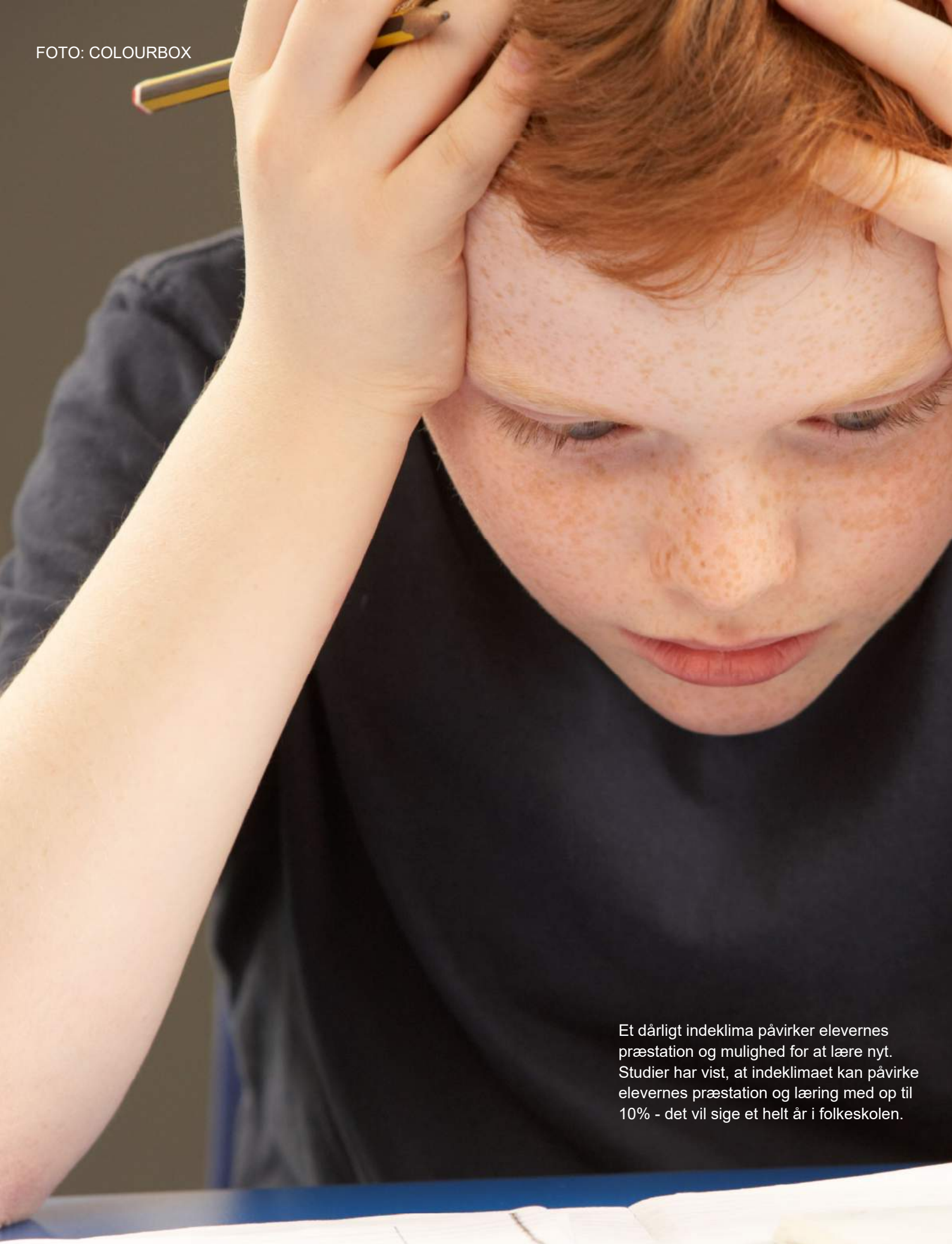


FOTO: COLOURBOX

Et dårligt indeklima påvirker elevernes præstation og mulighed for at lære nyt. Studier har vist, at indeklimaet kan påvirke elevernes præstation og læring med op til 10% - det vil sige et helt år i folkeskolen.

Indhold

Forord 3
Indledning 6
Skolernes indeklima på dagsordenen 6
Indeklima på skolerne i Danmark 7
Formål med Branchevejledning for indeklima i skoler 9
Skolernes arealer og indretning i Branchevejledningen 9
Målgruppe 10
Læsevejledning 10
Del 1. Hvorfor er indeklima vigtigt i skoler? 13
Indeklima og bæredygtighed 13
Indeklima, samfunds- og totaløkonomi 14
Lovgivning om indeklima 15
De fire indeklimaområder 16
Samspillet mellem de fire indeklimaområder 19
Indeklima og præstation 21
Indeklima og energiforbrug 24
Indeklima og kemi i skoler 28
Del 2. Kravspecifikationer for indeklima i skoler 31
Termisk indeklima i skoler 36
Atmosfærisk indeklima i skoler 39
Akustisk indeklima i skoler 40
Visuelt indeklima i skoler 42
Skolens arealer og indeklimakrav 51
Samtidighed og brugsprofiler 54
Del 3. Metoder til at opnå et godt indeklima i skoler 59
Kom i mål med det termiske indeklima 60
Projekteringsovervejelser 77
Del 4. Processen til et godt indeklima i skoler 87
Indledende fase 88
Forslagsfasen 91
Projekteringsfasen 93
Udførelsesfasen 94
Drift 95
Litteraturliste 96
Appendiks A - Trækrisiko 97
Appendiks B - Udsynsklasser 99
Appendiks C - Forudsætninger for simuleringer af energi og indeklima 101

Indledning

Skolernes vigtigste funktion er at give skolebørn de bedste betingelser for læring. Der er mange elementer, der spiller ind i den ligning såsom lærerkompetencer, undervisningsformer og social baggrund. Men det er videnskabeligt bevist, at der også er en sammenhæng mellem indeklimaet i skolerne og elevernes læring. Et dårligt indeklima påvirker elevernes præstation og mulighed for at lære nyt. Studier har vist, at indeklimaet kan påvirke elevernes præstation og læring med op til 10% - det vil sige et helt år i folkeskolen.

Prioritering af et godt indeklima i skolerne er en god samfundsøkonomisk investering, og udover højere indlæring og bedre trivsel betyder et godt indeklima også færre sygedage for både elever og lærere.

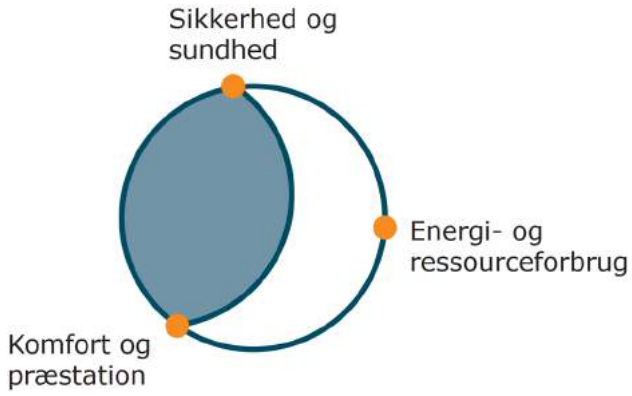
Målet med nærværende branchevejledning for indeklima i skoler er derfor at udbrede viden om, hvad de gode indeklimaforhold i skoler er. Kommunerne har herved et vidensgrundlag til at stille de rigtige krav til indeklimaet i skolerne i forbindelse med såvel renovering og nybyggeri.

Skolernes indeklima på dagsordenen

Mange af de ældre skoler er blevet renoveret, men det er desværre ikke ensbetydende med, at indeklimaet er forbedret. ”Indeklima i skoler” (Clausen et al., 2017) viser, at bygherre indtil nu primært har prioriteret reduktion af energiforbrug og klimabelastning, når skoler skal renoveres.

Når klimaskærm renoveres og ventilation installeres, har det en positiv indvirkning på indeklimaet. Men et snævert fokus på energiforbrug kan også betyde for lave temperaturer om vinteren, for varmt om sommeren eller for lille luftskifte.

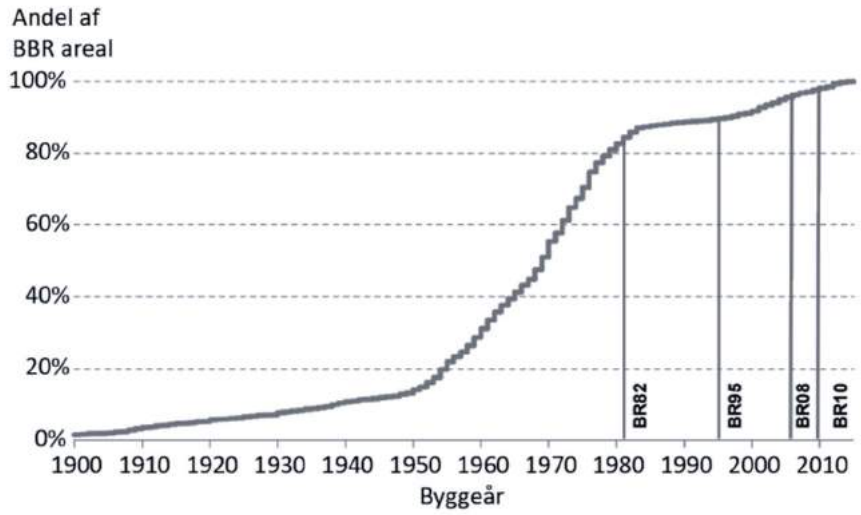
Prioriteringen i forbindelse med en renovering bør være som skitseret i figuren nedenfor, der viser at indeklimaet bør vægtes højere end energiforbrug. Når det er sagt, skal det definerede indeklima etableres på en så ressourceeffektiv måde som muligt.



Figur 1. Illustration af at formålet med bygninger er at skabe sikre og behagelige forhold for dem der opholder sig i dem. Sikkerhed og sundhed vægter derfor højest og derefter indeklima og komfort. Energi- og ressourceforbruget skal selvfølgelig optimeres - men ikke på bekostning af sundhed og komfort.

Indeklima på skolerne i Danmark

Som det ses af Figur 2 er hovedparten af danske klasselokaler bygget mellem 1950 og 1980, hvor der skete en massiv udbygning af landets skoler. Det betyder, at mere end 80% af arealerne i Danmarks skoler er opført før 1982, hvor der første gang blev indført krav til isoleringsgrad og kun 10% af skolerne er opført efter 1995, hvor der blev indført krav om ventilation i bygningerne.



Figur 2 Akkumuleret areal over folkeskolebygninger i Danmark (Clausen et al., 2017)

Både skolerne og vores forventninger til indeklimaet har ændret sig markant, siden den første skolebygning blev opført – men også siden starten af 80'erne hvor indeklima begyndte at figurere i bygningsreglementet. På mange områder er kravene til et klasselokale øget, både i forhold til indeklimaet og belastningen, samtidig med at der er kommet skærpede krav til energi- og ressourceforbrug. Det fører uundgåeligt til et langt mere snævert løsningsrum.

I Tabel 1 herunder er ændringerne i udvalgte indeklimaforhold og fokusområder i bygningsreglementet over tre perioder siden 1980'erne gjort tydelig.

Tabel 1 Oversigt over udvalgte indeklimaforhold og krav fra Bygningsreglementet samt deres ændring over tid fra 1980'erne og frem.

1980'erne	1990'erne	2020'erne
Ingen krav til ventilation i skoler	Ventilation med tilførsel af 5,0 L/s pr person	Krav til maks CO_2-koncentration på 1000 ppm ≈ 9,4 L/s pr person
Ingen krav til rumtemperaturer	Krav til rumtemperatur indgår i Bygningsreglementet	Forskning viser at høje rumtemperaturer påvirker læring negativt
Begyndende fokus på dagslys	Dagslyskrav på 10% glas ift. gulvareal	Dagslyskrav på 10% glas ift. gulvareal korrigeret for skygger eller 300 lux sda → *Glasarealet er blevet øget*
Efterklangstid < 0,9 sek + krav til rum med særundervisning efterklangstid < 0,6 sek	Efterklangstid < 0,9 sek + krav til rum med særundervisning efterklangstid < 0,6 sek	Efterklangstid < 0,6 sek → *mere akustik dæmpning og dermed mindre buffer for temperatur i bygningen (som følge af mindre termisk masse/varmeakkumulering)*
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 buffer for varmeakkumulering		Økonomi og fokus på bæredygtighed medfører lettere materialer i bygningerne → *Lille buffer for varmeakkumulering*
Gens klassekvotient under 19 elever pr klasse (folkeskolen.dk, 2012)	Gens klassekvotient under 19 elever pr klasse (folkeskolen.dk, 2012)	Gens klassekvotient tæt på 22 elever pr klasse Andelen af elever der går i klasser med 25 elever eller flere er steget fra 17% i 2010 til 28% i 2019 (Danmarks Lærerforening, 2019)

Formål med Branchevejledning for indeklima i skoler

Formålet med Branchevejledningen er at forbedre indeklimaet i de danske skoler. Dels ved at argumentere for, hvorfor et fokus på indeklima i skoler er vigtigt og dels ved at beskrive, hvilke specifikationer indeklimaet skal dimensioneres efter. Derved vil aktørerne, der er involveret i skolebyggeri, have et konkret værktøj at arbejde ud fra.

Parterne bag nærværende branchevejledning udgav i 2017 ”Branchevejledning for indeklimaberegninger”, der angiver retningslinjer for standardkrav til indeklimaet, og hvordan indeklimaet beregnes og dokumenteres.

Skolernes belastnings- og brugsprofil er særegne og samtidig i høj grad ens fra skole til skole, derfor er der samfundsmæssig stor værdi i en vejledning målrettet til skolernes indeklima.

Denne branchevejledning fokuserer på indeklimaet i skolernes klasselokaler og områder til gruppearbejde og dækker hele processen fra idéoplæg til drift.

Branchevejledningen kan fungere som en drejebog, når en skole eller en kommune ønsker at forbedre indeklimaet f.eks. i forbindelse med en renovering. Forhåbningen er – som det også var tilfældet med ”Branchevejledning for indeklimaberegninger” – at ”Branchevejledningen for indeklima i skoler” kan være en fælles referenceramme for bygherrer, rådgivere og entreprenører.

Bygherre og rådgiver er med ”Branchevejledningen for indeklima i skoler” og ”Branchevejledningen for indeklimaberegninger” godt rustet til at designe fremtidens skoler med godt indeklima. Det er dog vigtigt at der tilknyttes en erfaren rådgiver, som kan bidrage med kritisk tolkning af beregninger og opstillede krav i det enkelte projekt. ”Branchevejledning for indeklima i skoler” er udelukkende et værktøj til klasselokaler og grupperum. Det anbefales derfor at anvende den tidligere ”Branchevejledning for indeklimaberegninger” sideløbende til eksempelvis kontorarealer på skolen. ”Branchevejledningen for indeklimaberegninger” rummer ydermere viden om dokumentation, som kan være nyttigt for bygherre og rådgiver.

Skolernes arealer og indretning i Branchevejledningen

Branchevejledningen tager udgangspunkt i de arealer på skolerne, hvor eleverne opholder sig mest. Dermed specificeres indeklimakrav til almindelige klasselokaler og arealer, der benyttes i forbindelse med gruppearbejde, f.eks. fællesområder og visse gangarealer. Et fælles fodslag i branchen, til hvad godt indeklima er i disse primære arealer i skolerne, vil give de danske elever et markant løft i indlæringen.

Indeklimakrav til faglokaler som f.eks. fysik/kemi-lokaler, musik, idræt og skolekøkkener er som udgangspunkt af særlig karakter, hvorfor design og krav til indeklimaet skal behandles særskilt.

Undervisningsformen i skolerne er under konstant udvikling. Der ses en tendens til en opblødning af den traditionelle klasseundervisning, hvor der i

højere grad er mere gruppearbejde og flere skift i løbet af skoledagen. Det har dels en betydning for indretningen og dels en betydning for, hvor hårdt det enkelte lokale er belastet.

I Branchevejledningen tages der udgangspunkt i en traditionel indretning og brug af klasselokalet, da skolerne skal have et robust indeklimadesign, der også kan opfylde kravene i fremtidens skole, hvor undervisningsformen måske er en tredje. Grupperum har en central plads i branchevejledningen, da det er tydeligt at skolerne i dag anvender rum til gruppearbejde, som ikke nødvendigvis er designet til ophold og læring.

Målgruppe

Branchevejledningen for indeklima i skoler henvender sig både til bygherrer, som har behov for at specificere indeklimakrav, og til de rådgivere, som skal lave design og projektering af skolens indeklima.

Branchevejledningen kan benyttes som metodebeskrivelse for både meget erfarne og mindre erfarne rådgivere, som alle får glæde af at have en branchevejledning at referere til i forhold til kravspecifikationer, designforudsætninger og input til beregninger.

Baggrundsviden, der er præsenteret i del 1, vil være særlig anvendelig for beslutningstagere på det politiske niveau, når midlerne i de kommunale budgetter skal prioriteres. Forvaltningerne vil ligeledes have glæde af denne baggrundsviden, når indeklima i skoler skal sættes på dagsordenen i kommunerne.

Læsevejledning

Branchevejledningen er delt op i fire dele plus tre appendiks.

Del 1. Hvorfor er indeklima vigtigt i skoler?

Del 1 giver en introduktion til, hvorfor det er vigtigt at have fokus på indeklimaet. Kapitlet giver en baggrundsviden om sammenhæng mellem indeklima og relevante emner som bæredygtighed, energiforbrug, samfundsøkonomi og ikke mindst præstation.

Del 1 er relevant for alle, der er interesseret i at få argumenterne for det gode indeklima på plads. Beslutningstagere og ansatte i kommunerne kan bruge denne viden til at få indeklimaet på dagsordenen.

Del 2. Kravspecifikationer for indeklima i skoler

Del 2 præsenterer kravspecifikationerne for de fire indeklimaområder for hhv. klasselokaler og grupperum. Derudover gennemgås beregningsforudsætninger og grundlæggende begrebsafklaringer for parametrene i kravsspecifikationen.

Del 2 er særligt relevant for rådgiverne og for bygherrer, der skal stille krav til indeklimaet.

Del 3. Metoder til at opnå et godt indeklima i skoler

Del 3 gennemgår, hvordan designparametre har betydning for termisk komfort og energiforbrug. Derudover præsenteres i et overblik fordele og opmærksomhedspunkter for forskellige løsningsprincipper såsom styringsstrategier, ventilationsløsninger, køling, solafskærmning og design af belysning og facade.

Del 3 er særligt relevant for rådgivere og bygherrer/driftsledere, der skal træffe valg om, hvilke løsninger, der skal i spil, når indeklimaet skal designes og vedligeholdes.

Del 4. Processen til et godt indeklima i skoler

Del 4 gennemgår den samlede proces frem mod et godt indeklima på den enkelte skole. Igennem hver fase gennemgås, hvad det er vigtigt for rådgiver og bygherre at være opmærksom på for at få et godt indeklima.

Del 4 er særligt relevant for rådgivere og bygherrer, der igennem byggeprocessen vedvarende skal tænke indeklima ind i de forskellige valg og fravalg.

Appendiks

I appendiks er en oversigt med sammenhørende værdier for temperaturer, lufthastigheder og trækrisiko opstillet. Derudover ses uddybende materiale om udsynsklasser samt forudsætninger for simuleringer af termisk indeklima.

FOTO: COLOURBOX

Mere end en halv million danske børn og unge og omkring 50.000 ansatte tilbringer en stor del af deres tid i skolen. Der er dermed et stort samfundsøkonomisk potentiale i at sikre et godt indeklima i de danske folkeskoler, da indeklimaet kan aflæses direkte i præstationen.

Del 1. Hvorfor er indeklima vigtigt i skoler?

Bygningers primære formål er at skærme for udeklimaet og skabe et mere sikkert og komfortabelt område beskyttet fra udeklimaet. I dag er der foruden sundhed og sikkerhed også fokus på forbedring af komfort og præstation. Denne branchevejledning har fokus på indeklimaets betydning for komfort og præstation i skoler.

Det forudsættes at forhold på skolerne, der kan have betydning for brugernes sikkerhed og sundhed, håndteres særskilt.

I denne del gennemgås kort sammenhæng mellem indeklima, bæredygtighed, energiforbrug og præstationsevne. Derudover gennemgås de fire elementer, som indeklima traditionelt og i denne branchevejledning deles op i – nemlig termisk, visuelt, akustisk og atmosfærisk indeklima. Ved at læse dette kapitel kan du som:

- Bygherre få større viden om, hvorfor det er vigtigt at stille specifikke krav til indeklimaet
- Arkitekt eller indeklimarådgiver få gode argumenter til at prioritere indeklimaet

Indeklima og bæredygtighed

Vores viden om miljø- og klimaproblemer har gennem det sidste halve århundrede vokset sig større. Og en nyere erkendelse af, at bygninger globalt set står for ca. 40% af den årlige CO_2-udledning, har betydet, at fokus på bæredygtighed og særligt energieffektivisering af byggeriet er intensiveret gennem de seneste år.

Begrebet bæredygtigt favner overordnet set tre grundsøjler – miljømæssig, økonomisk og social bæredygtighed. Og det bæredygtige byggeri handler langt hen ad vejen om at sikre en sund afbalancering af de tre aspekter søjler, hvor den ene søjle ikke vægtes højere end den anden. I det bæredygtige byggeri skal vi:

- skåne miljøet og herunder reducere energi- og ressourceforbrug
- tænke langsigtet i vores investeringer
- sikre sunde bygninger, der kan give os de bedste betingelser for at leve og trives

Omdrejningspunktet i nærværende branchevejledning er indeklima i skoler. Et sundt og godt indeklima er afgørende for det sociale ben af det bæredygtige byggeri. Men indeklimaet skal til hver en tid designes i respekt for miljømæssig og økonomisk bæredygtighed. Kravspecifikationer i denne branchevejledning anviser et niveau for indeklimaet, der giver et godt afsæt

for præstation, men som samtidig tager højde for de øvrige aspekter af det bæredygtige byggeri. Herved prioriteres indeklimaet højt uden økonomi og energiforbrug stikker af.

Private certificeringsordninger indenfor bæredygtigt byggeri såsom DGNB, BREEAM og LEED bliver mere og mere udbredt, og med Bolig- og Planstyrelsens lancering af den frivillige bæredygtighedsklasse (FBK) er der en klar tendens mod, at kravene til byggeriernes bæredygtighed stiger.

Både de private certificeringsordninger og FBK stiller krav til indeklimaet som en afgørende del af den sociale bæredygtighed. ”Branchevejledning for indeklima i skoler” understøtter denne sociale bæredygtige udvikling ved at øge kvaliteten af indeklimaet i forhold til termisk, atmosfærisk, visuelt og akustisk indeklima.

Skal der projekteres indeklima med respekt for miljømæssig og økonomisk bæredygtighed, kan man anvende værktøjer såsom LCA og LCC.

Indeklima, samfunds- og totaløkonomi

Grundlæggende skal en skole – eksisterende som ny – leverer de fysiske rammer, der giver eleverne de bedste betingelser for læring. Mere end en halv million danske børn og unge, og omkring 50.000 ansatte tilbringer en stor del af deres tid i skolen. Der er dermed et stort samfundsøkonomisk potentiale i at sikre et godt indeklima i de danske folkeskoler, da indeklimaet kan aflæses direkte i præstationen.

Når bygherre og rådgiver skal træffe valg om, hvilke aktiviteter en skolerenovering skal indeholde, er der mange forhold, der skal tages i betragtning. På samme vis er det også mange valg og fravalg, når en ny skole skal designes, projekteres og udføres. Der har i mange år været fokus på totaløkonomi, hvor investeringer kobles sammen med besparelser i drift. Dette giver rigtig god mening, da der hermed foreligger en metode til at vælge de løsninger, der samlet set over en levetid kan levere ydelsen mest omkostningseffektivt. En større anlægsinvestering kan således være godt givet ud, hvis merudgiften tjenes hjem via lavere driftsudgifter og færre dage med udfald på anlæg.

Investeringer i indeklimaforbedrende tiltag vil som oftest give et udslag i driftsudgifterne, men det kan både betyde reducerede og øgede driftsudgifter. For eksempel vil etablering af solafskærmning både have en positiv effekt på indeklimaet i forhold til overophedning og blænding, og samtidig vil solafskærmning resultere i et lavere energiforbrug til køling eller ventilation. Den modsatte situation viser sig, hvis der f.eks. skal etableres et ventilationsanlæg fra en situation, hvor der kun er manuel udluftning. Dette vil resultere i en øget driftsudgift til opvarmning af ventilationsluften og drift af ventilator. At der er en øget udgift til opvarmning af ventilationsluft skyldes, at de færreste reelt formår at etablere et godt indeklima ved manuel udluftning, så den forventede gevinst ved varmegenvinding udebliver. Til gengæld vil ventilationen betyde langt bedre betingelser for indlæringen.

Når politikere eller bygherrer skal prioritere mellem investeringer, er det derfor vigtigt at fremhæve, at værdien af det gode indeklima ikke kan gøres

op i driften af bygningen alene. I stedet skal opretholdelse af det gode indeklima løftes op på et samfundsøkonomisk niveau, da det har betydning for indlæringen og for antallet af sygedage for både elever og skolens personale. Når fremtidige gevinster ved øget indlæring og mindre sygefravær medregnes, er det ganske enkelt samfundsøkonomisk fordelagtigt at forsyne skolerne med et godt indeklima.

I studiet "Samfundsøkonomiske gevinster ved forbedret indeklima"(Madsen et al., 2020) har Incentive via eksisterende international forskning om sammenhæng mellem indeklima, præstation og sygefravær, søgt at lave en samfundsøkonomisk model for indeklimaforhold i skoler.

Samfundsøkonomisk er der sammenhæng mellem indeklima på den ene side og indlæring, karakterer, valg af uddannelse og i sidste ende lønniveau på den anden side.

Herunder to eksempler på samfundsøkonomiske gevinster ved bedre indeklima som følge af dels øget indlæring dels mindre sygefravær:

- **Øget indlæring**: Gevinst på 2,9 - 10,1 mio. kr. i nutidsværdi for en skole med 650 elever over 30 år (både bedre præstation og øget læring grundet mindre sygefravær).
- **Mindre sygefravær**: Gevinst på 11 - 22 mio. kr. for eleverne og optil 1,16 mio. kr. for lærerne over 30 år for en skole med 650 elever og 50 lærer (sparede lønudgifter og gevinst ved større arbejdsudbud).

Lovgivning om indeklima

I bygningsreglementet indgår en række krav til indeklimaet i skoler både i forhold til termisk, atmosfærisk, akustisk og visuelt indeklima. Derudover indeholder bygningsreglementet krav til bl.a. energiforbrug og energieffektivitet, som påvirker løsningsmulighederne i forhold til etableringen af indeklimaet.

Indeklimakravene i bygningsreglementet vil altid være gældende i forbindelse med nybyggeri, men vil også være gældende for de forhold der berøres i forbindelse med renovering af eksisterende byggeri. Der kan i sjældne tilfælde ved en renovering opstå konkrete situationer, hvor de opstillede krav i bygningsreglementet kan være meget uhensigtsmæssige eller umulige at overholde. I den forbindelse må der søges afklaring hos den lokale byggemyndighed.

Udover bygningsreglementet opstiller arbejdstilsynets bekendtgørelser og vejledninger en række indeklimakrav. Relationen mellem krav i bygningsreglementet og arbejdstilsynets bekendtgørelser og vejledninger kan være vanskelig.

I det omfang byggeriet er omfattet af bygningsreglementet og lever op til kravene på opførselstidspunktet, så stiller arbejdstilsynet som udgangspunkt ikke krav udover bygningsreglementet krav på opførselstidspunktet. Dog kan der i eksisterende byggerier være forhold, der er så langt fra nutidssvarende eller deciderede sundhedsskadelige, at Arbejdstilsynet alligevel går ind og opstiller påbud med udgangspunkt i deres bekendtgørelser og vejledninger.

De opstillede forslag til kravspecifikationer til indeklimaet i denne branchevejledning lever op til kravene i den danske lovgivning. Kravene er suppleret med forslag til en minimumsgrænse i de særlige situationer, hvor det kan være nødvendigt at søge om dispensation.

De fire indeklimaområder

Det oplevede indeklima beskrives ved den samlede påvirkning fra forskellige parametre, der har betydning for det enkelte individs komfort. Følsomheden over for de forskellige indeklimaparametre er individuel, og vil være påvirket af den situation, personen befinder sig i. Det optimale indeklima skaber komfort for flest mulige personer, men på grund af forskelle i individuelle præferencer vil man aldrig kunne gøre alle fuldt ud tilfredse samtidig.

Indeklimaet i en bygning dækker det termiske, det akustiske, det atmosfæriske og det visuelle indeklima. Herunder beskrives de fire områder og deres betydning for indeklimaet.

Termisk indeklima – temperatur og træk

Termisk indeklima dækker de forhold, der har indflydelse på, om en person føler sig kold eller varm. Det kan både være for kroppen som helhed eller for dele af kroppen. Termisk indeklima har stor indflydelse på personers komfort og præstationsevne.

Parametrene lufttemperatur, strålingstemperatur og lufthastigheder/træk har som regel størst betydning. Den samlede påvirkning fra lufttemperatur og strålingstemperaturer udtrykkes ved operativ temperatur, og det er denne, der refereres til i relation til termisk indeklima i normer og standarder.

Om man er i termisk komfort, afhænger desuden af ens beklædning og aktivitetsniveau. Da vi typisk har lidt mindre eller tyndere tøj på om sommeren, ligger den foretrukne temperatur højere end om vinteren.

Træk opstår, når dele af kroppen nedkøles på grund af luftbevægelser. Oplevelsen af træk forværres ved stigende lufthastighed og ved lavere temperaturer. For at tage højde for dette benyttes ”trækrisiko” som et mål for, hvor mange der vil opleve træk under givne forhold.

Den relative luftfugtighed påvirker både det termiske og det atmosfæriske indeklima. Lav luftfugtighed fører til irritation og tørrer hænder, øjne og slimhinder, men giver også en oplevelse af frisk luft. Høj relativ luftfugtighed fører til en oplevelse af tung luft og vil medvirke til at et varmt lokale opleves

endnu varmere. I klasselokaler og lignende opholdsrum i skoler er der yderst sjældent problemer med den relative luftfugtighed, da fugtafgivelsen fra personer ofte er tilstrækkelig til at holde den relative luftfugtighed over 20% og der typisk forekommer et tilstrækkeligt luftskifte til at holde den relative luftfugtighed nede på et fornuftigt niveau under 60%.

Branchevejledningen opstiller forslag til kravspecifikationer for den operative temperatur, luftfugtigheden samt trækrisiko.

Atmosfærisk indeklima - luftkvalitet

Det atmosfæriske indeklima kan også kaldes luftens kvalitet. Luftens kvalitet afhænger bl.a. af indholdet af ilt, fugt, lugtstoffer og af forureninger fra både mennesker, inventar og byggematerialer. Luftkvalitet er vigtigt for personers komfort og præstationsevne.

Luftudskiftning og dermed fortynding og bortventilering af de atmosfæriske belastninger, er vigtigt for at sikre det atmosfæriske indeklima. I bygninger, hvor forureningen primært skyldes personer, er CO_2-koncentrationen en god indikator (proxy) for de bioeffluenter, der forurener luften fra personer. Uden tilstrækkeligt luftskifte og bortventilering af forureninger oplever brugerne gener såsom døsighed og udfordringer med at holde koncentration. Påvirkningerne optræder inden personerne selv bemærker den dårlige luftkvalitet.

Denne branchevejledning omhandler atmosfærisk indeklima i forhold til forurening fra personer og brugeradfærd. Det anbefales at sikre lav afgasning fra byggevarer og inventar f.eks. ved brug af indeklimamærkede produkter. Derudover er det vigtigt, at nye eller renoverede bygninger gennemventileres inden ibrugtagning for at fjerne en del af forureningen fra byggematerialer og inventar. Derudover anbefales det at måle på afgasninger fra byggematerialer og inventar inden indflytning. Der kan findes vejledninger til måleprocedurer og evaluering i både bæredygtighedscertificeringen DGNB og bygningsreglementets frivillige bæredygtighedsklasse.

Akustisk indeklima

Akustisk indeklima i skoler drejer sig både om dæmpning af støjen i lokalet og fra omgivelserne, men også om at sikre taleforståelsen i lokalerne.

Akustisk set skal der derfor findes den rette balance mellem, at rummet dæmper den uønskede lyd som f.eks. støj fra installationer, trafik eller stole der flyttes, og at lyden ikke dæmpes så meget, at det går ud over taleforståeligheden i den informationsbærende lyd.

Et dårligt akustiske indeklima kan påvirke både koncentration, søvn og stressniveau, samt forøge belastningen på hørelsen og stemmen. Derfor er det vigtigt, at vi sikrer akustiske forhold, der understøtter både gode læringsforhold for elever og undervisningsforhold for lærere.

Det er vigtigt allerede i de tidlige faser i en renovering eller nybyggeri at danne sig et overblik over de akustiske zoner i byggeriet, bygningens omgivelser og planlægge de akustiske principper for byggeriet. Der vil i klasselokaler og gangområder være behov for at opsætte lydabsorberende

materiale, ligesom valg af gulvopbygning og stole medvirker til at mindske støjen.

Branchevejledningen opstiller en række krav, som understøtter et godt akustisk indeklima i klasselokaler og områder der benyttes til gruppearbejde. En del faglokaler, såsom musik- og sløjdlokaler, har særlige akustiske behov, som ikke er dækket af denne branchevejledning.

Visuelt indeklima – dagslys, udsyn og elektrisk belysning

Det visuelle indeklima omhandler primært dagslysmængde og -fordeling, udsyn til omgivelserne, elektrisk belysning og blænding.

Dagslysadgang, udsyn og design af den elektriske belysning har indflydelse på både vores døgnrytme, sundhed og præstationsevne. Undersøgelser viser, at netop muligheden for at opnå gode dagslysforhold og adgang til frit udsyn er blandt de mest værdsatte elementer i et godt indeklima. Dagslyset påvirker præstationsevnen og netop forandringerne i lyset medvirker til at give hjernen et boost, f.eks. når solen bryder igennem og øger lysmængden markant. Udsyn til grønne omgivelser er det mest optimale og samtidigt det som personer i høj grad værdsætter, ligesom det virker afstressende.

Vedrørende dagslys er det dagslysmængden og fordelingen på bordfladen, der giver størst værdi. Derfor bør vinduerne hovedsageligt placeres over skolebordsniveau, dog med fokus på at de små elever fortsat har udsyn til omgivelserne. Vinduer kan med fordel placeres med forskellige orienteringer, hvis det er muligt, eller suppleres med ovenlys. Netop lysindfald fra flere retninger bidrager væsentligt til dagslysoplevelsen. Placering af vinduer, deres størrelser og egenskaber indgår som regel i en optimering mellem dagslys, udsyn og det termiske indeklima. Store vinduesarealer giver ofte problemer med høje temperaturer, på grund af et stort varmetilskud fra solen.

Udsynet kan i dele af brugstiden være blokeret af solafskærmning for at undgå overophedning. I kravspecifikationerne er der angivet forslag til hvor stor en del af brugstiden, udsynet må være blokeret afhængigt af typen af afskærmning.

Elektrisk belysning tager over, når der ikke er tilstrækkeligt dagslys. Bygningsreglementet stiller krav om dagslysstyring på nye anlæg, og det gælder også hvis et belysningsanlæg udskiftes. Derudover kan farvetemperaturen i dag justeres og i højere grad afspejle dagslysets variationer, hvilket hjælper hjernen til en bedre døgnrytme.

Lysfordelingen i et klasselokale og muligheden for at skabe forskellige scenarier kan understøtte undervisningsformerne ved at skabe rum i rummet og ved at vejlede eleverne med hvor de skal rette fokus hen.

I kravspecifikationerne er der angivet en række krav til dagslys, udsyn og kvaliteten af den elektriske belysning, som skal sikre et godt visuelt indeklima i skolerne.

Samspillet mellem de fire indeklimaområder

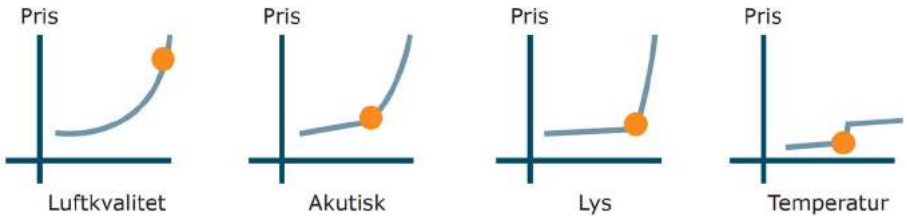
I det konkrete byggeri skal indeklimaets fire elementer med hver deres tilhørende parametre afvejes omhyggeligt, i praksis helt ned til den enkelte funktion og anvendelse.

Der skal skabes en afvejning af krav, fokus og allokering af ressourcer og økonomi, der afspejler den optimale balance i det enkelte tilfælde. Balancen fokuseres på at skabe mest indeklima for de anvendte ressourcer både økonomisk og ressourcemæssigt.

Indeklimaets forskellige elementer og de nødvendige tiltag for at optimere den enkelte parameter er ofte egoistisk. En maksimering af én kvalitet kan meget vel have negativ indflydelse på en anden. F.eks. er store glasarealer optimale for lys og udsyn, men de skaber væsentlige problemer med det termiske indeklima og blænding. Den samlede retmæssige afvejning af alle parametre i forhold til den enkelte funktion er derfor kritisk.

Det er ikke let at opstille krav til indeklimaets forskellige elementer. Dette skyldes, at man uden den efterfølgende analyse for den konkrete bygning og funktion ikke får et samlet overblik over, om enkelte krav i praksis vil dominere så meget, at det vanskeliggør en opnåelse af de øvrige inden for det enkelte projekts rammer. Ved opstilling af krav til indeklimaet er det altid væsentligt at tilgå denne øvelse med en vis grad af forsigtighed - særligt hvis der er ønsker om at skærpe enkelte krav meget udover, hvad der er vanlig praksis. I den henseende bør det altid overvejes om de forskellige kravniveauer afspejler en ensartet ”værdiforståelse” af de enkelte indeklimaparametre og i øvrigt kan realiseres indenfor projektets rammer.

I kravspecifikationen og den efterfølgende realisering af indeklimaet er det således altid vigtigt at sikre en optimal afvejning af indeklimaets parametre. Optimalt set bør der anvendes den samme sidste marginale investering i forhold til den relativt forbedrede kvalitet indenfor hver enkelt tiltag. I nedenstående figur er princippet illustreret med udgangspunkt i en løsning, hvor atmosfærisk indeklima er overprioriteret i forhold til de øvrige parametre. Konklusionen fra figuren er, at der samlet set kunne opnås bedre indeklima ved at allokere en del af den sidste marginalinvestering i luftkvalitet til de andre parametre – akustik, lys og temperatur.



Figur 3. Illustration af sammenhæng mellem pris og kvalitet og balancen mellem de fire indeklimaområder

I afvejningen af indeklimaets elementer og samlede kvalitet vil i nogen sammenhænge være et forøget energiforbrug. I den afvejning bør det gode indeklimaet være en forudsætning, der skal opretholdes på en så energieffektiv måde som muligt. Dette beskrives yderligere i afsnittet om Indeklima og energiforbrug nedenfor.

Skolen i Sydhavnen

Bygherre: Københavns Kommune

Arkitekt: JJW ARKITEKTER

Ingeniør: NIRAS

Fotograf: Torben Eskerod

Indeklima og præstation

Indeklima er oftest associeret med komfort og sundhed, men indeklimaet har også stor indvirkning på, hvor effektivt og kreativt vi arbejder. Udover direkte at forbedre præstationen reducerer et godt indeklima også sygefraværet, ligesom frustrationer og konflikter mindskes. Desuden er følsomheden i forhold til dårligt indeklima større, hvis man er presset på andre punkter. Konsekvenserne af andre problemer kan altså forværres, hvis der også er dårligt indeklima, og forskning indikerer, at dårligt indeklima i skoler i særlig grad går ud over de svageste elever. Eller vendt rundt så er det de svageste elever, der får mest gavn af forbedret indeklima.

Et godt indeklima hjælper til

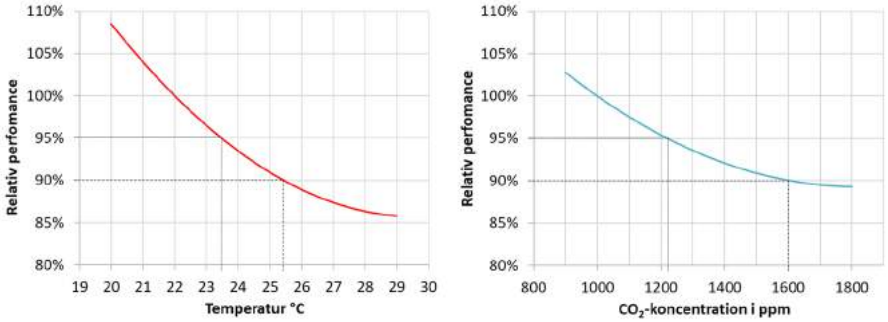
- Hurtigere opgaveløsning
- Mere kreativitet
- Mindre sygefravær
- Færre konflikter og frustrationer

Indeklimaforskningen har haft størst vægt på sammenhængen mellem præstationsevne versus det termiske og det atmosfæriske indeklima. Men der er også studier, der peger på en relation mellem præstation versus visuelt og akustisk indeklima.

Termisk og atmosfærisk indeklima versus præstation

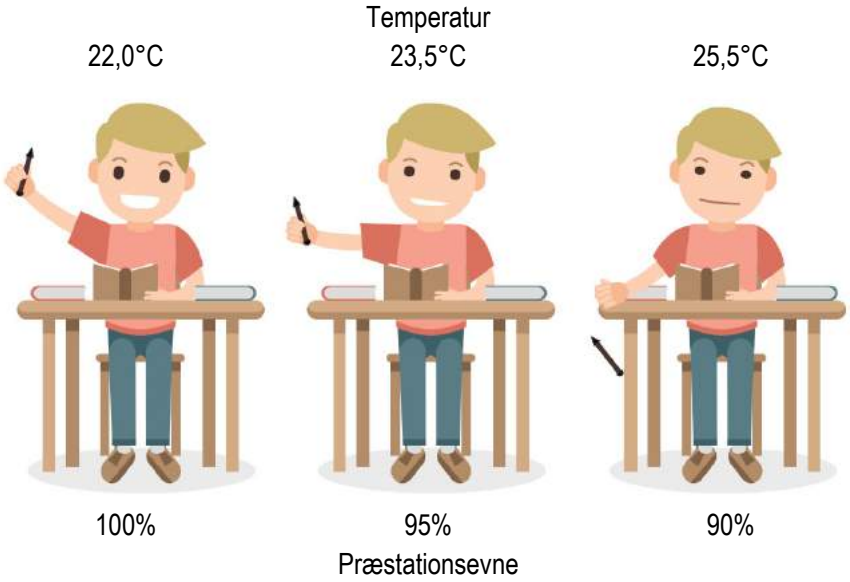
Der er gennemført en lang række undersøgelser både i Danmark og i udlandet af sammenhængen mellem det termiske og det atmosfæriske indeklima i et lokale og præstationsevnen for de personer, der opholder sig i lokalet. En del forskning har set specifikt på skoler, og hvilken betydning bedre indeklima har på elevers indlæring og evner til opgaveløsning. Og konklusionen er tydelig: Der ses en klar fremgang i præstationsevne, når lokalernes termiske og atmosfæriske indeklima forbedres.

I Figur 4 viser grafen til venstre sammenhængen mellem præstation og temperatur mens grafen til højre viser sammenhæng mellem præstation og CO_2-koncentrationen (Wargocki et al., 2019, 2020). På graferne er 100% performance lagt ved hhv. 22°C og 1000 ppm.



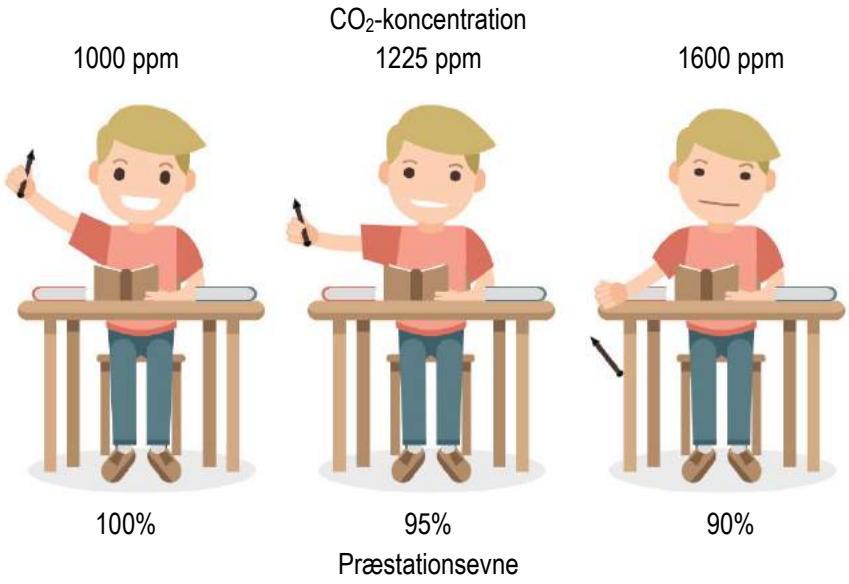
Figur 4 Sammenhæng mellem præstationsevne for skoleelever i forhold til hhv. temperaturen i lokalet og CO2-koncentrationen. Graferne er optegnet i henhold til (Wargocki et al., 2019, 2020) og for de temperatur- og CO_2-intervaller, der er benyttet i undersøgelserne.

Ud fra grafen til venstre ses det, at hvis temperaturen i lokalet stiger fra 22°C til 23,5°C falder elevernes præstation til 95%, og kommer temperaturen op på 25,5°C er præstationsevnen faldet til 90%. Sænkes temperaturen i klasselokalerne omvendt til knap 20,7°C vil præstationsevnen forøges til 105%.



Figur 5 Præstationsevnen for skoleelever falder ved stigende temperatur. Der ses et fald i præstationsevne på 5% når temperaturen stiger fra 22,0°C til 23,5°C og på 10% nå den stiger til 25,5°C (Wargocki et al., 2019)

På grafen til højre i Figur 4 ses et fald fra 100% til 95% i præstationsevne, hvis CO_2-koncentrationen stiger fra 1000 ppm til 1220 ppm, mens præstationsevnen falder til 90% ved CO_2-koncentration på 1600 ppm. Ved at sænke CO_2-koncentrationen til 900 ppm opnås en præstationsevne på 103%.



Figur 6 Præstationsevnen for skoleelever falder ved stigende CO_2-koncentration. Der ses et fald i præstationsevne på 5% når CO_2-koncentrationen stiger fra 1000 ppm til 1225 ppm og på 10% når den stiger til 1600 ppm (Wargocki et al., 2020)

Med udgangspunkt i sammenhængene mellem præstation, temperatur og CO_2-koncentration, bør temperaturen i klasselokalerne have samme fokus som CO_2-koncentrationen. Der er belæg for, at det giver større effekt at sænke temperaturen 1°C end af at sænke CO_2-koncentrationen 100 ppm.

I studiet af Wargocki et al. bemærkes det, at den optimale temperatur for børn ligger lavere end for voksne. Børn befinder sig ofte godt ved 20-21°C, hvilket af de fleste voksne vil blive opfattet som koldt og derfor vil der være en afvejning mellem hensynet til eleverne og læreren.

For begge kurver gælder, at sammenhængen er næsten lineær ved de lavere værdier og flader ud ved de højere værdier af temperatur og CO_2-koncentration. Rent økonomisk er det dog langt dyrere at sænke CO_2-koncentration yderligere ved de lave værdier end ved de høje, og det samme er tilfældet i forhold til temperaturniveauet.

Det atmosfæriske indeklima har haft stort fokus, de seneste år, hvor ældre skoler er blevet opgraderet med ventilation i klasselokalerne. Den tendens skal fortsætte, så alle danske børn undervises i ventilerede lokaler. Men den nye forskning peger på, at det termiske indeklima har større indflydelse på elevernes performance end hidtil antaget. Det gode er, at ventilationen i klasselokalerne også hjælper på det termiske indeklima, alene på grund af den varme der fjernes, når varm indeluft udskiftes med koldere udeluft. For at øge effekten kan det overvejes i højere grad at styre ventilationen efter at holde temperaturen nede i klasselokalerne. Derudover bør der være fokus på, hvordan temperaturen i klasselokalerne sikres i årets varme perioder, hvor ventilation med udeluften alene ikke er tilstrækkeligt til at holde temperaturen nede.

Det er endnu ikke undersøgt, hvordan kombinationen af både høj temperatur og lavt luftskifte påvirker præstationen, men det tyder på, at præstationen

bliver endnu dårlige, end hvis blot én af faktorerne er til stede. Om effekten skal adderes, multipliceres eller noget tredje er endnu ikke afdækket.

Visuelt indeklima og præstation

Både dagslys, udsyn og belysning har betydning for elevernes præstationsevner i klasselokalet.

Det visuelle indeklima påvirker kroppens kortisolniveau og dermed styring af, hvor vågen man er. Lysniveauet hjælper således med til at eleverne er vågne og veloplagte i undervisningen. Studier af simuleret dagslyspåvirkning viste, at eleverne præsterede bedre i matematikprøver og havde bedre opmærksomhed, når lyset simulerede dagslys (Wargocki & Wyon, 2021). Dagslys har en spektral sammensætning, som styrker flere af de fysiologiske og biologiske fænomener, der hjælper kroppen til at agere hensigtsmæssigt i løbet af dagen.

Udsynet til omgivelser påvirker både elevernes evne til at koncentrere sig og evnen til at falde til ro igen efter stressede situationer. Udsyn til natur har dermed klart positive effekter på eleverne, og understøtter både deres faglige og sociale kompetencer. (Wargocki & Wyon, 2021)

Flere studier har undersøgt sammenhæng mellem den elektriske belysningsstyrke og koncentrationsevne og præstation. Nogle studier har vist forbedringer ved høje belysningsniveauer, mens andre har vist, at effekten kun er kortvarig. Der er dog ingen tvivl om, at det er gavnligt at kunne tilpasse lysstyrken til aktiviteten, og at der skal være tilstrækkeligt lys til den givne opgave. Helt konkret er det også vigtigt, at alle elever kan se og aflæse lærerens ansigt, og at det er muligt at se, hvad der er på smartboardet uden at lokalet skal mørklægges.

En del studier peger på, at fordelingen af lyset i rummet og det at tilpasse belysningen til aktiviteterne har betydning. Præstationsfremmende belysning er lys, der viser os, hvor vi skal holde fokus, og som enten samler til klasseundervisning eller opdeler i mindre rum til gruppearbejde.

Akustisk indeklima og præstation

Støj i klasselokalet påvirker både elevernes evne til at høre, hvad læreren siger og lærerens evne til at kommunikere. Lærernes stemmer bliver mere slidte i støjfyldte lokaler. De negative effekter ved støj i lokalet rammer særligt de mindre børn, tosprogede børn og børn med hørenedsættelser.

Støj kan særligt påvirke evnen til koncentration, selv ved lave lydstyrker kan støj aflede opmærksomheden.

Lydisolering, dæmpning af støj i lokalet og ikke mindst det at mindske støjgenereringen i lokalerne har derfor stor positiv indvirkning på elevernes præstationsevner.

Indeklima og energiforbrug

Indeklima og energiforbrug hænger ofte sammen, og store dele af energiforbruget i bygninger benyttes da også til at opretholde indeklimaet. I

dag betyder skærpede forventninger til indeklimaet og forøgede krav til antal elever i klasserne, at omfanget af installationer og størrelsen af energibehovet forøges.

Forbedringer af det termiske, atmosfæriske og visuelle indeklima har stor indflydelse på energibehovet – forøgede luftmængder og højere belysningsniveauer kræver umiddelbart mere energi, mens bearbejdning af dagslys og udsyn både kan forøge ventilationsbehovet og reducere behovet for kunstig belysning. De forskellige indeklimaparametres samspil og sammenhængen med energibehovet er komplekse, og det samlede energibehov kan effektiviseres betydeligt ved omhyggelig optimering.

Energieffektivitet opnås blandt andet gennem hensigtsmæssigt bygnings- og facadedesign, håndtering af termiske belastninger og optimerede installationer. I den forbindelse ser vi i dag ofte, at det er energimæssigt mest effektivt at etablere mekanisk køling fremfor ekstreme luftmængder – et valg der understøttes af, at mekanisk køling via ventilationsluften er mere energieffektivt ende tidligere, og at kølemidlerne er naturlige, og hermed har mindre miljøbelastning og lavere GWP.

De seneste år har der i forhold til bæredygtighedsdagsordenen været særlig fokus på energieffektivisering af byggeriet – herunder løbende driftsoptimering og energirenovering.

I både det nyopførte og eksisterende byggeri er den ofte ensidige fokusering på energibesparende og energieffektiviserende tiltag tit sket på bekostning af indeklimaet. At der således ”spares” på indeklimaet, skyldes i praksis en række faktorer:

- at funktionalitet og energibesparelser prioriteres over forbedret indeklima i en begrænset anlægsøkonomi
- at de nødvendige installationer til etablering af indeklimaet får et tilhørende ikke uvæsentligt arealkrav og
- at opretholdelsen af et mere ambitiøst indeklima i sig selv giver anledning til et forøget energibehov, der umiddelbart er i modstrid til det mere fremtrædende ønske om energieffektivisering.

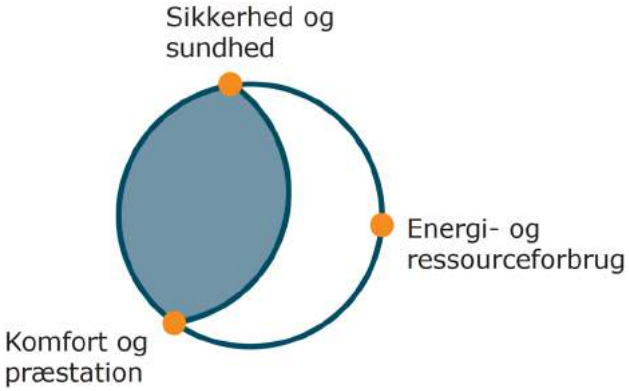
Når der på trods af en forståelse for indeklimaets vigtighed kan ”spares” på det, skyldes det desværre en i praksis manglende forståelse for forudsætningerne for at etablere et robust og godt indeklima. Således ses der desværre ofte eksempler på undervurdering af den reelle brug og belastning eller en urealistisk overvurdering af forskellige virkemidler og systemers effektivitet og anvendelse – eksempelvis omfanget af manuel udluftning.

Tilsvarende ses også eksempler på energioptimering, der decideret kan give anledning til, at indeklimaet forværres – eksempelvis efterisolering og etablering af tæthed uden samtidig at etablere mulighed for ventilation.

Der er, med baggrund i ovenstående, behov for et paradigmeskifte. Energieffektivisering er i forhold til bæredygtighedsdagsordenen vigtig, men bør ikke prioriteres højere end robust bygningsfysik, indeklima og den reelle funktionalitet af byggeriet. Energieffektivitet bør også afvejes omhyggeligt i forhold til kvalitet, robusthed og fleksibilitet - alle begreber som i omfattende

grad kan medvirke til at sikre langtidsholdbarheden af den ressourceanvendelse, der indbygges i det enkelte byggeri.

I forhold til ovenstående er energieffektivitet selvfølgelig en prioritet i forbindelse med projektering og drift af undervisningsbyggeri - men i praksis bør indeklima samt sikkerhed og sundhed altid have en højere prioritet som illustreret nedenfor:

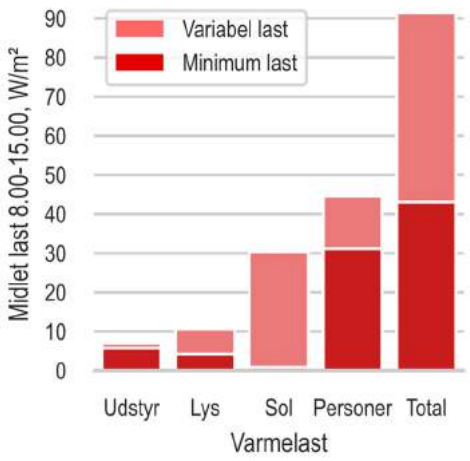


Parametriske simuleringer

I forbindelse med udarbejdelsen af denne branchevejledning er der gennemført en omfattende analyse af indeklimaet og energiforbruget i et klasselokale ved variation af en lang række parametre i en indeklimamodel (BSim). Formålet var at belyse de individuelle parametres betydning i jagten på at opnå det gode indeklima, uden unødigt energiforbrug. En nærmere beskrivelse af studiet, og læringen deraf, kan findes i Del 3. Herunder gives en kort beskrivelse af studiet og hovedpointerne fremhæves.

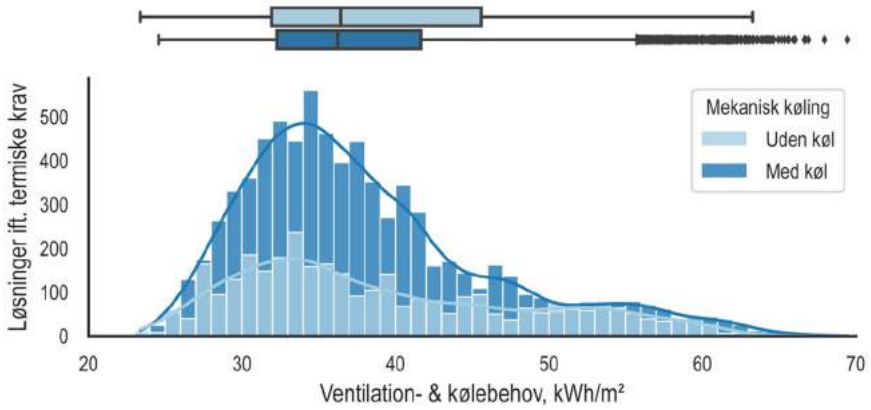
I det parametriske studie er der foretaget 44.293 bygningssimuleringer, som er dannet ud fra tilfældige kombinationer af 13 variable designparametre. I virkeligheden haves naturligvis et uendeligt antal designmuligheder. Men ved at variere bredt på de vigtigste forudsætninger og designvalg, giver undersøgelsen et godt repræsentativt billede af muligheder og udfordringer. De tusindvis af simuleringer favner således klasselokaler med lavt og højt varmetilskud (fra sol, personer og udstyr) ved forskellige kombinationer af passive og aktive tiltag (solafskærmning, køling, m.m.).

Luftkvaliteten er i alle tilfælde sikret ved tilstrækkelige luftskifter, hvorfor der i stedet er fokus på opnåelse af et godt termisk indeklima. Dette er dog en vanskelig opgave grundet klasselokalers høje personbelastning og tilstedeværelse. For at understrege dette kan man på Figur 7 se hvor meget varmeafgivelsen fra personer bidrager til det samlede varmebidrag til klasselokalet. Her er varmelasten for hver af de 44.293 simuleringer midlet i skolens brugstid fra 8.00 til 15.00 og omregnet til W/m² gulvareal. Personantallet er i analysen varieret fra 21 til 30 personer. Soltilskuddet kan variere i langt højere grad afhængig af vinduernes størrelse, rudevalg og solafskærmning. Det totale varmetilskud vil således ligge imellem ca. 43 og 91 W/m², hvilket i alle tilfælde er højt.

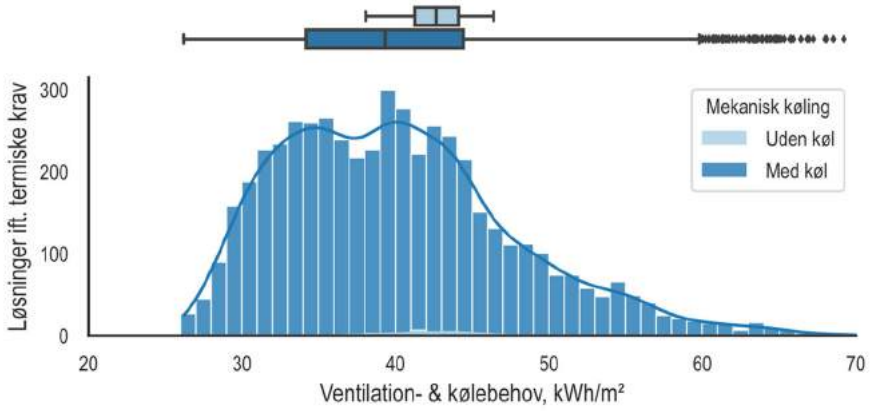


Figur 7. Varmelasterne midlet inden for skoleårets brugstid for hver af de 44.293 simuleringer. Sollasten har den største variation, grundet mulighederne for at begrænse denne, mens varmeafgivelsen fra personer giver det største bidrag til den totale varmelast.

For at opveje disse høje interne laster kræves typisk en kombination af både passive og aktive tiltag. Ventilation og mekanisk køling er selvfølgelig stærke virkemidler, men også bygningens termiske masse kan hjælpe til at holde en jævn rumtemperatur. Der er således væsentlig forskel på hvilke løsninger, der kan lade sig gøre for eksisterende, ældre skoler i beton og nye skoler i lette materialer. Herunder ses fordelingerne af energiforbruget til ventilation og køling for de simuleringer, der overholder kravet til termisk komfort – for henholdsvis en tung, Figur 8, og let bygning, Figur 9. Der er tydeligvis flere muligheder for den tunge variant, mens det for den lette bygning næsten ikke er muligt at nå i mål uden køling. Endeligt ses en meget stor variation i det årlige energibehov, som spænder fra cirka 21 til 71 kWh/m².



Figur 8 Fordeling af ca. 11.000 simuleringer, der overholder krav til overtemperaturer for **tunge**, eksisterende klasserum.



Figur 9 Fordeling af ca. 5.112 simuleringer, der overholder krav til overtemperaturer for nye klasselokaler i **lette** materialer, heraf kun 27 løsninger uden køling.

I den mere dybdegående beskrivelse i Del 3 kan læseren blandt andet:

- Se eksempler på hvordan passive og aktive tiltag kan kombineres for at sikre termisk komfort under forskellige forudsætninger
- Se hvilke af de 13 designparametre, der har størst betydning for henholdsvis overtemperaturer og energibehov.
- Erfare at løsningerne med mekanisk køling i gennemsnit giver lavere energiforbrug end tilsvarende løsninger uden køling – uanset antallet personer, orientering og termisk masse.

Indeklima og kemi i skoler

Kemikalier i indeklimaet stammer fra byggematerialer, møbler og inventar, det vil sige overflader såsom vægge, lofter, gulve, fuger, maling og ikke mindst de møbler, klasseværelserne indrettes med. Hvorvidt mængden af kemi i luften kan være sundhedsskadelig, kan virke slimhindirriterende eller give anledning til hovedpine afhænger af, hvilke stoffer der er til stede og i hvilke koncentrationer.

Mængden af kemi i luften kan begrænses ved at anvende materialer og produkter, der er forsynet med et mærke, der sikrer lav afgasning i brug. Der er en håndfuld relevante mærker at kigge efter, når produkterne skal vælges bl.a. Indeklimamærket, M1, Emicode, Greenguard eller Eurofins Indoor Air Comfort.

Udover at anvende materialer med lav afgasning, er den mest effektive metode til at begrænse udfordringen med kemi i indeklimaet at sikre tilstrækkelig frisk luft i lokalet.

Nogle kemiske stoffer kan registreres med næsen, men der er behov for at foretage en måling af luftkvaliteten, hvis mængden af kemi i indeklimaet skal dokumenteres. Ved opfyldelse af certificeringsordningen DGNB og den frivillige bæredygtighedsklasse, skal det dokumenteres med måling, at mængden af kemi i luften ikke overstiger fastsatte grænseværdier. Tilsvarende krav gælder for de internationale certificeringsordninger som BREEAM og LEED.

Udover fokus på afgasning fra byggematerialer, møbler og inventar forudsættes det, at der i forbindelse med renovering og nybyggeri tages højde for følgende områder, der kan påvirke indeklimaet eller arbejdsmiljøet i forbindelse med renovering:

- Problematiske stoffer fra f.eks. PCB i bløde fuger eller asbest i byggematerialer
- Skimmelsvamp og fugtudfordringer i konstruktionerne grundet fejl eller svigt i konstruktioner, byggeskader eller vandskader
- Radon der trænger ind i bygningens indeklima fra jorden.

Bygningsreglementet stiller krav til afgivelsen af formaldehyd fra visse produkter og har en vejledende grænseværdi for formaldehyd i indeluften. Derudover er der en grænseværdi for niveauet af Radon i indeklimaet. Men der stilles ikke krav om dokumenterende målinger.

Som nævnt er omdrejningspunktet for branchevejledningen for indeklima i skoler elevernes komfort og præstation. Uønskede kemikalier i indeklimaet har en betydning for brugernes sundhed, og kan også gennem lugtgener og slimhindeirritation påvirke komforten. Der er på nuværende tidspunkt meget begrænset viden om kemiske stoffers påvirkning af skoleelevers præstation. Emnet med kemi i indeklimaet behandles ikke yderligere i nærværende branchevejledning.

Branchevejledningen tager udgangspunkt i en traditionel indretning og brug af klasselokalet, da skolerne skal have et robust indeklimadesign, der også kan opfylde kravene i fremtidens skole med en endnu ukendt undervisningsform

FOTO: COLOURBOX

Del 2. Kravspecifikationer for indeklima i skoler

Krav til indeklima er angivet i nedenstående tabeller for henholdsvis klasselokaler, Tabel 2, og arealer, der benyttes til gruppearbejde, Tabel 3. Kravspecifikationerne kan anvendes i udbudsmateriale ved nybyggeri, større renoveringer eller i dialog med rådgiver og udførende, når enkeltstående tiltag skal udføres.

Krav til indeklima skal overholdes i de relevante arealer og volumener skitseret i afsnit ”Skolens arealer og indeklimakrav” på side 51.

Efter tabellerne er krav, parametre og evalueringsmetoder for de fire indeklimaområder uddybet og forslag til brugsprofiler er opstillet.

Kravspecifikationerne er opgivet i to tabeller, der giver et overblik over krav til indeklimaet for de fire indeklimaområder; termisk, atmosfærisk, visuelt og akustisk indeklima. Inddelingen i de to tabeller angiver krav til indeklimaet i forhold til indeklimaklasse ”Standard” og ”Standard+”.

Standard+: Angiver anbefalinger til krav, hvis bygherre vil understøtte øget indlæring i skolen med et bedre indeklima. I denne klasse er præstationsevnen for eleverne vægtet lidt højere end i indeklimaklasse ”Standard”. F.eks. er temperaturniveauet lavere, da forskning viser, at temperaturen – og specielt de høje temperaturer – har stor indflydelse på indlæringen.

Standard: Angiver krav til indeklimaet, som er en god afvejning mellem indeklima, præstationsevne, energiforbrug og udgifter, men hvor hensynet til indeklimaet er øget i forhold til bygningsreglementet.

Indeklimaklasserne kan kombineres, så der f.eks. stilles krav om dagslys i klasse ”Standard+”, mens de øvrige dele skal leve op til kravene for indeklimaklassen ”Standard”.

Udover de to indeklimaklasser indeholder tabellerne to kolonner, der lister kravene i bygningsreglementet og forslag til minimumsværdier i forbindelse med f.eks. dispensationer.

BR18: Oplister de krav, der er gældende ifølge bygningsreglementet. Værdierne er vist for at kunne sammenligne med kravene i bygningsreglementet. Det anbefales at følge enten indeklimaklasse ”Standard” eller ”Standard+” idet, der er specifikationer til indeklimaet, der ikke er indehold i BR18.

Minimum: I forbindelse med renoveringer kan der være eksisterende geometriske eller konstruktionsmæssige forhold, der gør det yderst vanskeligt, uforholdsmæssigt dyrt eller særdeles uhensigtsmæssigt at overholde samtlige punkter i forhold til kravene specificeret for indeklimaklasse ”Standard” - eksempelvis fordi nye føringsveje ikke kan holdes indenfor den eksisterende bygningsgeometri. Hvis dette er tilfældet, angiver kriterierne i denne kolonne grænsen for hvor lavt ambitionsniveauet

for *enkeltstående* værdier reelt kan sættes. Med enkeltstående menes, at der f.eks. ikke både kan afviges fra krav til temperatur og solafskærmningstid i samme lokale. I felter uden tekst kan kravet ***ikke*** fraviges – og krav under ”Standard” bør følges.

Vær opmærksom på, at nogle af værdierne i kolonnen ”minimum” ikke lever op til bygningsreglementets krav, og det vil derfor være nødvendigt at søge afklaring hos den lokale byggemyndighed. Disse værdier er markeret med *****. Værdierne i denne kolonne er også tænkt som en rettesnor for kommunerne i forhold til en ensretning af, hvortil der kan dispenseres i byggesager og dermed et forsøg på en reel formulering af det minimum, der også i vanskelige situationer kan renoveres til.

Indeklima er oftest associeret med komfort og sundhed, men indeklimaet har også stor indvirkning på, hvor effektivt og kreativt vi arbejder. Udover direkte at forbedre præstationen reducerer et godt indeklima også sygefraværet, ligesom frustrationer og konflikter mindskes.

FOTO: COLOURBOX

Tabel 2 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima i klasselokaler

Klasselokaler

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**	
Atmosfærisk indeklima					
CO_2-koncentration i ppm[3]	≤ 1000	≤ 1000	*≤ 1000*	*≤ 1200**	
Luftmængde i L/s pr person	≥ 9,4	≥ 9,4		*≥ 7,1**	
Akustisk indeklima					
Efterklangstid i sekunder[4]	≤ 0,4	≤ 0,6	*≤ 0,6*		
Støj fra tekniske installationer, L_{Aeq}, i dB	≤ 27	≤ 30	*≤ 30*		
Støj fra vej- og jernbanetrafik, L_{den}, i dB	≤ 30	≤ 33	*≤ 33*		
Trinlyd, $L'_{n,w}$, i dB	≤ 58	≤ 58	*≤ 58*	*≤ 63**	
Luftlydisolation mellem undervisningslokaler (vandret/lodret), R'_w, i dB	≥ 52 / ≥ 51	≥ 48 / ≥ 51	*≥ 48 / ≥ 51*	*≥ 45* / ≥ 51*	
Luftlydisolation mellem undervisningslokaler og fællesarealer m. dørforbindelse, R'_w, i dB	≥ 40	≥ 36	*≥ 36*		
Visuelt indeklima					
Dagslys					
Korrigeret glas/gulv i %[5]	≥ 12	≥ 10	*≥ 10*	*≥ 8**	
eller belysningsstyrke i lux[6]	≥ 300		*≥ 300*		
Farvegengivelse for glas, Ra-værdi	≥ 90	≥ 85			
Udsyn					
Solafskærmningstid i forhold til brugstid i %[7]	≤ 15	≤ 20	*Tilfredsstillende*	*≤ 25*	
Udsynskvalitet	Høj	Middel			
Elektrisk belysning					
Belysningsstyrke i lux	≥ 500	≥ 300[8,9]	*≥ 300*[7,8]		
Farvegengivelse for belysning, Ra-værdi	> 90	≥ 90	*≥ 80*	*≥ 80*	
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*		
Belysningsstyrkens regelmæssighed	0,6 for hele rummet	0,6 for hele rummet	*0,6 for hele rummet*		
Automatisk styring	Dagslys	Dagslys	*Dagslys*		
Manuel overstyring af belysning	Lysstyrke og farvetemperatur[11] + min. tre lysscenarier[12]	Lysstyrke (dæmpning)		*On/off*	

[1] Toleranceoverskridelser tælles for hele året

[2] Trækrisiko vurderes for udvalgte situationer, se side 38

[3] Ved udeniveau på 400 ppm

[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 maksværdi tillægges 20%.

[5] Glas under 55 cm over gulv tælles ikke med.

[6] Ved mindst halvdelen af det relevante gulvareal i mindst halvdelen af dagslystimerne jf BR18

[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.

[8] Cylindrisk lysstyrke min 150

[9] Bør kunne justeres op til 500, hvis lokalet benyttes til aften- eller voksenundervisning

[10] For alle lysniveauer ned til 10%

[11] Variation i farvetemperatur fra 2700 K til 6500 K

[12] Lysscenarier er beskrevet i afsnittet om visuelt indeklima. Styring placeres lettilgængeligt i lokalet

***** Lever ikke op til krav i bygningsreglementet og kræver afklaring hos den lokale byggemyndighed

Tabel 3 Kravspecifikationer til opretholdelse af indeklima på arealer, der benyttes til gruppearbejde mm.

Arealer der benyttes til gruppearbejde m.m.

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	[1]Toleranceoverskridelser tælles for hele året
- vinter (november – marts)	21,0 – 24,5	21,0 – 24,5		21,0 – 25,0	
Relativ luftfugtighed i %	≥ 20	≥ 20			[2]Trækrisiko vurderes for udvalgte situationer, se side 38
Trækrisiko/draught rate i %[2]	≤ 15	≤ 20	≤ 20	≤ 25*	
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*	
Akustisk indeklima					[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 maksværdi tillægges 20%.
Efterklangstid i sekunder[4]	≤ 0,4	≤ 0,6	≤ 0,6		
Støj fra tekniske installationer, L_{Aeq}, i dB	≤ 27	≤ 30	≤ 30		
Støj fra vej- og jernbanetrafik, L_{den}, i dB	≤ 30	≤ 33	≤ 33		
Trinlyd, $L'_{n,w}$, i dB	≤ 58	≤ 58	≤ 58	≤ 63*	
Luftlydisolation mellem undervisnings-lokaler (vandret/lodret), R'_w, i dB	≥ 52 / ≥ 51	≥ 48 / ≥ 51	≥ 48 / ≥ 51	≥ 45* / ≥ 51	
Luftlydisolation mellem undervisnings-lokaler og fællesarealer m. dør-forbindelse, R'_w, i dB	≥ 40	≥ 36	≥ 36		
Visuelt indeklima					
Dagslys					
Korrigeret glas/gulv i %	≥ 12	≥ 10	≥ 10	≥ 8*	
eller belysningsstyrke i lux[5]	≥ 300		≥ 300		
Farvegengivelse for glas, Ra-værdi	≥ 90	≥ 85			[5] Ved mindst halvdelen af det relevante gulvareal i mindst halvdelen af dagslystimerne
Udsyn					
Solafskærmningstid i forhold til brugstid i %[6]	≤ 15	≤ 20	Tilfreds-stillende	≤ 25	[6] 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.
Udsynskvalitet	Middel	Lav			
Elektrisk belysning					
Belysningsstyrke i lux	≥ 500	≥ 300	≥ 300		
Farvegengivelse for belysning, Ra-værdi	> 90	≥ 90	≥ 80	≥ 80	[7] For alle lysniveauer ned til 10%
Blænding fra elektrisk belysning	≤ 19	≤ 19	≤ 19		
Flicker/Flimmer fra elektriske lyskilder i PstLM / SVM[7]	≤ 1,0 / ≤ 1,0	≤ 1,0 / ≤ 1,0	≤ 1,0 / ≤ 1,0		[8] Variation i farvetemperatur fra 2700 K til 6500 K
Belysningsstyrkens regelmæssighed	0,6 på arbejdsfeltet	0,6 på arbejdsfeltet	0,6 på arbejdsfeltet		
Automatisk styring	Dagslys	Dagslys	Dagslys		
Manuel overstyring af belysning	Lysstyrke og farvetemperatur[8]	Lysstyrke (dæmpning)		On/off	

***** Lever ikke op til krav i bygningsreglementet og kræver afklaring hos den lokale byggemyndighed

Termisk indeklima i skoler

Det termiske indeklima evalueres ud fra den operative temperatur, relativ fugtighed og træk, som det fremgår af tabellerne ovenfor.

Ved evaluering af termisk indeklima udvælges et antal rum, for hvilke der gennemføres dynamiske indeklimasimuleringer. Der udvælges rum til simulering, som er repræsentative for bygningen i forhold til dimensionering af systemer. Rummene vælges ud fra, at de enten er kritiske eller typiske rum for bygningen.

De dynamiske indeklimasimuleringer baseres på konstruktionsopbygninger og brugsprofiler for bygningen. Alle disse informationer rapporteres sammen med resultaterne af simuleringerne. I henhold til bygningsreglementet benyttes vejrdata for det danske design-reference-år DRY2013, og der simuleres for kalenderåret 2010.

Disse beregninger danner grundlag for f.eks. dimensioneringen af ventilations- og kølesystemer og / eller valg af vinduesglas. Det vil derfor være de *dimensionerende* forhold, der benyttes i simuleringerne og ikke forhold der svarer til en gennemsnitlig brug.

Operativ temperatur

Temperaturen vurderes i forhold til den operative temperatur. Den operative temperatur er middelværdien af lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen i lokalet, og er meget tæt på den temperatur en person i lokalet vil opleve.

Overholdelse af temperaturkrav baseres på dynamiske simuleringer i f.eks. BSim, IES VE eller lignende, på basis af det danske DRY-år. Simuleringerne udføres på timebasis for alle årets 8760 timer for kalenderåret 2010, og med interne belastninger som opstillet i afsnittet ”Skolens arealer og indeklimakrav” på side 51, medmindre andet specifikt aftales.

Ved evaluering af det termiske indeklima benyttes middeltemperaturen for hver time. I BSim hedder middeltemperaturen ”TopMean”. Der evalueres på middeltemperaturen, da det giver det mest retvisende billede af, temperaturen i lokalet i den pågældende time.

I forhold til de øvre temperaturgrænser accepteres et antal timer med overskridelser på årsbasis, hvilket er nærmere beskrevet i afsnit om toleranceoverskridelser herunder.

Evalueringsperioder for temperaturen

Oplevelsen af det termisk indeklima er i høj grad afhængig af årstiden. 21°C vil f.eks. være behageligt om vinteren, mens det ofte vil opleves koldt om sommeren, hvor beklædningen er mindre.

Derfor er kravspecifikationerne til temperaturer opdelt i perioderne: sommer, vinter og overgang. Overgangsperioden er indsat for at kunne rumme de svingende temperaturer i forår og efterår, hvor der både kan være let frost, men også dage med næsten sommerlige temperaturer.

	Sommer	maj - september
	Overgang	april og oktober
	Vinter	november - marts

De opstillede temperaturintervaller i kravspecifikationerne giver mulighed for at udnytte bygningens termiske masse som buffer. Dermed kan der startes med den laveste temperatur om morgenen.

Netop temperatursvingninger over dagen er dog noget, der har en betydning for komforten. Derfor bør dette være én af de parametre, der ses nærmere på, når resultaterne af simuleringer gennemgås. Specielt i overgangsperioden, hvor der tillades et større temperaturspænd, bør det tjekkes, hvor meget temperaturen svinger/stiger i løbet af en enkelt dag.

Toleranceoverskridelser for temperaturen

Varmesystemet i en bygning dimensioneres til at opretholde de angivne minimumtemperaturer i 98% brugstiden. Ved renovering af ældre bygninger med begrænset isolering kan det betyde, at der er opvarmningsbehov i starten af sommerperioden, hvilket er væsentligt at få med i indeklimasimuleringerne og i overleveringen til driftsfolk.

En overholdelse af den øvre grænse for temperaturen i alle årets timer vil betyde uforholdsmæssigt store anlæg og kanaler, som kun ville køre maksimallast i meget få timer. Dette vurderes at være en uhensigtsmæssig udnyttelse af ressourcer og arealer i en bygning, og derfor tillades overskridelser i et antal timer om året. Overskridelse af den øvre temperaturgrænse opgøres henholdsvis for perioden april til oktober og perioden november til marts. Toleranceoverskridelserne svarer til ca. 5% af brugstiden for hele året.

Tabel 4 Der tillades følgende toleranceoverskridelser i forhold til de opstillede krav til den operative temperatur. Toleranceoverskridelserne er de samme for alle rumtyper og indeklimaklasser.

Toleranceoverskridelser for operativ temperatur	
Sommer og overgangsperiode (april – oktober)	
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks 100 timer
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks 25 timer
Vinterperiode (november – marts)	
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks 50 timer
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks 10 timer

Det er god praksis at regne med samme brugstid og belastning hele året, også i sommermånederne. Det er netop for at håndtere de varme perioder, at der tillades overskridelser af den øvre temperaturgrænse. Samtidig kan bygningens brug ændres over tid, og derfor er det vigtigt, at bygningen er robust i forhold til at kunne klare sig i en sommersituation f.eks. som skolefritidsordning.

Såfremt det vælges ikke at medtage dele af sommerperioden i brugstiden, skal toleranceoverskridelsen for sommer- og overgangsperioden nedsættes med henholdsvis 8 timer og 3 time pr uge der tages ud – se Tabel 5. De varmeste timer på året ligger i sommerferien, og derfor vil der blive uforholdsmæssigt varmt på andre tidspunkter, hvis den samlede toleranceoverskridelse ikke justeres.

Tabel 5 Såfremt det vælges ikke at medtage alle sommerferieuger i brugstiden nedsættes antallet af timer med toleranceoverskridelser for sommer- og overgangsperioden med hhv. 8 og 3 timer. Tabellen viser det tilladte antal timer med toleranceoverskridelser for hhv. 2, 4 og 6 uger taget ud. Toleranceoverskridelserne er de samme for begge lokaletyper.

Toleranceoverskridelser for operativ temperatur, maks antal timer			
Antal uger der ikke medregnes grundet sommerferie	**2 uger**	**4 uger**	**6 uger**
Sommer og overgangsperiode (april – oktober)			
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	84	68	52
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	19	13	7
Vinterperiode (november – marts)			
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	50	50	50
- timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	10	10	10

Det er væsentligt, at konsekvenser ved at fraregne uger i sommerferien tydeliggøres overfor bygherre, da det har betydning for, hvordan bygningen vil kunne benyttes i praksis. Er sommerferien ikke indregnet ved dimensionering, vil rummene med en vis sandsynlighed blive for varme i sommerferieperioden, da f.eks. den maksimale køleydelse vil være mindre.

Resultaterne af en beregning uden brugstid i sommerferien bør altid præsenteres sammen med beregninger, hvor hele sommeren er medtaget i brugstiden, for at synliggøre betydningen.

Relativ luftfugtighed

Den angivne minimumsluftfugtighed skal overholdes 98% af brugstiden.

Træk

Oplevelsen af træk er afhængig af luftens hastighed, temperatur og turbulensintensitet. Sammenhængen er nærmere beskrevet i bl.a. DS1752.

Risiko for træk fra en ventilationsløsning afhænger af en række faktorer herunder rummets geometri, indblæsningsarmaturernes placering og fordeling, luftmængder og indblæsningstemperatur. For de specifikke indblæsningsarmaturer bør producenterne kunne oplyse hvilke strømningsmønstre, der er for armaturerne ved forskellige forhold. Dette vil i de fleste tilfælde være tilstrækkeligt til at kunne bestemme lufthastigheder og lufttemperaturen i opholdszonen og dermed trækrisikoen.

Trækrisikoen skal overholdes i alle sædvanlige driftssituationer. Ved ventilationsløsninger reguleret efter VAV princippet, er de sædvanligvis dimensionerende driftssituationer hvor trækrisikoen som minimum bør evalueres følgende:

- Sommer:
    - højeste ønskede rumtemperatur
    - minimum indblæsningstemperatur
    - maksimal luftmængde
- Sommer:
    - middel af øvre og nedre grænse for rumtemperatur
    - minimum indblæsningstemperatur
    - minimum luftmængde (f.eks. 20 % af maksimal luftmængde)
- Vinter:
    - middel af øvre og nedre grænse for rumtemperatur
    - minimum indblæsningstemperatur
    - maksimal luftmængde

Beregning af trækrisiko kan ikke foretages med bygningssimulerings-programmer som BSim. I stedet bestemmes lufthastigheder ud fra kastelængder og øvrige data fra leverandøren for det konkrete armatur og med den konkrete placering i rummet.
Sammenhængen mellem temperatur, lufthastigheder og træk er angivet i appendix A trækrisiko.

Atmosfærisk indeklima i skoler

Krav til CO_2-koncentrationen skal overholdes i hele brugstiden ved dimensionerende forhold. For et klasselokale beregnet til 28 elever, er dimensionerende forhold 28 elever og to lærere, dvs. 30 personer for en almindelig skoledag. Forslag til brugsprofiler er opstillet i afsnittet ”Samtidighed og brugsprofiler” på side 54.

For brug, der ligger udenfor dimensionerende forhold, tillades overskridelser.

> ***Eksempel - Overskridelser***
>
> *I et klasselokale skal det sikres, at CO_2-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.*

De opstillede grænser for CO_2-koncentrationer er med udgangspunkt i en CO_2-koncentration i udeluften på 400 ppm.

De nødvendige luftmængder i forhold til CO_2-koncentration er beregnet i Tabel 6. Der er anvendt en CO_2-afgivelse på 20,4 L/h pr. person svarende til stillesiddende aktivitet (1,2 met) for en voksen person eller stående aktivitet (2,0 met) for et barn. Dette vurderes at være konservativt, men retvisende for langt de fleste klasselokaler, idet de store elever fysisk svarer til voksne personer, og eleverne i de små klasser til gengæld sidder mindre stille.

Tabel 6 Nødvendige luftmængder for at holde ønskede CO_2-koncentrationer ved udekoncentration på 400 ppm

Sammenhæng mellem CO_2-koncentration og ventilationsluftmængder			
CO_2-koncentration	L/s per person	ved 28 elever og 2 lærere m^3/h	ved 10 personer 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

Ud over CO_2-koncentrationen skal der ved renoveringer undersøges om der er skadelige stoffer i indeluften og i omgivende materialer. I forbindelse med renovering, skal der derfor undersøges for f.eks. PCB, asbest, tungmetaller, klorerede paraffiner og radon.

Akustisk indeklima i skoler

Både i forbindelse med nybyggeri og renovering af skoler, bør der gennemføres en egentligt akustisk projektering. Nærværende branchevejledning beskriver anbefalinger til kravspecifikationer for det akustiske indeklima i undervisningslokaler og arealer der benyttes til gruppearbejde. Det skal understreges at Bygningsreglementets krav til akustiske forhold skal overholdes.

Følgende anvisninger til brug ved akustisk projektering af skoler, er en samling af viden fra blandt andet Bygningsreglementet 2018 og SBi-anvisning 218 Lydforhold i undervisnings- og daginstitutionsbygninger. For mere detaljerede beskrivelser og kravspecifikationer ud over denne vejledning, henvises til førnævnte publikationer.

Efterklangstid

Efterklangstid, der fortæller noget om, hvor hurtigt en given støj uddør i et lokale, er en væsentlig parameter for det akustiske indeklima. Design af dæmpningen kan være en udfordring i lokaler, hvor der er flere behov. I klasselokaler er det vigtigt at kunne tale lokalet op, men hvis det dæmpes for meget, kan der opstå problemer med taleforståelsen. I SFO-lokaler, hvor der ikke er undervisning, bør der være større grad af dæmpning end i klasselokaler. For at opnå god taleforståelighed, kan der med fordel suppleres med en lærermikrofon, som kan forstærke lærerens formidlingskraft.

I størstedelen af lokalerne på skoler anvendes krav til efterklangstid, til at sikre optimale rumakustiske forhold, mens der for større lokaler kan anvendes krav til absorptionsareal. Hertil findes en række tiltag, som skal underbygge forholdene og sikre gode læringsvilkår og arbejdsmiljø for elever og lærere.

Efterklangstider og absorptionsarealer i denne vejledning er angivet som henholdsvis maksimums- og minimumsværdier, gældende for alle 1/1-

oktavbånd i det aktuelle frekvensområde og ikke som en gennemsnitsværdi for et større frekvensområde. De angivne værdier kan dog henholdsvis tillægges eller fratrækkes 20 % ved 125 Hz. Endvidere bør en overskridelse i de enkelte 1/1-oktavbånd på 20 % af de angivne maksimalværdier for efterklangstider accepteres ved bedømmelse af kontrolmålinger. Dette skal ses som en accept i nogle få 1/1-oktavbånd, men må ikke udnyttes i designfasen.

De angivne grænseværdier for efterklangstider og absorptionsarealer bør opfyldes ved brug af akustiklofter i kombination med lydabsorberende vægbeklædninger. Det anbefales at mindst 10-15 % af det samlede absorptionsareal placeres på vægge eller andre lodrette flader, for at sikre den rette fordeling af absorptionen i lokalet. For at opnå en jævn fordeling inden for det aktuelle frekvensområde, kan det være nødvendigt at anvende flere forskellige typer af lydabsorbenter.

Støjniveau

Baggrundsstøj har stor betydning for det akustiske indeklima i undervisningslokaler i skoler. Der er derfor opstillet krav til støj fra tekniske installationer og fra trafik. Dette har betydning for lyddæmpere i ventilationsanlæg, samt lydisolerende vinduer og døre i facaden. De angivne værdier er gældende for møblerede lokaler uden brugere.

Grænseværdien for støj indendørs fra tekniske installationer, L_{Aeq} gælder for de enkelte installationer hver for sig. Grænseværdien for trafikstøj indendørs er relevant for skoler der er placeret tæt ved veje og jernbaner, hvor der uden for den enkelte bygning er et støjniveau på mere end 58 dB for veje og 64 dB for jernbaner. Grænseværdien for trafikstøj indendørs, L_{den} gælder for veje og jernbaner separat.

L_{den} dækker i sin helhed over støjgener i løbet af dagen, aftenen og natten (”den” = day-evening-night). Der kan i nogle tilfælde forekomme støjgener som overskrider grænseværdier i aften og nattetimer. I disse tilfælde bør der ikke ændres på beregningsmetoden af L_{den}. Der kan dog potentielt opnås dispensation for støj om natten i skoler.

Trinlyd

En bygnings evne til at transmittere trinlyd, omfatter grundlæggende evnen til at dæmpe fodtrin igennem bygningsdelene. Der sættes krav til trinlyden $L'_{n,w}$ som medfører en tilstrækkelig etagedæksopbygning, samt den dertilhørende gulvopbygning til at dæmpe trinlyden.

Luftlydisolation

Spredningen af støj fra et rum til et andet, kan i de fleste tilfælde undgås. Det kræver dog en tilstrækkelig konstruktionsopbygning af de adskillende vægge og døre, samt hensyntagen til andre mulige støjtransmitterende veje, som eksempelvis gennem ventilationskanaler.

Der sættes i nærværende branchevejledning krav til luftlydisolationen R'_w som medfører et funktionskrav til både vægge og døre. Disse funktionskrav indbefatter blandt andet tykkelse og tyngde af vægge, samt tætning af spalter og sprækker ved døråbninger og andre transmissionsveje for støjen.

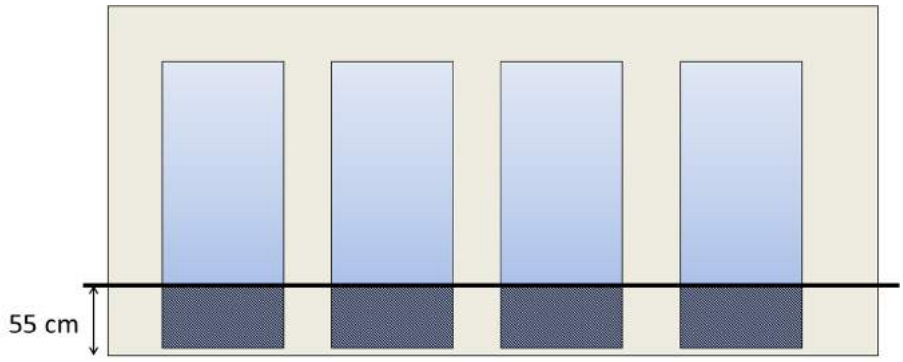
Visuelt indeklima i skoler

Det visuelle indeklima er opdelt i dagslys, udsyn og elektrisk belysning, som alle tre har stor betydning for både velvære og evne til koncentration.

Dagslys i klasselokaler og øvrige arealer

Dagslysmængden kan opgøres på forskellige måder iht. bygningsreglementet. Da klasselokaler oftest har en simpel geometri, er det oplagt at benytte, det korrigerede glasareal i forhold til gulvarealet. Metoden er nærmere beskrevet i ”Bygningsreglementets vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen” (Trafik- Bygge- og Boligstyrelsen, 2019).

Metoden er baseret på, at vinduerne er placeret hensigtsmæssigt, og vil i så fald være tilstrækkeligt til at bestemme om dagslysforhold i et klasselokale er tilfredsstillende. For et klasselokale er det dagslysniveauet på elevernes borde, der er vigtigt, og glasareal under bordhøjde bidrager kun minimalt til dagslyset på bordet. For klasselokaler bør der derfor alene medregnes glas over 55 cm fra gulv, da glas under bordfladen kun i meget begrænset omfang bidrager til dagslyset på bordet.



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.

For yderligere sikring af gode dagslysforhold kan det vælges, at dagslysmængden skal være min 300 lux i 50% af det relevante areal i halvdelen af dagslystimerne, som angivet for ”Standard+”. Denne metode giver et mere nuanceret billede af dagslysfordelingen i rummet og hvordan vinduernes placering kan optimeres i forhold til at skabe gode dagslysforhold for alle i rummet.

For arealer, der benyttes til gruppearbejde m.m., kan glas under bordniveau medregnes, da lys på gulv og udsyn helt til gulv har en større værdi i disse arealer. I tilfælde af arealer med mere kompleks geometri eller hvor der er mere end 6-8 m fra facade til arbejdsarealer, vil 300 lux metoden være bedst til at sikre tilstrækkeligt dagslys på arbejdsbordene.

Hvis det er muligt at placere vinduer i flere flader, f.eks. to forskellige ydervægge eller i ydervægge og i loft, vil det skabe bedre dagslysforhold i lokalet og bidrage til oplevelsen af et mere lyst rum. Dette bør gøres, hvor det er muligt, både i klasselokaler og øvrige arealer.

For et klasselokale er det dagslysniveauet på elevernes borde, der er vigtigt, og glasareal under bordhøjde bidrager kun minimalt til dagslyset på bordet

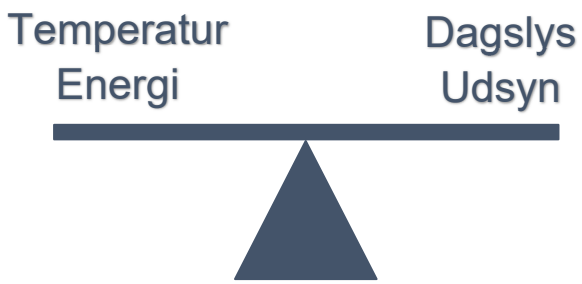
FOTO: COLOURBOX

Udsyn

Udsyn til det fri og visuel forbindelse til de omkringliggende omgivelser giver både indikation om de lokale aktiviteter, vejrforandringer og tidspunktet af døgnet. Derudover er der sammenhæng mellem vores fysiske helbred og den psykiske påvirkning fra udsynskvaliteten, som gerne skal repræsentere naturelementer og udsynslag.

Solafskærmning

Udsynet er den primære funktion for et vindue, men da store vinduesarealer samtidig i høj grad kan medvirke til overophedning om sommeren og kuldestråling om vinteren, bliver vinduesstørrelser et kompromis mellem udsyn og dagslys på den ene side og temperatur, træk og energiforbrug på den anden side.



Figur 11 Hensyn til dagslys og udsyn skal balanceres med hensynet til temperaturforhold og energiforbrug i skolerne

Ved at benytte en variabel solafskærmning kan påvirkningen af energiforbrug og temperaturer i lokalet mindskes, samtidig med at dagslys og udsyn alene påvirkes i den periode, hvor afskærmningen er i brug og brugerne kan nyde godt af dagslyset og udsynet, når der ikke er behov for afskærmning.

For at tilgodese både ønskerne til temperatur, energiforbrug, dagslys og udsyn er der i kravspecifikationerne opstillet krav til hvor meget solafskærmningen, må benyttes for vinduerne i udsynsfeltet i den del af brugstiden, der ligger mellem kl. 7 og kl. 18.

> ***Eksempel - Solafskærmning og brugstid***
>
> *En skole benyttes mandag til fredag fra kl. 8 til kl. 15. Det vælges at se bort fra de seks uger med sommerferie.*
> *Dette giver en samlet brugstid på 1617 timer, der alle ligger mellem kl. 7 og kl. 18.*
>
> *For at opfylde krav til indeklimaklasse "Standard", må solafskærmningen maksimalt være i brug i 20% af de 1617 timer = 323 timer.*
>
> *For at opfylde krav til indeklimaklasse "Standard+", må solafskærmningen maksimalt være i brug i 15% af de 1617 timer = 242 timer.*

Solafskærmning kommer i mange forskellige typer. På den ene side er der solafskærmninger, der giver mulighed for udsyn, også når afskærmningen er aktiveret, mens andre blokerer udsynet helt. På den anden side er der faste afskærmninger, der ikke kan køres fra, og som dermed delvist blokerer udsynet, også når der ikke er behov for solafskærmning.

For afskærmninger, der kun medfører delvist blokeret udsyn, benyttes en vægtningsfaktor, så timerne vægtes lavere, end ved helt blokeret udsyn. Til denne vægtning benyttes udsynsklasserne beskrevet i SBi-anvisning 264 "Solafskærmninger" (Johnsen, 2016) som er baseret på DS/EN 14 501 (Dansk Standard, 2005).

Er afskærmningen i en time kun trukket halvt for, vægter timen halvt. For f.eks. en justerbar persienne vil udsynsklassen afhænge af vinklen og vil derfor kunne variere fra time til time.

Tabel 7 Sammenhæng mellem udsynsklasse i henhold til SBi-anvisning 264 "Solafskærmninger" og DS/EN 14501 og vægtning af en afskærmningstime. Eksempler på afskærmning i de fem klasser kan ses i Appendiks A – Udsynsklasser.

	Udsynsklasse for solafskærmning	**Vægtningsfaktor af en afskærmningstime**
Afskærmning med blokeret udsyn	0	1,00
	1	0,95
	2	0,80
	3	0,60
Afskærmning med bedst udsyn	4	0,15

Vægtningsfaktoren ganges på antallet af timer med solafskærmning. Dermed vil der tillades flere timer med solafskærmning, hvis afskærmningen ligger i klasse 4, hvor der stadig kan ses ud, i forhold til hvis den ligger i klasse 0, hvor udsynet er helt blokeret.

Valg af solafskærmning skal altid ske ud fra en subjektiv vurdering af den helt konkrete afskærmning, da der er store variationer i udsynet inden for den enkelte udsynsklasse.

Eksempel - Mørk screen med åbningsfaktor over 5%

I en skole, der benyttes mandag til fredag fra kl. 8 til kl. 15 og hvor der ikke ses på de seks af sommerferieugerne, installeres en screen, der ligger i udsynsklasse 3. Screen'en er i brug 505 timer af brugstiden i løbet af året.

Den samlede brugstid er 1617 timer. For en screen i udsynsklasse 3 må antallet af afskærmningstimer ganges med 0,60.

Vægtet antal solafskærmningstimer: 505 timer · 0,60 = 303 timer

Procent af brugstid med solafskærmning: 303 timer / 1617 timer = 19%.

Dermed overholdes kravet på 20% for indeklimaklasse "Standard", men ikke kravet på 15% for" Standard+".

Eksempel - Fastmonterede lameller

I en skole monteres faste, vandrette lameller med en afstand, der giver udsyn i klasse 4. Lamellerne er faste og dermed i brug hele brugstiden.

Den samlede brugstid er 1617 timer. For lameller i udsynsklasse 4 må antallet af afskærmningstimer ganges med 0,15.

Vægtede solafskærmningstimer: 1617 timer · 0,15 = 243 timer

Procent af brugstid med solafskærmning: 243 / 1617 = 15%

Dermed overholdes kravet for indeklimaklasse både "Standard" og "Standard+".

Såfremt der benyttes to afskærmninger uden på hinanden, er det den højeste af de to vægtninger, der benyttes i den givne time.

Eksempel - Klasselokale med solafskærmende glas og screen

I et klasselokale med brugstid mandag til fredag kl. 8 til kl. 15, monteres vinduer med solafskærmende glas i udsynsklasse 4 samt en screen i udsynsklasse 2. Screen'en er i brug 125 timer om året i brugstiden.

Brugstiden er 1617 timer.

Vægtet antal solafskærmningstimer for screen: 125 timer · 0,80 = 100 timer
Vægtet antal solafskærmningstimer for glas: (1617 timer - 125 timer) · 0,15 = 224 timer
Total antal solafskærmningstimer: 100 timer + 224 timer = 324 timer

Procent af brugstid med solafskærmning: 324 timer / 1617 timer = 20%.

Dermed overholdes kravet for indeklimaklasse Standard lige netop.

De 125 timer optælles alene for selve brugstiden. Solafskærmningen kan med fordel styres, så den er aktiveret en stor del af tiden udenfor brugstid, hvor den sikrer, at eleverne møder ind til et behageligt indeklima mandag morgen også efter en solrig weekend.

En indvendig manuel styret afskærmning, der alene benyttes mod blænding, medregnes ikke ved evaluering af antal timer med solafskærmning, ligesom den heller ikke indgår i simuleringerne af det termiske indeklima.

Det anbefales, som udgangspunkt altid at benytte automatisk styring af solafskærmningen, der sikrer, at afskærmningen også betjenes, når der ikke er brugere i bygningen. Det kan f.eks. være i de tidlige morgentimer i et østvendt kontor, hvor der kan være kølebehov allerede inden, brugerne er mødt ind.

For at optimere både udsynet og effekten af solafskærmning bør facader opdeles i mindre dele med egen sensor, så der tages hensyn til skygger fra f.eks. nabobygninger. Alternativt kan der benyttes et pyranometer (måler kortbølget globalstråling) sammen med en computermodel for, hvornår der er direkte sol på de enkelte grupper af vinduer.

Hvis de reelle udsynsklasser ikke er kendte for den konkrete solafskærmning, kan Tabel 24 i "Appendiks B - Udsynsklasser" benyttes til at vurdere udsynsklassen.

Udsynskvalitet

Udsyn til omgivelserne er vigtigt for oplevelsen af et rum og bidrager med en fornemmelse af både tid og sted. Det er et lovmæssigt krav at kunne se ud fra arbejdsrum i Danmark, men det betyder også meget, hvad det er vi ser ud på.

Kvaliteten af udsyn afhænger af en række parametre som så vidt muligt helst skal understøttes samtidig. Disse parametre kan blandt andet være selve rummets geometri og vinduernes placering, som har stor betydning for hvilke steder i rummet, der kan forventes en tilstrækkelig udsynskvalitet fra.

Det kan også være det anvendte glasmateriale som skal understøtte at udsynet opfattes klart, uforvrænget og med neutrale farver. Variationen og sammensætningen i objekter, og ikke mindst den æstetiske værdi af de objekter der er udsyn til, har ligeledes stor betydning for udsynskvaliteten. Derudover har både sigtelinjer og afstand betydning, samt kombinationen af at have udsyn til terræn, landskab og himmel.

Udsynskvaliteten evalueres jævnfør DS/EN 17037:2018 (Danish Standards Association, 2018), hvor der med simple retningslinjer vurderes på udsyn fra et bestemt referencepunkt i lokalerne.

Selve udsynet deles op i tre forskellige lag:

- et himmellag
- et landsskabslag (kan bestå af bygninger, natur og/eller horisonten alene)
- et terrænlag (kan give informationer om aktiviteter)

Udsyn til det fri bør evalueres fra udvalgte referencepunkter, der tilsvarer opholdspositioner i det anvendte areal. Selve udsynskvaliteten fra et specifikt referencepunkt afhænger af følgende:

- størrelsen af dagslysåbning(er)
- udsynsbredden (vandret synsvinkel)
- udvendig udsynsafstand
- antallet af lag
- kvaliteten af udsynets omgivelsesinformationer

For at sikre tilstrækkeligt udsyn bør nedenstående udsynskriterier være opfyldt i det anvendte areal:

- udsynsåbningens glasmateriale bør give et udsyn, der opfattes som klart, uforvrænget og med neutral farve
- i det anvendte areal bør udsynsåbning(er) set fra udsynets referencepunkt have en samlet vandret synsvinkel, der er større end minimumsværdien
- den udvendige udsynsafstand bør være større end minimumsværdien
- i det anvendte areal bør det være muligt at se et mindste antal lag

Anbefalede værdier for udsyn er angivet i Tabel 8, på næste side.

Tabel 8 Vurdering af udsyn fra et bestemt referencepunkt i hht. DS/EN 17037:2018 (Danish Standards Association, 2018)

Anbefalingsniveau for udsyn	**Vandret synsvinkel**	**Udvendig udsynsafstand**	**Antal lag, der skal kunne ses fra mindst 75% af det anvendte areal:** **- himmel** **- landskab (by og/eller natur)** **- terræn**
Minimum	≥ 14°	≥ 6,0 m	Landskabslaget er som minimum omfattet
Middel	≥ 28°	≥ 20,0 m	Landskabslag og et yderligere lag er omfattet i den samme udsynsåbning
Højt	≥ 54°	≥ 50,0 m	Alle lag er omfattet i samme udsynsåbning
For et rum med en rumdybde på mere end 4 meter, anbefales det, at den respektive sum af udsynsåbningernes mål er mindst 1,0 meter x 1,25 meter (bredde x højde)			

For at udsynskvaliteten eksempelvis kan vurderes som værende ”Middel” og leve op til ”Standard”-klassen, skal der være ≥ 28° vandret synsvinkel, en udvendig udsynsafstand ≥ 20,0 m og mindst ét yderligere udsynslag i samme udsynsåbning udover landskabslaget.

I forbindelse med verifikation af udsyn, henvises der til DS/EN 17037:2018 Anneks C, hvor der beskrives en forenklet metode som typisk vil kunne anvendes for undervisningslokaler. Derudover beskrives en avanceret verifikationsmetode til komplekse udformninger af dagslysåbninger og/eller i tilfælde af flere åbninger.

Elektrisk belysning

Lyskvalitet og synsforhold har stor betydning for børns trivsel, sundhed, udvikling og læring, hvilket i høj grad stiller krav til den elektriske belysning i lokalerne i samspil med dagslyset.

I vores nordlige klima giver store variationer i dagslyset samt behovet for at skærme af for direkte sollys, ofte ikke tilstrækkeligt lys, hvorfor udformningen af den elektriske belysning er vigtig.

Nye undervisningsformer og kontinuerligt skiftende behov i nutidens skoler fordrer endvidere, at den elektriske belysning i lokalerne udformes til at være fleksibel. Belysningen skal være dynamisk og flerfunktionel for at imødekomme de mange forskellige undervisningssituationer. Elektrisk belysning kan integreres i undervisningen, skabe den rette stemning og understøtte hvor eleverne skal rette deres opmærksomhed, ved eksempelvis zoneinddelt eller punktbelysning, såsom pendelbelysning.

Den elektriske belysning skal udføres i henhold til gældende regler i DS/EN 12464-1 Lys og belysning – Belysning ved arbejdspladser – Del 1: Indendørs arbejdspladser samt DS/EN 12464-1 DK NA:2015.

Belysningsstyrke

Kravene til belysningsstyrke er middelbelysningsstyrken på arbejdsfeltet, som oftest vil være i bordhøjde. Derudover er der krav til den cylindriske belysningsstyrke.

Store rumlige variationer i belysningsstyrker omkring arbejdsfeltet skal undgås, da det kan føre til visuel stress, hovedpine samt ubehag. Dette omfatter belysningsstyrker på det omgivende felt, svarende til et bånd på mindst 0,5 m omkring arbejdsfeltet inden for synsfeltet, samt baggrundsområdet, der bør være mindst 3 m bredt stødende op til det omgivende felt, inden for rummets afgræsning. Omvendt kan rummet synes monotont, formløst og kedeligt, hvis der kun er få eller små variationer og lysforskelle.

Den elektriske belysning skal dimensioneres efter at kunne imødekomme disse krav til belysningstyrker, til brug primært i undervisningssituationer hvor alle elever forventes at have samme aktivitet. Dette kunne være i form af tavleundervisning eller koncentreret arbejde ved pladserne. I andre situationer, kan der dog være en fordel i at rummet er uregelmæssigt belyst for at opnå visse stemninger. Dette kunne være ved aktiviteter, der kræver fordybelse såsom gruppearbejde eller individuelt arbejde. Her kan fokuseret lys, eksempelvis pendelbelysning, fungere som hjælpemiddel til at skabe en rolig og fokuseret stemning på mindre områder i lokalet, i mindre perioder ad gangen. Ligeledes kan der ved visse former for tavleundervisning eller elev-/lærerpræsentationer, benyttes forskellige belysningsstyrker til at skabe fokus på den der underviser/præsentere og mere ro blandt lytterne/tilskuerne.

Regelmæssighed

Indretningen i klasselokaler er typisk ikke kendt eller der er ønsket fleksibel indretning, hvorfor hele lokalet i disse tilfælde skal betragtes som arbejdsfelt. Belysningsstyrken på det omgivende felt skal være min 200 lux ved 300 lux i arbejdsfeltet og minimum 300 lux ved 500 lux i arbejdsfeltet.

I arealer der benyttes til gruppearbejde defineres arbejdsfeltet i hht. indretningsplaner, hvor det skal sikres, at der er tilstrækkeligt antal pladser i forhold til den forventede undervisning.

Ud over krav til regelmæssighed i arbejdsfeltet skal der i det omgivne felt være en regelmæssighed på 0,4 og i baggrundsområdet 0,1.

Farvegengivelse

Den elektriske belysning skal sikre at farver i omgivelser, på genstande og på den menneskelige hud gengives naturligt og præcist, af hensyn til synspræstation, komfort og trivsel. Farvegengivelsesindekset R_a, som er en objektiv indikation af en lyskildes farvegengivende egenskaber, anvendes til at sikre dette.

I visse rum vil kvaliteten af farvegengivelsen være vigtigere for selve undervisningen, såsom i billedkunstlokaler. Her kan en endnu højere værdi end de listede i kravspecifikationstabellerne, del 2 anvendes.

Farvetemperatur

En lyskildes lysfarve udtrykkes ved dens korrelerede farvetemperatur. Lyskilder med lavere farvetemperaturer giver et mere varmt lys, mens højere farvetemperatur giver et koldere lys. Dagslysets lysfarve varierer i løbet af dagen og mennesket er fysiologisk afhængigt af denne dynamik. Lysets intensitet og farve påvirker receptorer i hjernen til at producere hormoner, som påvirker humøret, holder os vågne eller gør os søvnige.

Farvetemperaturen kan således anvendes til at skabe tilsigtede stemninger i forskellige rum, men skal som udgangspunkt i undervisningslokalerne dimensioneres så rummet føles naturligt og behageligt at være i. For på trods af at det kolde lys, som efterligner den blå himmel, teknisk set holder eleverne vågne, så opfattes det ofte som koldt og sterilt. Omvendt vil det varmere lys blive opfattet som hyggeligere, men det er dog uegnet til at arbejde fokuseret i.

En kombination af koldt og varmt lys kan også anvendes i samme lokale. Ved at rumbelysningen gøres koldere, således at den efterligner himlen, mens den fokuserede belysning gøres varmere, således at den efterligner solen, har et studie vist at brugerne oplevede større fokus, mindre træthed og mere energi.

Blænding

Ubehagsblænding forårsaget af elektrisk belysning skal undgås, hvilket opnås ved at UGR-værdierne i kravspecifikationstabellerne, del 2 overholdes. UGR-værdien fra den kunstige belysning skal overholdes i alle retninger på armaturet, for at sikre fuld fleksibilitet i forhold til indretningen af brugen af lokalet.

Stigende brug af skærme (bærbære, smartboards og tablets) stiller dog særligt krav til belysningen for at undgå synsnedsættende blænding, samt trættende og generende reflekser.

Den elektriske belysning skal udformes, således at refleksblænding, som forårsages af refleksioner fra blanke flader, såsom computerskærme og tablets, mindskes mest muligt. Dette kan blandt andet opnås ved diffuserende microprismatisk afskærmning af loftbelysningen eller anvendelse af nedhængte armaturer med både direkte og indirekte luminansudstråling.

Flicker/Flimmer

Flicker eller flimmer fra elektrisk belysning opstår når der forekommer hurtige svingninger i lysmængden. Flicker er distraherende og kan fremkalde fysiologiske reaktioner såsom stress hovedpine, træthed, sløret syn samt smerter i og omkring øjnene.

Styring

Den elektriske belysning skal styres automatisk efter mængden af dagslys for at sikre energieffektivitet. Styringen af belysningen skal opdeles i zoner, da dagslyset aftager ind gennem bygningen. Ligeledes kan styringen af belysningen foretages efter tilstedeværelse, for at sikre energieffektiviteten.

For at overholde klassen ”Standard” skal der være mulighed for overstyring af belysning med dæmpning af lysniveauet. På denne måde kan lysniveauet justeres afhængig af aktivitet og anvendes til at ændre stemningen.

Opdeling af belysning, så lys nær smartboard kan slukkes for sig og stadig have lys på læreren

For at overholde klassen ”Standard+” skal der være mulighed for at styre minimum 3 forskellige indstillinger for belysningen. De tre forskellige indstillinger kunne eksempelvis være følgende

- Præsentation ved tavlen (lys ved tavlen på person(er) der præsentere og evt. let dæmpet i lokalet)
- Individuelt arbejde på pladserne (jævn rumbelysning og maksimal belysningsstyrke på bordene)
- Gruppearbejde (varmt og opdelt i fokuseret lys for at skabe opdeling)

Det er særligt vigtigt at betjeningen af lyset er let tilgængeligt for læreren, hvis lyset skal integreres i undervisningen og understøtte hvor eleverne skal rette deres opmærksomhed.

Skolens arealer og indeklimakrav

En skole består af mange forskellige typer af opholdsarealer, hvor der er forskellige forventninger og krav til indeklimaet.

I denne branchevejledning er det primære fokus på de arealer, hvor eleverne opholder sig mest i forbindelse med undervisning, og hvor indeklimaet derfor har størst indvirkning på deres skoledag.

Kravspecifikationerne angiver krav for følgende opholdsarealer:

- Klasselokaler, herunder lokaler til specialundervisning
- Arealer og lokaler, der benyttes i undervisningen til f.eks. gruppe- og projektarbejde

I klasselokaler er der behov for, at indeklimaet understøtter en høj indlæring hos eleverne hele året. Eleverne er i en stor del af tiden ”låst” til deres plads. Dermed vil en elev, der sidder i træk fra et åbent vindue, ikke kunne rykke sig et andet sted hen, mens der er undervisning. Støj udefra vil ligeledes påvirke indlæringsmiljøet. Derfor skal det nøje overvejes under hvilke forhold manuel åbning af vinduer indgår i indeklimastrategien – hvis det overhovedet skal indgå for klasselokaler.

En stor del af undervisningen og specielt opgaveløsning foregår ved gruppearbejde, hvorfor der på en del skoler er etableret grupperum. Der er dog sjældent grupperum til alle og derfor benyttes en del af skolernes gang- og fællesarealer i forbindelse med gruppearbejde. Da børnene forventes at arbejde koncentreret i disse områder, bør indeklimaet understøtte dette. Det betyder dog ikke, at indeklimaet nødvendigvis skal være lige så godt som i klasselokalerne, da der er en højere grad af frihed for eleverne i forbindelse med gruppearbejde. Eleverne er som regel frie til at vælge mellem et antal forskellige steder at sætte sig, eller de kan rykke sig et par meter, hvis det passer bedre.

Der kan desuden være arealer som kun egner sig til gruppearbejde i nogle perioder på året. Derfor er kravene til disse arealer lidt lavere end krav til klasselokaler. Det vigtigste er, at skolerne og de bygningsansvarlige erkender, at arealerne faktisk benyttes i undervisningen, og at indeklimaet derfor har betydning for elevernes læring.

I forbindelse med renovering eller nybyg af en skole er der behov for, at der tages stilling til hvilke arealer, der vil blive benyttet til gruppearbejde og at indretningsplaner afspejler denne brug. Områder der typisk vil blive benyttet i forbindelse med gruppearbejde, er bl.a.:

- Bredde gangarealer
- Nicher
- Aulaer og lignende

Grundlæggende vil alle de steder, hvor der kan stå et lille bord og nogle stole, ofte blive brugt til gruppearbejde. I forhold til at etablere et godt indeklima, skal der skabes et overblik over, hvilke arealer der faktisk bliver eller kan blive benyttet til gruppearealer.

Skoler består af mange andre arealer, som ikke specifikt behandles i denne branchevejledning. For en del faglokaler vil krav til klasselokaler kunne benyttes, men der kan være specifikke regler og krav til f.eks. musiklokaler, gymnastiksale eller fysiklokaler, som ikke er dækket af nærværende vejledning. I faglokaler der afviger fra typiske undervisningsrum, bør der søges rådgivning hos fagpersoner, som kan bidrage med specialistviden. Der kan eksempelvis være nogle specielle krav til luftkvalitet i fysik-/kemilokaler med stinkskabe. Det kan også være musiklokaler, hvor der kræves et skærpet fokus på rummets akustiske egenskaber.

For kontorer, forberedelsesrum og mødelokaler henvises der til ”Branchevejledning for Indeklimaberegninger”.

Ved opstilling af kravspecifikationer til indeklimaet, er der lagt vægt på hvordan lokalerne benyttes i forhold til følgende:

- Krav til koncentration og fokus
- Graden af frihed for brugerne (kan/må man gå et andet sted hen?)
- Antal personer der er i samme lokale
- Antal personer pr kvadratmeter
- Muligheden for at påvirke sit eget indeklima uden at genere andre, f.eks. ved åbning af vinduer (potentielle træk- eller støjgener)
- Hvor lang tid man typisk opholder sig i lokalet i løbet af dagen
- Aktivitetsniveau og beklædning
- Omkringliggende omgivelser i forhold til støj
- Økonomiske omkostninger vs. potentiale i forbedringer

Relevante arealer og volumener

Krav til indeklima er gældende i de arealer og volumener, hvor personer opholder sig. Der kan være arealer og volumener i klasselokaler og grupperum, hvor krav til indeklimaet ikke behøver at være opfyldt. Det vil særligt være krav til det visuelle indeklima, der kan være svært at opfylde i alle dele af lokalet.

Krav til dagslys skal ifølge bygningsreglementet overholdes for ”det relevante areal”, hvilket i vejledningen er angivet til at være på hele arbejdsfladen og dermed til bagkant af bagerste skrivebord.

Dagslysberegninger foretages for en realistisk indretning af lokalerne, der både er hensigtsmæssig og fleksibel, hvilket for klasselokaler typisk vil sige minimum 2 m² pr person. Dette sikrer lærerne pædagogisk frihed i forhold til bordopstillinger og indretning. For de fleste klasselokaler vil det betyde, at der skal være tilfredsstillende dagslys på minimum 60 m², da der ifølge folkeskoleloven kan være 28 elever i en klasse plus to lærere.

Det **relevante areal** i et klasselokale dækker det areal, hvor elevers og læreres borde er placeret

Det **relevante areal** i et klasselokale er de 2 m² pr person med bedst dagslys

Det **relevante volumen** er det samme areal og op til en højde på 1,8 m over gulv

Lokaler, der er mindre end 60 m², vil i de fleste tilfælde ikke kunne bruges til klasser med 28 elever og deres to lærere, da der ifølge bygningsreglementet er krav til et rumvolumen på 6 m³ pr person, hvilket svarer til 180 m³ eller 60 m² ved en rumhøjde på 3 m.

For de arealer der benyttes i forbindelse med gruppearbejde, svarer det relevante areal til arbejdszonen, hvor der på indretningsplanerne er placeret borde til gruppearbejde.

En lang række fællesarealer benyttes alene til hygge og andet ophold, f.eks. sofagrupper, disse arealer går *ikke* ind under relevant areal. Det er således muligt at indrette et lidt mørkt hjørne til et hyggeområde.

Herunder er der for tre klasselokaler markeret det relevante gulvareal, som er bestemt af dagslysforholdene.

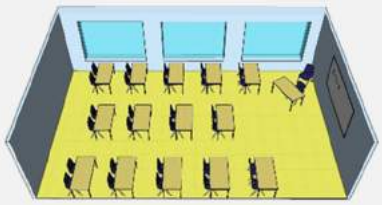
I det første klasselokale er der store vinduer, der giver tilstrækkeligt dagslys i hele lokalet. Klasselokalet er 60 m² og kan derfor benyttes af 28 elever og 2 lærere.

I det andet klasselokale er vinduerne i facaden mindre, det betyder at der kun er tilstrækkeligt dagslys i en del af lokalet (markeret med gult). Det er derfor ikke muligt at benytte den inderste 1/3 del af lokalet og lokalet er derfor kun egnet til 20 personer.

I det tredje klasselokale er gulvarealet større end de to foregående, og der er de store vinduer i facaden. Der er kun tilstrækkeligt dagslys i en del af lokalet (markeret med gult), dette areal er på 60 m² og derfor kan lokalet benyttes af 30 personer, svarende til en klasse med 28 elever og 2 lærere.

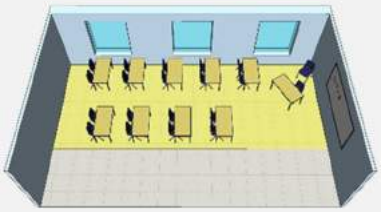
Eksempel – Glas/gulv forholdets betydning for anvendeligt undervisningsareal

I figurerne herunder er det markeret med gult i hvilket område, der er tilstrækkeligt dagslys i tre klasselokaler.



Glasareal og gulvareal passer sammen

Lokalet er 60 m² og der er tilstrækkeligt dagslys i hele lokalet. Dermed plads til at lokalet kan benyttes af en klasse med 28 elever og deres to lærere.



Mindre vinduer - ikke nok dagslys i hele lokalet

Lokalet har smallere vinduer, og der kommer derfor mindre dagslys ind i lokalet. Det medfører, at der kun er tilstrækkeligt dagslys i de 40 m² af lokalet, der ligger tættest på facaden. Lokalet kan benyttes til 20 personer, dvs. 18 elever og 2 lærere.

Ekstra stort lokale - dagslys til 28 elever og 2 lærere

Lokalet har et areal på 85 m² og har samme glasareal som det første lokale. Der er tilstrækkeligt dagslys på de 60 m², der ligger tættest på facaden og lokalet kan derfor benyttes af en klasse med 28 elever og deres to lærere.

Samtidighed og brugsprofiler

Antagelser om hvornår og hvor meget et lokale i en bygning er i brug, har meget stor indflydelse på det realiserede indeklima, og skal fastlægges i samarbejde med bygherre i forbindelse med projekteringen. I dette afsnit opstilles forslag til brugsprofiler og samtidigheder.

I nedenstående tabeller er der opstillet forslag til belastningsprofiler og samtidigheder, der kan benyttes for skoler med traditionel klasseundervisning samt for fællesområder der benyttes til f.eks. gruppearbejde. Tabellerne giver forslag til hhv. almindelig og lav belastning. Lav belastning kan benyttes til at vise, hvordan indeklimaet vil blive ved lavere klassekvotienter, men det vil være ”almindelig” belastning, der er dimensionsgivende.

For at anskueliggøre betydningen af bygningens brug, kan der med fordel udføres simuleringer for såvel almindelig og lav samtidighed. Dette vil give bygherre et billede af bygningens robusthed overfor forskellig brug.

Til sidst i afsnittet er angivet værdier for, hvad varmeafgivelsen er fra personer og udstyr.

Interne belastninger fra personer, udstyr og belysning

Personer
Personer kan som udgangspunkt antages at have et aktivitetsniveau på 1,2 met i de fleste indeklimasimuleringer. 1,2 met svarer til almindeligt kontorarbejde, og vil derfor også være dækkende for skoler.

For en gennemsnitlig dansk mand vil et aktivitetsniveau på 1,2 met resultere i en varmeafgivelse på 143 W, hvoraf 100 W kan regnes at blive afgivet som tør varmeafgivelse. For skoler regnes alle personer at have denne varmeafgivelse, da det svarer til stillesiddende aktivitet (1,2 met) for en voksen person eller stående aktivitet (2,0 met) for et barn. Dette vurderes at være konservativt, men retvisende for langt de fleste klasselokaler, hvor de store elever fysisk svarer til voksne personer, og hvor eleverne i de små klasser til gengæld har et højere aktivitetsniveau.

Ved beregning af det atmosfærisk indeklima regnes der med en CO_2-produktion pr person på 20,4 L/h per person.

Udstyr og belysning

Varmeafgivelsen fra udstyr skal medtages i beregningerne af termisk indeklima. I Tabel 9 er listet eksempler på varmeafgivelsen fra en række udstyrs- og belysningselementer. Disse kan anvendes, hvis der ikke er kendskab til det specifikke udstyr.

Tabel 9 Varmeafgivelse fra udstyr og belysning

Apparat	Effekt
Almen belysning, LED	4 -6 W/m^2
Almen belysning, lysstofrør	6 - 8 W/m^2
Arbejdslampe	5 - 15 W
Bordprinter	20 W
Kopimaskine	250 W
PC-fladskærm, ny	25 W
Printer	100 W
Projektor	250 W
Smartboard	175 W (standby 10 W)
Standard pc, bærbar/stationær	30 W
Tablet	10 W

Klasselokaler

I henhold til folkeskoleloven må der maksimalt være 28 elever i en skoleklasse fra børnehaveklasse til 9. klasse. Klasselokaler skal derfor som udgangspunkt dimensioneres efter 28 elever plus to undervisere. I henhold til Bygningsreglementet skal der som minimum være et volumen på 6 m³ pr person.

Brugsmønstret for klassetrinene varierer meget. I de små klasser er eleverne udenfor i frikvarterne, mens de store elever ofte bliver siddende i klasserne i frikvartererne. Derudover vil de store elever i højere grad have en computer med til timerne, mens de små bevæger sig mere i lokalet.

For at øge robustheden vil udskolingsklasserne være dimensionsgivende for almindelige klasselokaler.

Figur 12 Forudsætninger for belastninger i klasselokaler. Antal af personer er som udgangspunkt 28 elever og 2 lærere.

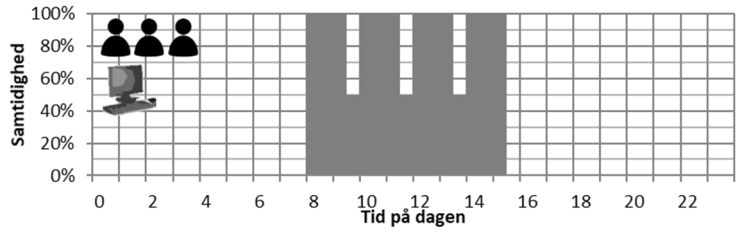
28 elever og 2 lærere = 30 personer — 30 · 100 W = 3.000 W

Udstyrsbelastning i klasselokaler:

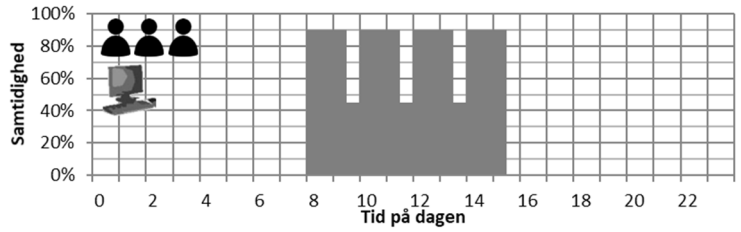
1 bærbar pc eller tablet pr elev	28 ·10 W (tablet) = 280 W eller 28 ·30 W (bærbar) = 840 W
1 stationær pc	1 · 30 W = 30 W
1 smartboard med projektor	1 · 175 W = 175 W

Figur 13 Samtidigheder for personer og udstyr i klasselokaler. Der regnes som udgangspunkt med 100% samtidighed i undervisningstiden og 50% belastning i frikvarterne, da de ældste elever ofte opholder sig inde i frikvarterne. Med lav belastning er der 90% samtidighed i undervisningstiden og 45% belastning i frikvarterne.

Almindelig samtidighed



Lav samtidighed

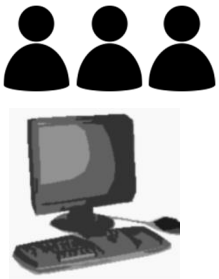


Indeklimaet i skoler, der ikke benytter den traditionelle klasseundervisning, skal fortsat leve op til kravene. Der kan dog være andre midler til at opnå samme indeklima. Korte sessioner med mange personer i et lokale giver en anden udvikling i f.eks. CO_2-koncentrationen end i et traditionelt klasselokale. Derfor kan luftmængder eventuelt justeres, hvis beregninger viser at grænserne kan holdes.

Arealer der benyttes til f.eks. gruppearbejde

Grupperum har meget forskellige udformninger. Det kan være deciderede lokaler, der ligner klasselokaler, et afskærmet areal der ligger i relation til klasserne eller noget helt tredje. Antallet af elever og lærere, der anvender grupperummet samtidigt, vil være helt afhængigt af undervisningsform og grupperummets størrelse. Jo mindre lokale, jo større samtidighed bør der som udgangspunkt regnes med.

Figur 14 Forudsætninger for belastninger i arealer der bl.a. benyttes til gruppearbejde.



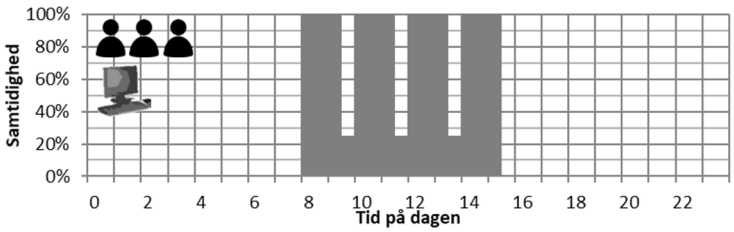
I henhold til indretningsplan eller 1 person pr 2 m²

Udstyrsbelastning i grupperum:

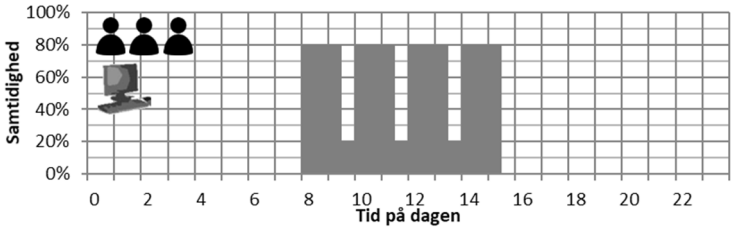
1 bærbar pc eller tablet pr person

Figur 15 Samtidigheder for personer og udstyr for arealer der benyttes til bl.a. gruppearbejde. Jo mindre lokale, jo større samtidighed bør der som udgangspunkt regnes med.

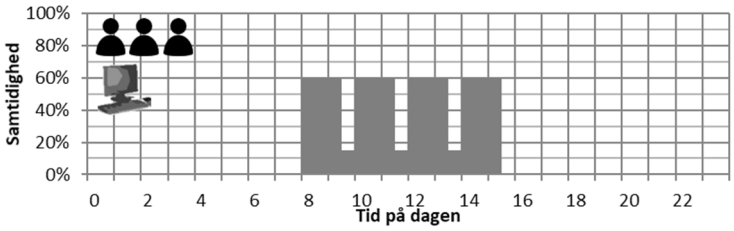
Høj samtidighed



Almindelig samtidighed



Lav samtidighed



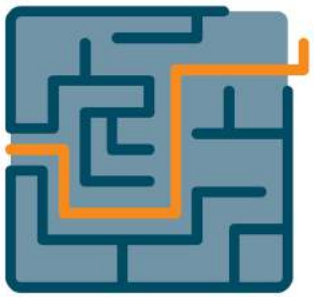
Det termiske indeklima er ofte en væsentlig parameter, som påvirker hele designprocessen. Dette skyldes bl.a., at der er kommet mere fokus på, hvad et godt termisk indeklima er, og hvor stor betydning det har for indlæring

FOTO: COLOURBOX

Del 3. Metoder til at opnå et godt indeklima i skoler

Ved både nybyg og renovering af skoler står rådgiver og bygherre ofte overfor de samme udfordringer igen og igen, når indeklimaet skal overholde kravspecifikationerne samtidig med, at energiforbruget skal fastholdes på et lavt niveau. Der er stor variation på skoler i dag, men klasselokaler har mange ligheder på tværs af skolerne. Formålet med del 3 er at hjælpe aktørerne til allerede i de tidlige faser at træffe valg på et oplyst grundlag og give dem en viden om, hvordan nogle kritiske valg påvirker andre forhold i en bygning.

Det termiske indeklima er ofte en væsentlig parameter, som påvirker hele designprocessen. Dette skyldes dels, at der er kommet mere fokus på, hvad et godt termisk indeklima er, og hvor stor betydning det har for indlæring. Dels at varmebelastningen i klasselokaler er øget på grund af flere elever i hver klasse, mere udstyr samt krav til dagslys, som medfører større glasarealer. Oveni er der færre tunge konstruktioner i nyere bygninger, som ellers tidligere kunne benyttes som termisk buffer. Løsningsrummet for de gode løsninger er derfor indsnævret betragteligt.



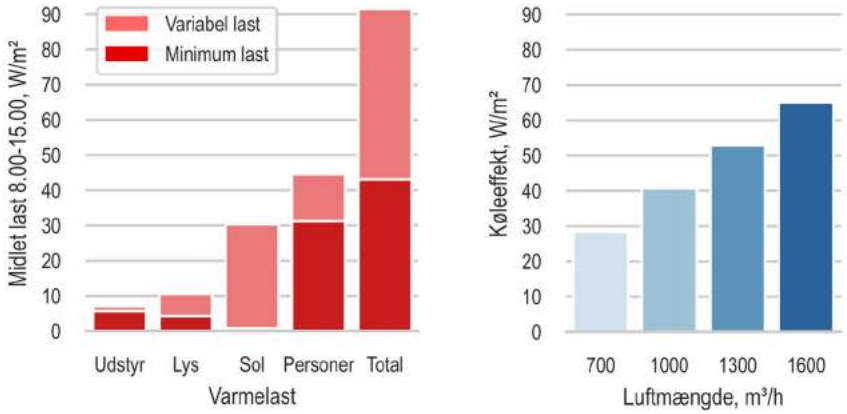
Figur 16 Vejen til det gode indeklimadesign er svær men viden om retningen hjælper til at komme hurtigere og lettere til målet, blandt andet ved at vise hvor der er blindgyder.

I det første afsnit i del 3 fokuseres på design af det termiske indeklima, og hvordan betydende parametre påvirker den termiske komfort og energiforbruget. I det andet afsnit er der listet fordele og opmærksomhedspunkter for en lang række løsninger om f.eks. ventilationsløsninger og valg af solafskærmning.

Del 3 skaber dermed et solidt grundlag for rådgiver og bygherre, når de indledende valg skal træffes i forbindelse med projektering af en ny eller eksisterende skole. Del 3 belyser, hvordan specifikke valg kan påvirke f.eks. det termiske indeklima i en bygning. Dette kan være helt afgørende, da valg truffet tidligt i processen kan vise sig at medføre unødvendigt store problemer senere, fordi konsekvenserne af disse valg ikke var kendte, da valgene blev truffet.

Kom i mål med det termiske indeklima

Som tidligere nævnt er det termiske indeklima ofte afgørende for indeklimadesignet, idet belastningen fra personer, udstyr og solindstråling er meget markant. På Figur 17 nedenfor ses til venstre minimum og variabel varmebelastning og til højre ses køleeffekt ved forskellige luftmængder. Figuren viser, at det kan være endog meget vanskeligt at opfylde det termiske indeklima, og at der er behov for velovervejede løsninger, hvor flere tiltag bringes i spil.



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.

I forbindelse med en designproces, hvor en skole skal renoveres eller bygges fra ny, opbygges som regel en model af et klasselokale i et program, hvor indeklimaet kan simuleres time for time for et helt år. På basis af denne model varieres udvalgte parametre for at finde en løsning, hvor kravene til indeklimaet er overholdt.

I det følgende præsenteres resultaterne fra et studie gennemført som del af udviklingen af nærværende branchevejledning, hvor hhv. det termiske indeklima og energiforbrug er sammenholdt med variationer af afgørende parametre for indeklimaet. I studiet er opbygget en BSim-model af et klasselokale, hvor der er foretaget variationer af 13 forskellige parametre og kørt over 44.293 simuleringer. I Tabel 10 nedenfor ses et overblik over de anvendte parametre og de variationer, der er benyttet i analysen for hver parameter.

Tabel 10 De 13 parametre og de tilhørende variationer, der er benyttet i analysen.

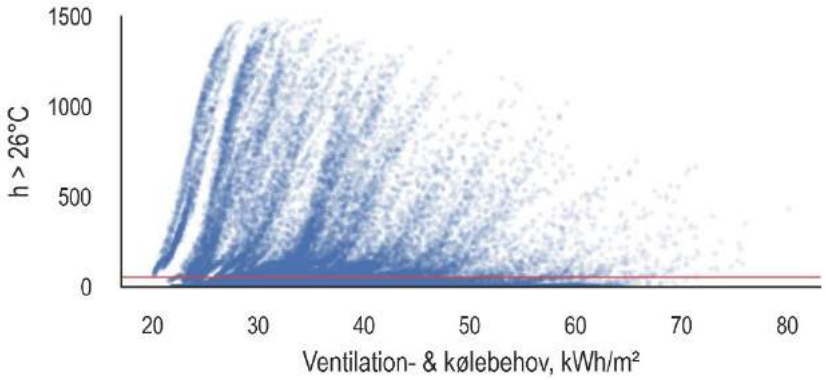
Variabel	Enhed	Variationer			
BYGNINGEN / PASSIVE TILTAG					
Termisk masse	-	Tung	Let		
Natkøling	% af luftmængde	0	25	100	
Natsænkningstemperatur	°C	18	21		
Kold start (1°C koldere om morgenen)	-	Med	Uden		
HVAC					
Maks luftmængde	m³/h	700	1000	1300	1600
Køling af ventilationsluften	-	Med	Uden		
VARMEBELASTNINGER					
Antal personer (og deres udstyr)	-	21	24	27	30
Belysning	W/m² Styring	10 Manuelt	5 Manuelt	5 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

Ved evaluering af resultaterne af de mange simuleringer, har det primære fokus været på:

- antallet af timer over 26°C og 27°C, som mål for om det termiske indeklima er acceptabelt
- energiforbrug til ventilation og køling, som er det energiforbrug, der er relateret til at holde temperaturen nede på varme dage.

Dette fokus er valgt, fordi netop antallet af varme timer meget ofte er den parameter, der er afgørende for valget af løsninger. Samtidig skal indeklimaet realiseres uden unødigt højt energiforbrug.

På Figur 18 nedenfor er samtlige simuleringer plottet ind. Diagrammet viser en bred fordeling af energiforbrug til ventilation og køling, og at højt energiforbrug ikke er en garanti for godt indeklima.



Figur 18 Punktdiagram af sammenhængen imellem årligt energiforbrug til ventilation- og køling vs. antallet af timer over 26°C for samtlige 44.293 simuleringer. 42% af simuleringerne overholder kravene til antal timer over 26°C og 27°C i forhold til indeklimaklasse "Standard" (markeret med rød linje på figuren).

Af de 44.293 simuleringer opfylder 42% krav til antal timer over 26°C og 27°C.

Vigtigste anbefalinger til det gode termiske indeklima

På baggrund af studiet er her samlet de vigtigste anbefalinger for at komme i mål med det termiske indeklima uden unødigt energiforbrug.

Indtænk mekanisk køling og termisk masse

- Det samlede energiforbrug til ventilation og køling er lavere med mekanisk køling end uden. Dette skyldes, at det er nødvendigt at ventilere mere, hvis luften ikke kan køles ned. Forskellen øges jo flere personer, der er i lokalet.
- Tunge bygninger har generelt væsentlig lavere energibehov til ventilation og køling end lette bygninger
- For rum med høj belastning fra sol og/eller personer vil en let bygning *med* køling have et lavere energibehov til ventilation og køling end en tung bygning *uden* køling.
- Mekanisk køling er stort set altid nødvendigt for at kunne etablere et godt termisk indeklima i et klasselokale til 28 elever, specielt hvis der er tale om et let byggeri. Undtagelsen er en meget tung bygning, hvor der benyttes natkøling. I en sådan bygning kan der dog blive problemer med akustikken.
- Termisk masse i bygningen har positiv indflydelse på det termiske indeklima, da temperaturvariationer dæmpes. Det er derfor en god ide at indtænke tunge, fritliggende konstruktioner under hensyn til, at det akustiske indeklima også kan overholdes.
- Let byggeri er mindre robust overfor ændringer i brug. Dimensioneres et klasselokale i en let bygning f.eks. til 24 personer (22 elever og 2 lærere), vil det være yderst vanskeligt efterfølgende at overholde kravene til termiske indeklima, hvis man ønsker at benytte lokalet til en klasse med 28 elever. Det vil kræve en forøgelse af ventilationsluftmængden og dermed også forøgede kanaldimensioner m.m.

Dimensionér med de rette luftmængder

- Det termiske indeklima er dimensionerende for luftmængder både med og uden køling af luften. I klasselokaler, vil der være nok luft i systemet til også at sikre det atmosfæriske indeklima, såfremt varmebelastningen fra personer, udstyr og solindfald fjernes med ventilation. Benyttes vandbåret køling (f.eks. kølebafler eller kølelofter) skal der være særskilt fokus på atmosfærisk indeklima.
- Luftmængderne har stor betydning for, hvor mange øvrige tiltag, der er nødvendige. 1000 m³/h svarer til at kunne holde 1000 ppm i CO_2-koncentration ved 30 personer. I en let bygning skal der ventileres med mere end 1000 m³/h ved 30 personer i lokalet for at overholde det termiske indeklima.

Vær opmærksom på orientering af klasselokaler

- Sydvendte lokaler kræver mere energi til ventilation og køling for at overholde krav til termisk indeklima end de øvrige orienteringer. Uden køling bliver energiforbruget mod syd markant højere end for de øvrige orienteringer.
- Sydvendt uden køling kan kun lade sig gøre for få personer i lokalet (samme lokalestørrelse).
- Sydvendte orienteringer egner sig ikke til klasselokaler. Det er yderst vanskeligt og meget energikrævende at skabe et tilfredsstillende termisk indeklima mod syd. Placer i stedet lokaler med lavere personbelastning og større frihed for brugerne mod syd. Gerne aktiviteter hvor træk og højere temperaturer bedre kan accepteres, f.eks. gangarealer, alrum m.m.
- Nordvendte lokaler giver størst frihed i forhold til at etablere et godt termisk indeklima og er den orientering, som er mindst afhængig af solafskærmning. Samtidig har nordvendte lokaler det laveste energiforbrug til ventilation og køling.

Indtænk automatisk styret solafskærmning

- Solafskærmning er vigtig for at komme i mål ved orienteringer mod syd, øst og vest.
- Solafskærmning har langt større betydning for antallet af varme timer end g-værdien af vinduerne. Udhæng har kun begrænset effekt.
- Solafskærmningen bør styres automatisk, så den kan aktiveres også når der ikke er personer i lokalet. Derved undgås, at klasselokalet er for varmt inden skoledagen starter. Manuel solafskærmning aktiveres som regel først, når skaden er sket, og der *er* blevet for varmt. Det er svært og dyrt at køle et lokale ned, der er blevet for varmt, det er langt bedre at være på forkant.
- For en tung bygning er det lettere at finde løsninger uden solafskærmning end det er for en let bygning. Mod syd er det dog yderst vanskeligt selv for en tung bygning at finde løsninger uden solafskærmning.

Natkøling med mekanisk ventilation er energikrævende

- Natkøling hvor der ventileres med kølig natteluft for at sænke temperaturen i lokalet er meget effektivt i tunge bygninger, men det har også god effekt i lette bygninger.
- Energiforbruget til natkøling i form af øget brug af den mekaniske ventilation er ikke uvæsentligt. Det anbefales, at der kun natkøles indtil temperaturen i lokalet når ned på 21°C - 22°C, da effekten af at køle længere ned er begrænset og ikke står mål med den ekstra energi til ventilation, som det vil kræve.
- Kold start, hvor klasselokalet er nedkølet 1°C koldere end det normale setpunkt, har ingen betydning for antallet af timer over 26°C, men det øger energiforbruget.
- I rum med automatisk styret naturlig ventilation er der ikke øget energiforbrug i forbindelse med natkøling.

Eksempler

På de næste sider er vist fem eksempler på dataudtræk fra de mange simuleringer.

Diagrammerne viser hvor stor en andel af simuleringerne i hver gruppe, der overholder krav til det termiske indeklima. Andelen giver et billede af hvor svært det er at finde løsninger. Er andelen høj er der mange mulige løsninger at vælge i mellem. Er andelen lav vil det være svært at finde løsninger fordi der vil være mange begrænsninger, f.eks. at det er nødvendigt med både solafskærmning, natkøling, få personer eller lign.

Det sidste eksempel består af violinplots, hvor fordelingen af løsninger er vist i forhold til x-aksen.

Frederiksbjergskole der er opført efter de nyeste principper om børns læring og udvikling. Byggeriet matcher målet om et lavt energiforbrug, et godt indeklima

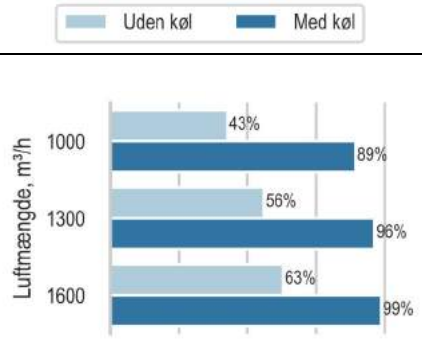
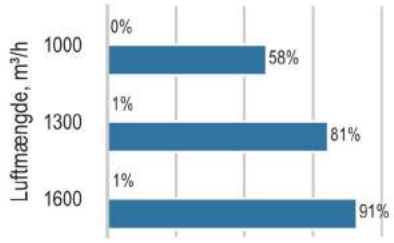
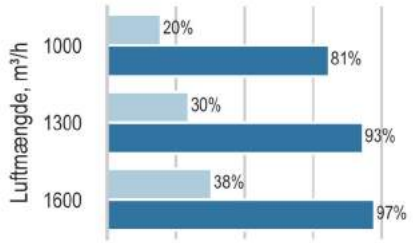
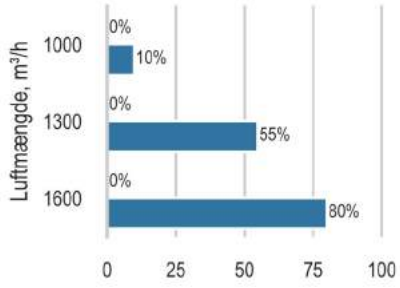
Bygherre: Århus Kommune

Arkitekt: Henning Larsen

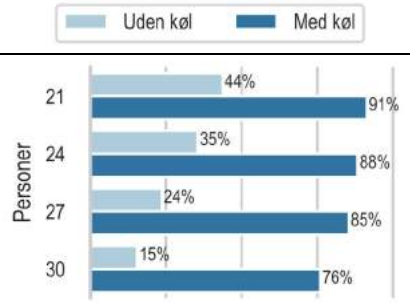
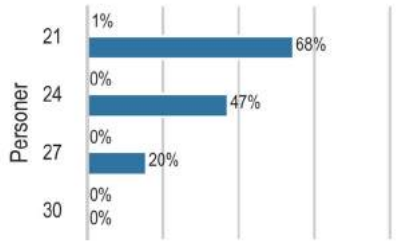
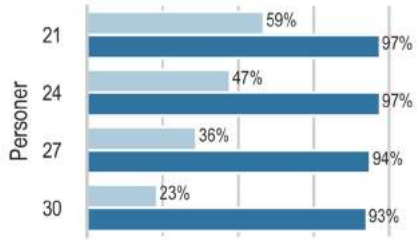
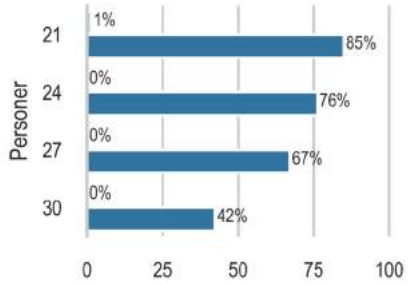
Ingeniør: NIRAS A/S

Fotograf: ©Hufton+Crow

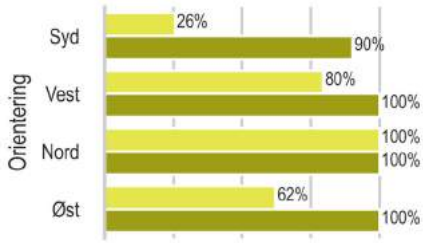
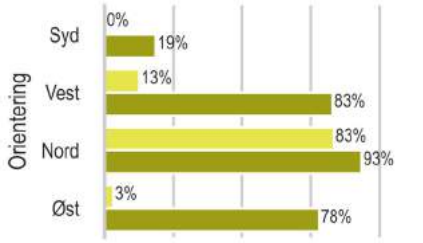
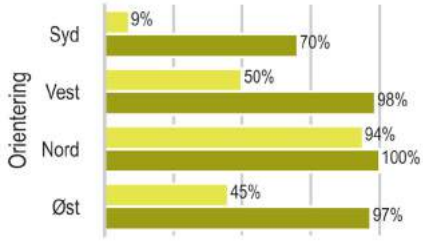
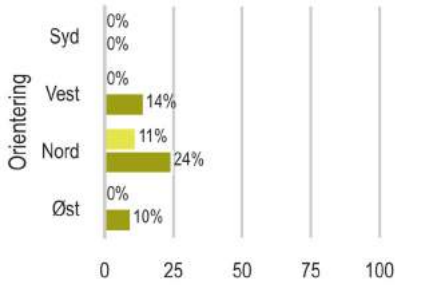
Eksempel 1: Antal personer / Termisk masse / Luftmængde / Køling

		Supplerende kommentarer
Simuleringer med 21 og 24 personer **Tung bygning**		- Uden køl overholder ca. halvdelen af simuleringerne indeklimakrav. Af disse er næsten alle med natkøling - Med køl overholder næsten alle simuleringerne indeklimakravene - Ved 1000 m³/h uden køling er det nødvendigt med natkøling. Ved natkøling med 25% luftmængde er solafskærmning nødvendigt undtagen mod nord - Ved 1000 m³/h uden køling mod syd er der behov for både natkøling og solafskærmning.
Simuleringer med 21 og 24 personer **Let bygning**		- Uden køl er der kun få løsninger, alle med 100% natkøl, solafskærmning, 21 personer, vest- eller nordvendt - Sydvendte lokaler med køl, 1000 m³/h og 25% natkøl kræver solafskærmning - Uden solafskærmning, 1000 m³/h og 25% natkøl er det kun muligt mod nord. For øst/vest begrænses glas-gulv% til ca. 16% samt g-værdi på 0,37 og "kold start".
Simuleringer med 27 og 30 personer **Tung bygning**		- Uden køl er natkøling nødvendig - 1000 m³/h og 25% natkøl er kun muligt for 27 personer og med effektiv belysning - 1000 m³/h og 25% natkøl er ikke muligt mod syd. - 1000 m³/h og 100% natkøl muligt mod syd, hvis der er solafskærmning
Simuleringer med 27 og 30 personer **Let bygning**		- Kræver køling uanset luftmængde - 1000 m³/h kun muligt ved 27 personer og ikke mod syd - 1000 m³/h uden solafskærmning kun muligt mod nord - 1300 m³/h muligt for syd, hvis der er solafskærmning

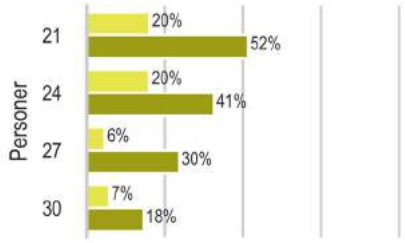
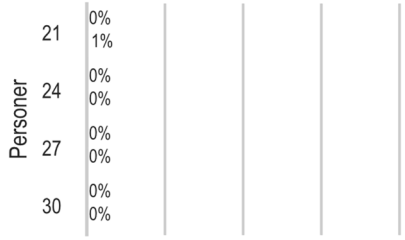
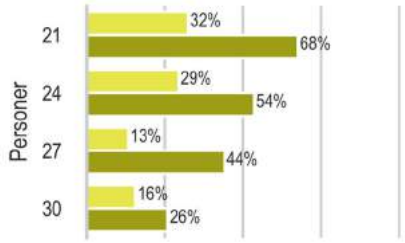
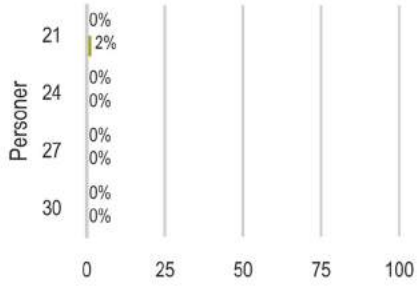
Eksempel 2: Luftmængde / Termisk masse / Antal personer / Køling

		Supplerende kommentarer
1000 m³/h – Tung bygning		- Med køling er der mange løsningsmuligheder - Uden køl og med 30 personer kræver 100% natkøling - Uden køl og med 30 personer er der meget få løsninger uden solafskærmning mod vest og øst, mod syd skal der være solafskærmning - Ved 21 personer kan solafskærmning undgås mod nord og vest, og med flere begrænsninger også mod øst
1000 m³/h – Let bygning		- Ingen løsninger for 30 personer uanset køl, der er behov for mere end 1000 m³/h ved 30 personer - Uden køl kun meget få løsninger, alle med 100% natkøl, intensiv solafskærmning, 21 personer, mod vest og nord. - 27 personer ikke muligt mod syd - 27 personer kræver solafskærmning for øst og vest
1300 m³/h – Tung bygning		- Med køling er der mange løsningsmuligheder - Uden køl og med 30 personer findes løsninger med 25% natkøling – dog primært mod øst og nord, og med solafskærmning - Uden køl, med 30 personer mod syd kræver 100% natkøling og solafskærmning
1300 m³/h – Let bygning		- For 24-30 personer er der ingen løsninger uden køl, for 21 personer er det yderst vanskeligt - For 30 personer med køl og mod syd er der fundet enkelte løsninger med maksimal solafskærmning og solafskærmende glas - For 30 personer kan solafskærmning undværes for nord og i få tilfælde for øst

Eksempel 3: Antal personer / Termisk masse / Orientering / Solafskærmning ved luftmængde 1000 m³/h MED køling

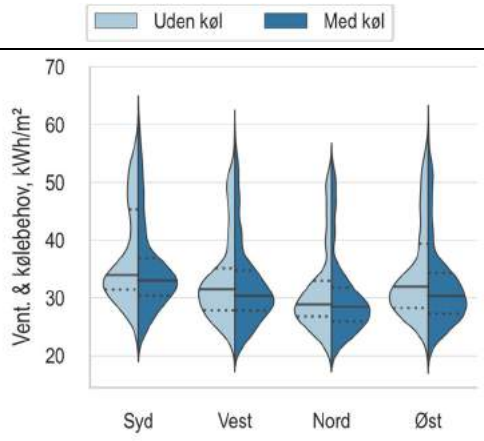
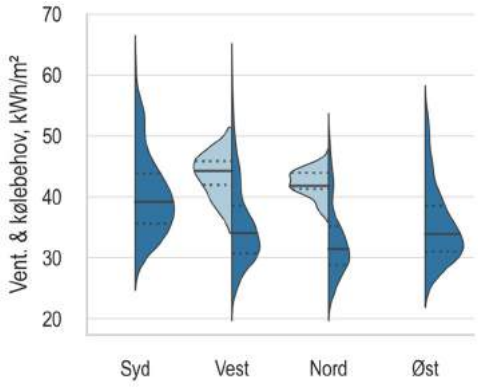
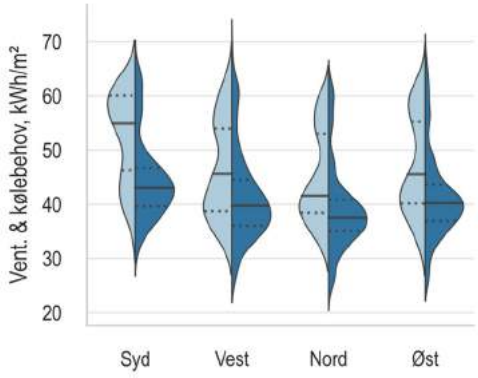
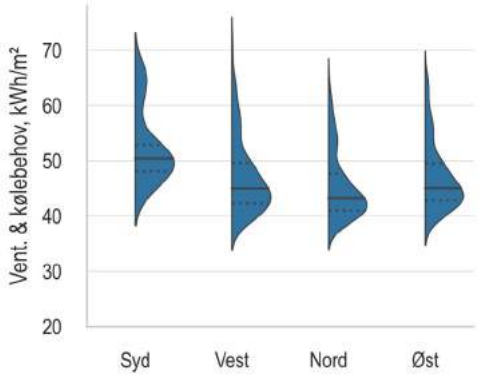
		Supplerende kommentarer
Simuleringer med 21 eller 24 personer **Tung bygning**		- For en tung bygning med få elever, 1000 m³/h, køl og solafskærmning kan næsten alt lade sige gøre. - Med solafskærmning overholdes kravene for syd uden natkøling. - Sydvendte rum uden solafskærmning begrænses af en maksimal glas-gulv% omkring 20% og skal samtidig være med lav g-værdi.
Let bygning		- For en let bygning er det selv ved få personer vanskeligt at undvære solafskærmning. - Uden solafskærmning er der ingen løsninger mod syd - Uden solafskærmning for øst og vest, ses kun løsninger med lav g-værdi og begrænset GG% på ca. 15%. - Med solafskærmning mod syd, kræves samtidigt lav g-værdi hvis glas-gulv % overstiger ca. 15%.
Simuleringer med 27 eller 30 personer **Tung bygning**		- En tung bygning med mange elever, køl og 1000 m³/h begrænses kun mod syd, hvor der enten skal være natkøling eller solafskærmning. - For sydvendte bygninger uden solafskærmning ses dog kun løsninger for 27 elever, lav g-værdi og øvre grænse for glas-gulv % på 16%.
Let bygning		- Ingen løsninger med 30 personer. - Ingen løsninger mod syd. - Alle løsninger forudsætter effektiv belysning (5 W/m²) - Kun mod nord kan udvendig solafskærmning undgås - Mod øst/vest skal solafskærmning kombineres med natkøling eller ved at reducere glas-gulv % og g-værdi.

Eksempel 4: Luftmængde / Termisk masse / Antal personer / Solafskærmning UDEN køling

	Uden solafsk. / Med solafsk.	**Supplerende kommentarer**
1000 m³/h – Tung bygning		- Natkøling nødvendigt for alle scenarier undtagen ved 21 personer mod nord og med solafskærmning. - Ved 30 personer kræves fuld natkøling uanset orientering og solafskærmning. - Uden solafskærmning ses ingen løsninger mod syd. - Ved 27 og 30 personer uden solafskærmning findes der kun løsninger mod nord og øst
1000 m³/h – Let bygning		- Med 21 personer resterer kun 4 variationer mod nord og vest, som alle har fuld natventilation, lav g-værdi, glas-gulv % mindre end 15% og energieffektiv belysning. - Der er ingen løsninger som overholder indeklimakravene, hvis der er 24 eller flere personer i lokalet
1300 m³/h – Tung bygning		- Uden solafskærmning er der ingen løsninger mod syd ved 27 og 30 personer. - Natkøling kan kun undgås med få personer (21 eller 24), solafskærmning og alene mod nord, øst og vest
1300 m³/h – Let bygning		- Med 21 personer resterer kun 10 variationer mod nord og vest, som alle har fuld natventilation og energieffektiv belysning. - Der er ingen løsninger som overholder indeklimakravene, hvis der er 24 eller flere personer i lokalet

I eksemplet på næste side er der alene medtaget løsninger, hvor krav til termisk indeklima er overholdt. Hvert ”violinplot” viser fordelingen af løsninger i forhold til energiforbrug til ventilation og køling – henholdsvis uden og med mekanisk køling. Der hvor plottet er ”tykt”, er der mange løsninger og der, hvor det er smalt, er der få løsninger. For de enkelte fordelinger angiver den vandrette linje medianen, og de stiplede linjer angiver hhv. 25 og 75% kvartilerne.

Eksempel 5: Energiforbrug til køling og ventilation afhængig af termisk masse, antal personer og orientering af lokalet.

			Supplerende kommentarer
21 personer	Tung bygning		- 50% af simuleringer uden køl overholder de termiske krav, mens 91% overholder med køl. - Forskellen i energiforbrug mellem bygninger med og uden køling er lille. - Orientering har begrænset betydning for energiforbruget sammenlignet med nedenstående scenarier.
	Let bygning		- 1% overholder termisk krav uden køling, mens 67% overholder med køl. - De få løsninger uden køl har langt større energibehov end løsningerne med køl. - Uden køl haves kun løsninger mod nord og vest. - Orientering har større betydning end ovenfor. - Den lette bygning har større energibehov for alle orienteringer end ovenfor.
30 personer	Tung bygning		- 19% overholder uden køl og 73% overholder med køl. - Sammenlignet med 21 personer stiger energibehovet markant – særligt uden køling. - Orientering har meget stor betydning, når der ikke er køling.
	Let bygning		- Ingen løsninger uden køl, mens 27% overholder med køling. - Fordelingerne med køling er forskudt med ca. 10 kWh/m² ift. 21 personer. - Orientering har større indflydelse på energiforbruget end den tunge bygning.

Skolen ved Sundet

Bygherre: Byggeri København

Arkitekt: Nøhr & Sigsgaard

Ingeniør: NIRAS

Fotograf: Nøhr & Sigsgaard

Uddybende om analysen

Analysen består af 44.293 simuleringer med kombinationer af 13 parametre. Kombinationerne er udvalgt tilfældigt, dog er udvælgelsen struktureret på en måde, så betydningen af alle parametrene afdækkes. Ved at variere bredt på disse vigtige inputs er det muligt at identificere overordnede tendenser og løsninger på et solidt grundlag.

Parametrenes variationer er fastlagt, så de dækker et bredt spektrum for at gøre undersøgelsen så generel som mulig. Et eksempel er den maksimale luftmængde, der varierer fra 700 m³/h og helt op til 1600 m³/h. De to laveste værdier passer med kravet på 9,4 l/s pr. pers. ved henholdsvis 21 og 30 personer. De to højeste værdier er medtaget for at afdække mulighederne for at øge luftmængden i lokalet i stedet for at etablere køling af ventilationsluften. Det skal understreges, at de høje luftmængder vil kræve et ekstra fokus på indblæsningsmønsteret for at undgå træk.

I Tabel 11 nedenfor gennemgås de enkelte parametre, og hvordan de er varieret i analysen.

Tabel 11 Overblik over parameter, hvordan den varieres og en kort beskrivelse af den enkelte parameter.

Variabel	Variation	Forklaring
BYGNINGEN		
Termisk masse	Tung bygning Let bygning	Den tunge bygning repræsenterer en ældre skole med blottede betonvægge og høj termisk masse. Konstruktionerne virker som termisk buffer, hvor dagens varme fra sol, personer m.m. optages i løbet af dagen, som kan afgives igen i løbet af natten når temperaturen i lokalet falder. Den lette konstruktion repræsenterer en nyere skole bygget i lettere materialer og med nedhængt loft. Den kan ikke på samme måde forsinke stigningen i temperatur i løbet af dagen.
Natkøling	0%, 25% og 100% af luftmængden til rådighed for natkølingen	Ved at køle konstruktionerne med den kolde natteluft, sænkes temperaturen i konstruktionen, som derved kan virke som buffer i løbet af dagen. Effekten af natkøling er størst ved tunge konstruktioner.
Natsænkning	18°C og 21°C	Natsænkning er en del af samme koncept som natkøling, og angiver den temperatur som der sænkes til i løbet af natten.
Kold start	med og uden	Parameteren ”kold start” betyder, at brugerne møder ind til lokale som er køligere end komforttemperaturen om morgenen. Således tillader man lokalet at være én grad koldere, for at udnytte den termiske masse i byggeriet.
HVAC		
Maks. luftmængde	700 m³/h 1000 m³/h 1300 m³/h 1600 m³/h	De to laveste værdier passer med kravet på 9,4 l/s pers. Ved henholdsvis 21 og 30 personer. De to højeste værdier er medtaget for at afdække mulighederne for at øge luftmængden i lokalet, i stedet for at etablere køling af ventilationsluften. De høje luftmængder vil kræve et ekstra fokus på indblæsningsmønsteret for at undgå træk. Ventilationen styres som VAV 25%-100%.

Køling	med og uden mekanisk køling af ventilationsluften	I mange tilfælde hvor belastninger er små, kan indeklimaet løses uden køling. Når belastningerne bliver høje, kan køling med fordel anvendes til at sikre en god komforttemperatur og nedbringe antallet af timer med overtemperatur.
VARMEBELASTNING		
Personer	21, 24, 27 og 30 personer	Persontætheden i et lokale betyder meget i forhold til varmetilskuddet og potentielle overtemperaturer. 30 personer svarer til klasselokaler med 28 elever + 2 lærer.
Belysning	10 W/m^2 manuelt styret, 5 W/m^2 manuelt styret 5 W/m^2 dagslysregulering	Belysningskilder afgiver varme. Ældre belysningskilder afgiver ofte langt mere varme end nyere LED-belysningskilder. Manuelt styret belysning vil være tændt en større del af tiden og vil ofte være on-off.
SOLINDFALD		
Orientering	vinduer mod nord, syd, øst og vest	Orienteringen af et klasselokale betyder meget i forhold til solbelastningen og hvornår den påvirker lokalet.
Solafskærmning	aktiveret 0%, 15%, 20% eller 25 % af brugstiden.	Aktiv solafskærmning kan reducere varmetilskuddet fra sol gennem vinduespartier. Der er stor forskel på hvordan solafskærmningen reguleres, hvor lang tid den er aktiveret samt hvor effektiv den er til at holde solvarmen ude. Der er antaget en udvendig solafskærmning og solafskærmningen er regnet at benyttes mere udenfor brugstid.
Glas-gulv-%	10%, 15%, 20% og 25% (uden korrektioner)	Mængden af glas i facaden har både stor betydning for mængden af naturligt dagslys, men også varmetilskuddet fra solen og den dertilhørende risiko for overophedning.
g-værdi	0,37 og 0,51	Glassets g-værdi har betydning for mængden af solvarme som trænger gennem glasset og dermed risikoen for overophedning. Jo lavere g-værdi, desto lavere varmetilskud. En lav g-værdi hænger sammen med en lavere lystransmittans og ved meget lave g-værdier også farven af lyset.
Udhæng	dybder 0 m, 0,5 m, 1,0 m, og 1,5 m	Et udhæng over facadens glaspartier, kan reducere solindfaldet og dermed risikoen for overophedning. Et udhæng reducerer dog også mængden af dagslys.

Trods analysens betragtelige omfang er det ikke muligt at lave et udtømmende studie af alle de muligheder, der vil være ved design af klasselokaler. Analysen omfatter eksempelvis ikke eksterne skyggegivere, eller indstillingerne for varme- og ventilationssystemerne, så setpunkter og driftstider vil naturligvis kunne laves på andre måder.

For at vurdere de forskellige parametres indflydelse på henholdsvis det termiske indeklima og energiforbruget, er der lavet en følsomhedsanalyse. Resultatet af følsomhedsanalysen er vist i Tabel 12.

Tabel 12 Tabellen viser de tretten parametre, der er varieret på i analysen og deres relative betydning for henholdsvis det termiske indeklima og energiforbruget. Som mål for det termiske indeklima er

angivet antallet af timer over 26°C og energiforbruget er vurderet i forhold til den energi, der benyttes til ventilation og køling.

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%
Natsænkning	1%	10%
Kold start	0%	1%

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

Følsomhedsanalyse giver et statistisk mål for, hvor meget variationerne i de enkelte inputs (de 13 parametre) bidrager til variationen af et givent output (antal timer >26°C og energiforbrug til ventilation og køling).

Resultaterne giver et estimat for, hvor ”vigtige” eller ”indflydelsesrige” hvert af inputtene ér inden for det undersøgte variationsområde. En variabel kan godt have stor betydning for ét output, men være ubetydelig for andre. F.eks. er køling den mest betydningsfulde parameter i forhold til overtemperatur, mens det har mindre indflydelse på energibehovet. Omvendt har setpunktet for natsænkningen stor betydning for energiforbruget, mens det kun i begrænset omfang påvirker overtemperatur.

Resultaterne fra følsomhedsanalyserne viser hvilke designparametre, det er vigtigst at holde fokus på i forbindelse med design af termisk indeklima i skoler.

Indeklimaet på en skole skal styres og driftes korrekt og i overensstemmelse med de overvejelser og forudsætninger der er foretaget i forbindelse med design og projektering.

FOTO: COLOURBOX

Projekteringsovervejelser

I processen med at skabe et godt indeklima, skal der tages mange valg. Der findes typisk flere metoder til at løse den samme problemstilling, hvad end det drejer sig om bedre luft eller mere dagslys. I dette afsnit er der oplistet en række fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige løsninger, som går på at løse samme problematik.

Listerne er ikke endegyldige, men afspejler generelle betragtninger af fordele ved de forskellige løsninger, og opmærksomhedspunkter der potentielt kan blive til problemer, hvis de ikke håndteres.

Der er opstillet lister for følgende emner:

Ventilation

- Anlægstype
- Indblæsningsprincip
- Reguleringsprincip
- Mekanisk køling

Solafskærmning

- Type
- Placering
- Styring

Konstruktioner og facader

- Let / tung bygning
- Glasarealers placering og orientering

Erfaringer med styringsstrategier
Indeklimaet på en skole skal styres og driftes korrekt og i overensstemmelse med de overvejelser og forudsætninger der er foretaget i forbindelse med design og projektering.

En god styringsstrategi er centralt for realisering af indeklimaets potentiale. Styringsstrategien skal forholde sig til det samlede indeklima og samspillet mellem de forskellige indeklimaparametre. Eksempelvis skal styringsstrategien forholde sig til forventede driftstider således at lokalerne eksempelvis konditioneres som forudsat i forbindelse med de udførte indeklimaanalyser og der skal implementeres en styring som sikre at varmeanlæg og ventilation ikke modarbejder hinanden som følge af ikke koordinerede setpunkter og driftstider.

I forlængelse af design og projektering bør foreligge en detaljeret funktionsbeskrivelse for den samlede klimastyring, varme, ventilation og belysning. Funktionsbeskrivelsen skal afspejle det forventede brug, de udførte analyser af indeklimaet og de konkret projekterede anlæg og systemer.

Muligheden for overstyring af indeklimaet er vigtigt for brugernes tilfredshed med indeklimaet. En god styringsstrategi forholder sig således også til

brugernes muligheder for overstyring af f.eks. belysning, solafskærmning, ventilation og temperatur.

Den opstillede styringsstrategi skal implementeres inden aflevering af byggeriet og verificeres i forbindelse med ibrugtagning. Det er centralt at den tiltænkte styringsstrategi er dokumenteret og tilgængelige for driften på ethvert tidspunkt også i den senere drift.

En god styringsstrategi er centralt for realisering af indeklimaets potentiale. Det er centralt at de analyser der er udført af indeklimaet og de heraf følgende projekterede systemer. Dette bevirker, at der langt hen ad vejen skal automatiseres en række processer og sammentænkes en række faktorer. Eksempelvis nytter det ikke at køle et klasselokale ned til 20 grader med ventilationsluften, så længe radiatorerne er indstillet til 22 grader. Det er vigtigt at have en god styringsstrategi.

Ventilationen bør styres så der ikke ventileres unødvendigt både inden og uden for brugstiden. VAV-ventilation er oftest den bedste mulighed for at sikre en god luftkvalitet. Overventileres lokalet, kan det både resultere i træk, forøget energiforbrug og for lav relativ luftfugtighed. Den lave relative luftfugtighed kan medføre øget statisk elektricitet og irriterede slimhinder. Derudover bør der udtænkes en strategi for den ønskede temperatur som ikke går imod sætpunkter for varmesystemet.

Ventilation

Tabel 13 Fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige typer af ventilationsanlæg

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
Decentrale ventilationsanlæg	- Indregulering og styring påvirker alene det enkelte lokale - Alene lokale føringsveje - Filtrering af udeluft - Effektive muligheder for at styre luftmængder - Effektiv varmegenvinding	- Flere servicepunkter - Flere gennembrydninger i klimaskærm til luftindtag og afkast - Luftfordeling afhængig af indblæsningsmetode - Vindpåvirkning - Rekuperativ anlæg (vekselvirkende enheder) ift. luftfordeling og balance - Teknisk støj - Små køleanlæg til hver enhed
Balanceret mekanisk ventilation suppleret med automatisk styret naturlig ventilation	- Energiforbrug til lufttransport reduceres som følge af udnyttelse af naturlig ventilation - Mulighed for store luftskifter i varme perioder - Mulighed for ”gratis” natkøling - Mulighed for ”gratis” ventilation når udeklima er varmt udenfor	- Træk - Principielt indbygges to systemer samtidig → højere anlægsomkostninger - Samspil med solafskærmning (opluk af vinduer, reducering af åbningsareal)

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
	brugstid f.eks. weekender og sommerferie	- Støj fra omgivelser, f.eks. legeplads, dæmpes ikke når vinduer står åbne - Naturlig ventilation kan ikke anvendes ved lave udetemperaturer pga. risiko for træk - Manglende styring af indstrømningsmønster fra opluk - Påvirker facadeudformning fordi opluk skal placeres højt og jævnt fordelt
Naturlig ventilation (evt. suppleret med udsugningsventilator)	- Lavt energiforbrug til lufttransport - Effektivt til natkøling og ventilation i weekender og ferier - Effektivt som supplerende ventilation om sommeren - Lav service - Logisk for brugere - Simpelt at overstyre for brugere - Kan kombineres med udsugningsventilator for at sikre tilstrækkeligt drivtryk	- Risiko for træk, særligt når udetemperaturen er under 18°C - Manuelle opluk betjenes for sent (over 25°C og 1500 ppm) - Manuelle opluk betjenes alene når der er personer til stede - Alene egnet ved højtplacerede opluk, der leder luften op på loftet (udnyttelse af coandaeffekt). Dvs. bundhængt indadgående eller topstyrede - Kan ikke benyttes ved sidehængte vinduer - Lav/ingen varmegenvinding medfører høje varmeudgifter - Støj fra omgivelser, f.eks. legeplads, dæmpes ikke når vinduer står åbne - Manglende styring af indstrømningsmønster - Svært at sikre god opblanding og luftfordeling i lokalet - Ikke mulighed for køling af ventilationsluften - Samspil med solafskærmning (opluk af vinduer, reducering af åbningsareal)

Tabel 14 Fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige indblæsningsprincipper for ventilationen

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
Fortrængnings-ventilation	- Frisk og kølig luft i opholdszonen (varm og dårlig luft fortrænges til loft) - Effektivt i forhold til både temperatur og CO_2 - Mindre luftmængde nødvendig - Kræver ikke nyt loft	- Armaturer optager gulvplads i lokaler - I nogle meters afstand fra armaturet (nærzonen) er der træk pga. lav temperatur og høj lufthastighed - Nærzone kan ikke anvendes ved indretning - Risiko for træk i ankelhøjde
Opblandings-ventilation med loft armaturer	- Effektiv fordeling af friskluft - Optager ikke plads i opholdszonen - Kan reguleres nøjagtigt - Loftet kan kombineres med akustisk regulerende materiale	- Kan have høje anlægsomkostninger - Areal optag og plads over loft for føringsveje af hovedkanaler og fordelingskanaler i rummet - Armaturvalg, -type, -antal og -placering er afgørende for at opnå en trækfri løsning
Opblandings-ventilation med bagkant-/ facadeindblæsning	- Optager ikke plads i opholdszonen - Simplere kanalføring over loft - Nyt loft kan evt. undgås	- Begrænsede muligheder for kanalføring - Svært at sikre tilstrækkelig opblanding i lokalet - Øget risiko for træk - VAV styring og regulering af luftmængden kan ikke gøres trækfrit i hele intervallet - Vigtigt at udnytte coanda-effekt
Diffus loftsindblæsning	- Effektiv fordeling af frisk luft når der indblæses med tilstrækkelig undertemperatur - Meget lav lufthastighed og dermed ingen træk - Ingen synlige armaturer	- Kan have høje anlægsomkostninger - Kræver høj præcision i udførelse ift. tæthed - Risiko for nedkøling af overliggende dæk - Kræver at der altid blæses ind med undertemperatur - Dårlig opblanding når indblæsningstemperaturen er tæt på rumtemperaturen, kan medføre dårligere atmosfærisk indeklima i opholdszonen

Tabel 15 Fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige reguleringsprincipper for ventilationen

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
VAV	- Energibesparende - Tilpasses aktuelle forhold og reducerer risiko for blandt andet træk og lav luftfugtighed	- Kræver korrekt styring - Samspil med varmesystem - Anlægsomkostninger kan være højere
CAV	- Simpel styring (on/off)	- Højt energiforbrug - De ikke tilpassede luftmængder kan medføre trækgener og evt. lav relativ luftfugtighed

Tabel 16 Fordele og opmærksomhedspunkter ved mekanisk køling af ventilationsluften

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
Ingen	- Billigt i etablering - Ingen service - Ingen kølemidler	- Stor risiko for overophedning - Øget energiforbrug til drift af ventilation - Øget behov for natkøling - Svært at overholde krav til det termiske indeklima
Central køling	- Få servicepunkter - Kan sikre termisk komfort - Energieffektivt - Højere COP - Mindre anlæg end summen af kølebehov for alle lokaler, udnyttelse af samtidighed - Mindre mængde af kølemiddel end decentrale - Lettere at sikre tæthed i systemet	- Styring påvirker flere rum - Nogle kølemidler er miljøskadelige - Begrænsning på valg af kølemiddel ved større anlæg, da de mest skadelige ikke må benyttes
Decentral køling	- Kan sikre termisk komfort - Styring påvirker alene det enkelte rum - Hvert lokale er ”sikret” sin kølemængde uafhængigt af andre rum	- Mange servicepunkter - Større samlet kølebehov da samtidighed ikke kan udnyttes - Samlet mængde af kølemiddel er større - Nogle kølemidler er miljøskadelige, ved små anlæg

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
		- må mere skadelige kølemidler anvendes - Lavere COP - Vigtigt at den kølede luft opblandes og fordeles i rummet for at undgå træk

Solafskærmning

Tabel 17 Fordele og opmærksomhedspunkter ved typer af solafskærmning

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
Fast	- Vandrette lameller er effektive mod syd - Udhæng er billige i forhold til vedligeholdelse	- Faste lameller forringer udsynet, specielt lodrette lameller - Vandrette lameller eller udhæng forringer dagslyset væsentligt (specielt bagerst i lokalet) - Vandrette lameller og udhæng mod øst og vest har kun meget lille effekt
Persienner (regulerbare)	- Effektiv afskærmning, specielt hvis placeret udvendigt - Kan reguleres til at undgå blænding - Kan justeres så udsyn stadig er muligt, samtidig med at der afskærmes - Kan trækkes fra når der ikke er behov for afskærmning og dermed øge dagslysadgangen - Mulighed for automatisering og imødekommelse af overtemperatur før det er "for sent"	- Effektiviteten i forhold til solvarmen er meget afhængig af placering. Udvendigt er bedst. - Rengøring og vedligehold - Økonomi i forhold til faste
Screens	- Kan trækkes fra når der ikke er behov for afskærmning og dermed øge dagslysadgangen - Mulighed for automatisering og imødekommelse af overtemperatur før det er "for sent"	- Kan være vindfølsomme - Når aktiveret er der som regel ikke udsyn - Økonomi i forhold til faste

Solafskærmende glas	- Tillader større glaspartier på grund af generelt mindre varmetilskud - Udsyn bevares	- Dagslyset reduceres også - Udsynet kan forvrænges af farve i glasset - Dagslys og udsyn er påvirket også på tidspunkter, hvor der ikke er problemer med solindfald - Dyrere end almindelig rude

Tabel 18 Fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige placeringer af solafskærmning

	Fordele	**Opmærksomhedspunkter**
Udvendig	- Langt den mest effektive reduktion af varmetilskud fra solen - Solafskærmningen er ikke påvirket af indendørs leg	- Eksponeret for vind og vejr - Eksponeret for udendørs leg og boldspil - Kan give øget vedligehold - Samspil med opluk af vinduer
Integreret (placeret mellem glassene i ruden)	- Mere effektivt end indvendig - Beskyttet mod både indendørs og udendørs leg og boldspil - Beskyttet mod vind og vejr - Mindre rengøring	- Kan være svært at vedligeholde - Mindre effektiv end udvendig placering - Evt. rengøring er besværlig - Havareret persienne kan medføre skift af hele ruden
Indvendig	- Montering - Økonomi ved etablering - Beskyttet mod vejrlig og udendørs leg og boldspil	- Meget lav effektivitet i forhold til solindfald - Sårbar overfor indendørs leg - Rengøring - Ofte lette og tynde materialer, der lettere går i stykker

Tabel 19 Fordele og opmærksomhedspunkter ved forskellige styring af solafskærmning

	Fordele	**Opmærksomhedspunkter**
Automatisk	- Effektivt i forhold til at sikre det termiske indeklima - Kan imødekomme overtemperatur før det er ”for sent” - Aktivering af afskærmning udenfor brugstid, f.eks. tidlig morgen, aften og i weekender	- Økonomi - Vedligehold - Facadegennembrydninger til el - Endnu et element i BMS/CTS-systemet som driften skal holde øje med

	- Styring også når brugerne ikke er i lokalet i løbet af dagen - Mindsker behovet for køling	
Manuel	- Simpel og billig - Let at forstå for brugeren	- Lav effektivitet i forhold til at sikre termisk indeklima - Styres alene når der er personer til stede, dvs. ikke i weekender, tidlig morgen mm - Vil først blive brugt når det er blevet varmt - Øget behov for ventilation og køling

Konstruktioner og facader

Tabel 20 Fordele og opmærksomhedspunkter ved hhv. tunge og lette bygningskonstruktioner

	Fordele	**Opmærksomhedspunkter**
Lette	- LCA-påvirkning er lav - Muligt at lave hurtigere temperaturændringer	- Begrænset termisk masse og dermed mindre buffer og lavere effekt af natkøling
Tunge	- Mere stabile temperaturer - Stor termisk masse og dermed buffer på varme dage - Natkøling er effektivt	- Langsomt system, hvis der er ønskes ændring af temperatur - LCA-påvirkning er højere end for lette bygninger - Vigtigt, at HVAC-systemer sikrer at der ikke sker overophedning i weekender, da det kan tage tid at køle ned igen

Tabel 21 Fordele og opmærksomhedspunkter ved glasarealer i facaden i de forskellige orienteringer

	Fordele	**Opmærksomhedspunkter**
Nordvendt	- Lavt varmetilskud fra solen - Lav risiko for blænding - Lille eller intet behov for solafskærmning	

	Fordele	Opmærksomhedspunkter
Sydvendt	- Udhæng over vinduer er effektive til at reducere varmetilskuddet (men ikke tilstrækkeligt) - Stor tilgang af dagslys	- Stort varmetilskud fra solen - Solafskærmning er helt nødvendig - Svært at sikre godt termisk indeklima
Østvendt	- Solen er væk over middag, hvor udetemperaturen ofte er højere - Lavere varmetilskud fra sol end mod syd	- Vigtigt med en solafskærmning der kører for udenfor brugstid i de tidlige morgentimer, for at skærme for den store mængde varme fra en lavtstående sol om sommeren - Blænding da solen står lavt når det rammer vinduerne
Vestvendt	- Varmebelastning fra solen om formiddagen er lav - Solindfald sker delvist efter brugstid - Lavere varmetilskud fra sol end mod syd	- Vigtigt med automatisk afskærmning, der kører for udenfor brugstid, for at skærme for den store mængde varme fra en lavtstående sol om sommeren - Blænding da solen står lavt når det rammer vinduerne
Placering i facaden	- Vandrette vinduesbånd fra bordhøjde og op giver en jævn fordeling af dagslys i lokalet og optimale udsynsforhold - Ovenlysvinduer giver mere lysindfald, men bør vinkles mod nord	- Glasarealer placeret under bordhøjder bidrager kun minimalt til dagslysmængden på arbejdsfladen - Højt placeret glas øger risikoen for genskin - Lodrette vinduesfelter giver risiko for store luminansspring, der kan opleves som blænding

Den optimale proces afhænger naturligvis af den konkrete situation – byggesagens kompleksitet og omfang, deltagerne og deres respektive viden og kompetencer samt byggesagens tidshorisont og økonomi.

FOTO: COLOURBOX

Del 4. Processen til et godt indeklima i skoler

I forbindelse med en hvilken som helst byggesag – nybyggeri eller renovering – er en veltilrettelagt proces en væsentlig forudsætning for at opnå det bedste resultat.

Den optimale proces afhænger naturligvis af den konkrete situation – byggesagens kompleksitet og omfang, deltagerne og deres respektive viden og kompetencer samt byggesagens tidshorisont og økonomi.

Der findes således ikke én mest optimal proces, som passer på tværs af indeklimaprojekter i alle skoler.

Alligevel er der en del der går igen, og et indeklimaprojekt i skoler er typisk karakteriseret ved:

- ✓ Mange interessenter
- ✓ Komplekse sammenhænge
  - Mange forhold der skal spille sammen
- ✓ Store konsekvenser ved dårligt resultat
- ✓ Intensivt belastede lokaler
  - Høj belastning i mange timer dagligt
  - På kanten af det teknisk løsbare
- ✓ Mulighed for større klasser og dermed personbelastning / mere intensiv brug af lokalerne
- ✓ Fremtidssikring i forhold til nye læringsformer
- ✓ Effektivisering af drift og vedligehold
  - Robuste løsninger
- ✓ Indeklimaprojektet er ofte en del af en større byggesag/renovering

At sikre et godt indeklima i skoler er komplekst. Brugsmønstret og belastningen i klasselokaler er ret ekstrem. Varmebelastningen fra personer og udstyr pr m² er i praksis kun at sammenligne med de mest komplicerede arealer i erhvervsbyggeriet dvs. hårdt belastede mødelokaler, callcentre og tilsvarende. Dette kombineret med indeklimaets store indvirkning på effektivitet og indlæring.

Figur 19 Det kan være en kompleks sag at komme i mål med et godt indeklima. Det er ikke altid let at overskue alle konsekvenserne ved et valg.

I dette afsnit oplistes processen for et indeklimaprojekt for en skole. Procesbeskrivelsen tager udgangspunkt i en traditionel forståelse af projektets fase i henhold til "Ydelsesbeskrivelse: Byggeri og Landskab 2018" (YBL18):

- Indledende faser
  - Ideoplæg
  - Byggeprogram
- Forslagsfasen
  - Dispositionsforslag
  - Projektforslag
- Projekteringsfasen
  - Myndighedsprojekt
  - Udbudsprojekt
  - Udførselsprojekt
- Udførelsesfasen
  - Udførelse
  - Aflevering
- Drift

For at det hele kan lykkedes fra den indledende rådgivning til drift og ibrugtagning af bygningen, er det vigtigt at have fokus på at visioner, ønsker og forudsætninger fastholdes og bringes med gennem alle projektets faser.

Indledende fase

Bygherre skaber i samarbejde med brugerne, det fremtidige driftspersonale og eventuelt sammen med en bygherrerådgiver en omhyggelig opbygning af baggrundsviden, forventninger og forudsætninger for den kommende sag.

Det er ikke altid tilstrækkeligt anerkendt, hvor stor konsekvens omhyggelighed og præcision i denne fase har for det endelige resultat. SBi-anvisning 269 beskriver nærmere behovet for og værdien ved, at bygherre i høj grad intensiverer sit arbejde i denne fase således, at idegrundlag og det efterfølgende byggeprogram er så præcist og gennemarbejdet som muligt og i øvrigt afspejler et realistisk niveau i forhold til forventet tid og økonomi.

Afhængigt af om der er tale om enkeltstående indeklimaforbedringer i eksisterende byggeri, eller decideret renovering eller nybyggeri er der naturligvis forskelligt omfang og forskelligt niveau for vidensindsamling. Nedenfor opstilles en bruttoliste til indsamling af hhv. baggrundsviden om eksisterende forhold og hhv. forventninger og forudsætninger for de fremtidige forhold. Begge indsatser er grundlaget for formulering af ideoplæg og byggeprogram følgende.

Vidensindsamling om eksisterende forhold

Registrering af eksisterende forhold:

- Omfang og funktioner
    - Geografisk placering, omgivelser, orientering i fht. sol, mm
    - Arealer, fordeling og størrelser
    - Funktioner og lokaletyper
    - Organisering i bygningen, bygnings- og lokalemæssige sammenhænge
- Stand og kvalitet
    - Miljøfarlige stoffer og sundhedsrisici
        - PCB, Asbest, tungmetaller, VOC'er mfl.
        - Radon
        - Ekstern støj
    - Klimaskærmen, inklusive vinduer
        - Kvalitet
        - Tilstand, restlevetid
    - Installationer
        - Omfang, herunder varme, ventilation (evt. køl) og belysning
        - Kapacitet, effektivitet og regulering
        - Tilstand, restlevetid
    - Indvendige overflader
        - Tilstand
    - Indeklima
        - Termisk indeklima
        - Atmosfærisk indeklima, luftkvalitet
        - Akustisk indeklima
        - Visuelt indeklima (Dagslys, Udsyn)
    - Energiforbrug
        - Omfang af registrering og af målere
        - Hidtidige varme- og elforbrug
- Erfaringer fra nuværende drift
    - Positive erfaringer som ønskes videreført og bibeholdt
    - Udfordringer og problemer

Forventninger og forudsætninger for de fremtidige forhold

Vurdering af fremtidige behov, kapacitet og funktioner

- Geografiske placeringer
- Nybyggeri / tilbygning / renovering
- Størrelse / kapacitet

    - Antal spor
    - Maksimale klassekoefficienter (absolut binding fremefter)
- Funktioner
    - Undervisningslokaler
    - Speciallokaler
    - Kontor/administration
    - Fællesarealer
    - Sekundære arealer
    - Udearealer
- Organisering
    - Ankomst og adgang
    - Bygnings- og lokalemæssige sammenhænge
    - Flow

Vurdering af fremtidige behov, kvalitet og drift

- Generel beskrivelse af forventninger til kvalitet
- Kvalitetskrav til
    - Lokaler
    - Konstruktioner
    - Installationer
    - Overflader
- Indeklimakrav og -forudsætninger (for hvert lokale)
    - Brugstid og brugsscenarier
    - Indeklimakrav (se del 2 om kravspecifikationer)
- Energiforbrug og bæredygtighed
    - Energiklasse
    - Materialevalg
    - Bæredygtighed, tilgang evt. certificering
- Aflevering
    - Proces, herunder deltagelse af drift
    - Verificering
        - Funktionsafprøvning (BR-mindstekrav)
        - Evt. performancetest eller commissioning
- Drift
    - Beskrivelse af krav til fremtidig drift
        - FM-systemer
        - BMS/CTS
        - Forventet driftsorganisation og deres kompetencer
- Tid og økonomi
    - Forventet anlægsøkonomi
    - Forventet driftsøkonomi
    - Tid

Ovenstående udgør de væsentligste elementer i forhold til indeklima i forbindelse med etablering af ideoplæg, som derefter bearbejdes og udmøntes i et endeligt byggeprogram, der omhyggeligt beskriver forudsætninger og forventninger til byggeriet.

Forslagsfasen

Projektets tidlige tilblivelse.

De projekterende udarbejder i dispositions- og projektforslagsfaserne forslag til opgavens løsning i forhold til det opstillede byggeprogram.

I forslagsfaserne fastfryses projektforudsætningerne og overordnet arkitektur, rummeligheder og funktionalitet løses. Der opstilles forslag til overordnede materialevalg samt konstruktions- og installationsprincipper – og det sandsynliggøres, at de opstillede principper kan løse byggeriet indenfor lovgivningens og byggeprogrammets rammer.

I forhold til realisering af byggeriets ambitioner indenfor indeklima og energi er forslagsfaserne særligt betydende. Samspillet mellem og konsekvensen af den arkitektoniske bearbejdning, geometrier, facadedesign og materialevalg samt tekniske installationer er helt centralt for, om de forventede indeklimakrav kan overholdes. Herunder er denne bearbejdelse også helt central for det nødvendige omfang af installationer og den dertilhørende drift og energibehov.

Afhængigt af om der er tale om enkeltstående indeklimaforbedringer i eksisterende byggeri, eller decideret renovering / nybyggeri er omfanget af opgaver i forslagsfaserne varierende. Som udgangspunkt indeholder en bruttoliste med opgaver med særlig relevans i forhold til indeklima i forslagsfaserne følgende:

Geometri og klimaskærm

Optimering af geometri og klimaskærm:

- Organisering
    - Disponering af funktioner og sammenhænge
    - Disponering af alle væsentlige rum i forhold til forventet anvendelse samt opstillede indeklimakrav
    - Fastlæggelse af teknikarealer samt føringsveje for tekniske installationer samt adgangsforhold herfor
- Bygningen
    - Disponering og fastlæggelse af bygningsgeometri og orientering i forhold til optimering af dagslys, udsyn, solvarme, støj m.m.
    - Disponering og overordnet fastlæggelse af klimaskærm og vinduer i forhold til dagslys, udsyn og solvarme
- Materialer
    - Vindues- og rudeegenskaber
    - Afklaring af behov for sol- og blændingsafskærmning.
    - Termisk masse
    - Akustiske absorbenter
    - Lydtransmission og disponering af funktioner

Teknik

- Indeklimastyring
    - Hovedprincipper for opvarmning, ventilation og køling
    - Disponering af anlægstyper, størrelser og føringer

    - Udarbejdelse af kritiske snit
    - Undersøgelse og fastlæggelse af indblæsningsløsninger /armaturtyper og placering i rum særligt i forhold til effektivitet og træk
- Belysning
    - Hovedprincipper for kunstig belysning
    - Fastlæggelse af almenbelysning, scenariebelysning, særbelysning
    - Indledende lysberegninger
- Styring/regulering
    - Principper for styring og regulering af indeklima og tilhørende installationer
    - Styringens type, omfang, betjening og muligheder for lokal overstyring

Indeklima

- Indeklimabearbejdning
    - Udpegning af typiske, dimensionerende og kritiske rum
    - Indledende indeklimaanalyser som forudsætning for optimering af geometri og klimaskærm samt teknik.
        - Dynamiske indeklimaanalyser (f.eks. BSim, IES-VE, IDA ICE eller tilsvarende)
        - Dagslysanalyser
        - Omfanget af analyser skal være tilstrækkelige til at være repræsentative for alle rum med fast ophold i byggeriet
- Akustik
    - Vurdering og håndtering af ekstern støj
    - Intern akustik – principper for og omfang af absorbenter
- Kritiske forhold for overholdelse af indeklimakrav
    - Der opstilles liste med kritiske forudsætninger og valg i forhold til overholdelse af projektets indeklimakrav
    - Listen med de kritiske forudsætninger ajourføres løbende hele vejen gennem projektet

Energi

- Energibearbejdning
    - Energioptimering i forhold til funktioner og krav
    - Indledende energirammeberegning

Ovenstående udgør for forslagsfaserne oversigtsmæssigt de væsentligste elementer. Det er centralt, at der på tværs af elementerne opnås et sammenhængende og gennembearbejdet projekt. Projektet skal på dette stade svare på bygherres samlede programkrav og danne grundlag for den videre detaljering af projektet.

Forslagsfaserne bør afrapporteres omhyggelig og med fokus på at kritiske forudsætninger og beslutninger videreføres retmæssigt i de følgende faser.

Projekteringsfasen

Projektets detaljering.

I myndigheds-, udbuds- og udførelsesprojekteringerne detaljeres projektforslaget. Der udarbejdes dokumentation for overholdelse af myndighedskrav, og afhængigt af udbuds- og entrepriseformer udarbejdes dokumentation til grund for udbud og den reelle udførsel på pladsen.

Den reelle detaljeringsgrad afhænger af sagstype og samarbejdsformer, men i relation til indeklima skal følgende som hovedregel være indeholdt.

Geometri og klimaskærm

Optimering af geometri og klimaskærm:

- Organisering
    - Endelig detaljering af funktioner og sammenhænge
    - Endelig disponering af alle rum i forhold til forventet anvendelse samt opstillede indeklimakrav
    - Endelig detaljering af teknikarealer samt føringsveje for tekniske installationer samt adgangsforhold herfor
- Bygningen
    - Endelig detaljering af klimaskærm og vinduer i forhold til dagslys, udsyn og solvarme
- Materialer
    - Endelig fastlæggelse af vindues- og rudeegenskaber
    - Endelig fastlæggelse og detaljering af sol- og blændingsafskærmning
    - Færdige loftsplaner

Teknik

- Klimastyring
    - Detaljering af systemer og løsninger for opvarmning, ventilation og evt. køling
    - Endelig fastlæggelse og detaljering af anlægstyper, størrelser og føringer
    - Endelig disponering og detaljering af indretning af teknikrum og føringsveje
    - Detaljering af typer og placering af varmekilder i rum samt indblæsningsløsninger/armaturtyper særligt i forhold til effektivitet og træk
- Belysning
    - Endelig projektering og beskrivelse af almen belysning, scenariebelysning, særbelysning
    - Endelige lysberegninger
- Styring/regulering
    - Endeligt projekt for styring og regulering af indeklima og tilhørende installationer
    - Styringens type, omfang, betjening og muligheder for lokaloverstyring
- Klargøring til test/drift
    - Opstilling af principper for funktionsafprøvning/idriftsættelse

- Udarbejde af drift og vedligeholdsmateriale

Indeklima

- Endelig indeklimabearbejdning
  - Kontrol af typiske, dimensionerende og kritiske rum stadig er dækkende
  - Endelige indeklimaanalyser til dokumentation for indeklima i forhold til geometri, klimaskærm og teknik.
    - Dynamiske indeklimaanalyser (Bsim, IES-VE IDA ICE el tilsvarende
    - Dagslysanalyser
    - Omfanget af analyser skal være tilstrækkelige til at være repræsentative for alle rum med fast ophold i byggeriet.
- Akustik
  - Analyser og detaljering af principper og detaljer med indflydelse på lydtransmission, internt og fra eksternt støj
  - Detaljering af absorbenter – analyser af efterklangstider/taleforståelighed
- Kritiske forhold for overholdelse af indeklimakrav
  - Den opstillede liste med kritiske forudsætninger og valg i forhold til overholdelse af projektets indeklimakrav ajourføres

Energi

- Energibearbejdning
  - Endelig energirammeberegning

Ovenstående udgør de mest væsentlige elementer i projekteringsfasen. Ved fasens afslutning foreligger et endeligt projekt der i detaljer svarer på alle programkrav og som tilsikrer et retmæssigt grundlag for projektets reelle tilblivelse.

Udførelsesfasen

Projektets fysiske tilblivelse.

Projektet realiseres i praksis i henhold til foreliggende projektmateriale, hvormed alle væsentlige forhold burde være bestemt.

I forbindelse med entreprenørens arbejde med projektet, vil der fremkomme forslag til justeringer/ændringer. I den forbindelse er det væsentligt at understrege, at konsekvensen af disse bør analyseres med respekt for projektets forudsætninger og på lige fod med de analyser, der er udført af projektvalg i forslags- og projekteringsfaserne.

Dokumentation og as-built

I forbindelse med udførslen føres der løbende tilsyn med om byggeriet udføres som projekteret, herunder i særdeleshed om kritiske forudsætninger for indeklimaet realiseres som forventet.

Det kontrolleres, at der udføres retmæssig as-built dokumentation for indeklimaet, herunder dokumentation for eventuelle projektoptimeringer og deres konsekvenser.

Bygningen funktionsafprøves i henhold til Bygningsreglementets mindstekrav. Derudover bør det overvejes at performanceteste byggeriet og/eller tilvælge en commissioning proces.

Drift

Når byggeriet står færdigt, er det vigtigt at sikre så optimal en drift som mulig.

Selve ibrugtagningen og driftsfasen er central i den endelige realisering af et godt indeklima. Det er i forbindelse med ibrugtagning og i den efterfølgende drift at alle gjorte tanker og intentioner i forhold til indeklimaet implementeres og realiseres. Ikke desto mindre sker der ofte fejl eller misforståelser som kunne være undgået.

I forbindelse med ibrugtagningen er det centralt at sikre sig, at de forudsætninger og driftsparametre, der opstilles i forbindelse med design og projektering, reelt implementeres, så indeklimaet kan styres og driftes som tiltænkt. I forbindelse med overgangen fra anlægsfase til ibrugtagning og derefter drift bør man så vidt muligt fastholde den viden og de personer, der har håndteret design og projektering af indeklimaet. Så vidt muligt bør man også inddrage det driftspersonale, der kommer til at stå for den fremtidige drift i afleveringsprocessen og ibrugtagning. Derved sikres det bedst muligt, at driftspersonalet får den nødvendig viden om blandt andet diverse FM-systemer og BMS/CTS-systemer.

Det bør kræves, at der foreligger udførlige drifts- og vedligeholdelsesmanualer og styringsstrategier, i en kvalitet og et sprog der er anvendelig i den daglige drift, således indeklimaet kan nemt kan driftes af forskellige personer.

Litteraturliste

Clausen, G., Toftum, J., Bekö, G., Dam-Krogh, E. P., Fangel, A. B., & Andersen, K. (2017). Indeklima i skoler. In *DTU, Realdania*.

Danish Standards Association. (2018). DS/EN 17037 Dagslys i bygninger [Daylight in buildings]. *Danske Standard*, 1–57.

Danmarks Lærerforening. (2019). *Flere elever går i meget store klasser* (Issue December).

folkeskolen.dk. (2012). *Rekordstigning i folkeskolens klassekvotient*. Web. https://www.folkeskolen.dk/514051/rekord-stigning-i-folkeskolens-klassekvotient

Madsen, M., Hauberg, D. S., Kolstrup, K., & Toftum, J. (2020). *Samfundsøkonomiske gevinster ved forbedret indeklima*. https://realdania.dk/publikationer/faglige-publikationer/samfundsoekonomiske-gevinster-ved-forbedret-indeklima

Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2017). Interactive Building Design Space Exploration Using Regionalized Sensitivity Analysis. *Proceedings of the 15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 726–735.

Trafik- Bygge- og Boligstyrelsen. (2019). Bygningsreglementets vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen for dagslys. *Bygningsreglementets Vejledning Om Korrektioner Til 10 Pct.-Reglen for Dagslys*, 25.

Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, *157*(April), 197–204. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046

Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, *173*(December 2019), 106749. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749

Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2021). *Forskningsbaserede anbefalinger for godt og læringsfremmende indeklima i klasseværelser Fuld rapport*.

Appendiks A - Trækrisiko

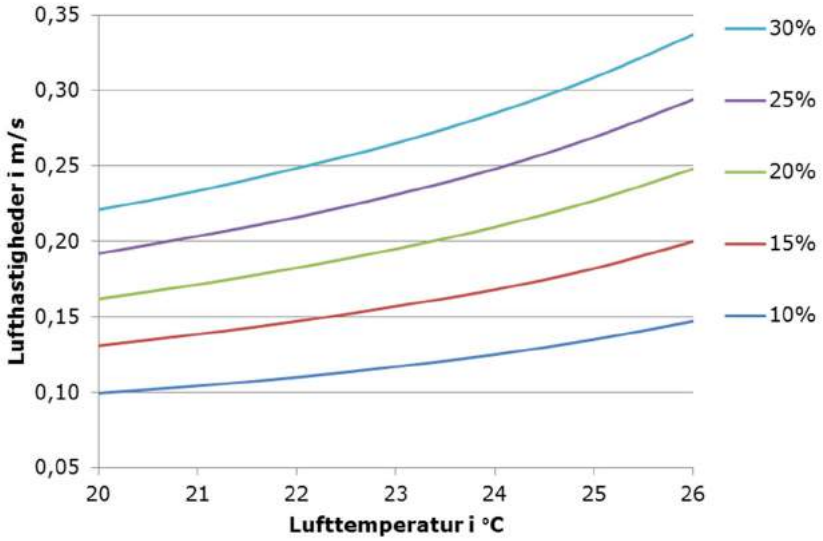
Tabel 22 Sammenhørende værdier for temperaturer og lufthastigheder ved forskellige værdier af trækrisiko rates. Tallene er gældende ved en turbulensintensitet på 40 %.

	Trækrisiko				
Lufttemperatur	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
20 °C	0,10 m/s	0,13 m/s	0,16 m/s	0,19 m/s	0,22 m/s
21 °C	0,10 m/s	0,14 m/s	0,17 m/s	0,20 m/s	0,23 m/s
22 °C	0,11 m/s	0,15 m/s	0,18 m/s	0,22 m/s	0,25 m/s
23 °C	0,12 m/s	0,16 m/s	0,20 m/s	0,23 m/s	0,27 m/s
24 °C	0,13 m/s	0,17 m/s	0,21 m/s	0,25 m/s	0,29 m/s
25 °C	0,14 m/s	0,18 m/s	0,23 m/s	0,27 m/s	0,31 m/s
26 °C	0,15 m/s	0,20 m/s	0,25 m/s	0,29 m/s	0,34 m/s

Tabel 23 Trækrisiko ved forskellige værdier for temperaturer og lufthastigheder. Tallene er gældende ved en turbulensintensitet på 40 %.

	Lufthastighed				
Lufttemperatur	0,05 m/s	0,10 m/s	0,15 m/s	0,20 m/s	0,25 m/s
20 °C	0 %	10 %	18 %	26 %	35 %
21 °C	0 %	9 %	17 %	24 %	33 %
22 °C	0 %	9 %	15 %	23 %	30 %
23 °C	0 %	8 %	14 %	21 %	28 %
24 °C	0 %	7 %	13 %	19 %	25 %
25 °C	0 %	6 %	12 %	17 %	23 %
26 °C	0 %	6 %	10 %	15 %	20 %

På næste side er sammenhængende optegnet i et diagram.



Figur 20 Sammenhæng mellem lufttemperatur og lufthastigheder ved trækrisiko på hhv. 10%, 15%, 20%, 25% og 30%. Sammenhængene gælder ved en turbulensintensitet på 40%

Appendiks B - Udsynsklasser

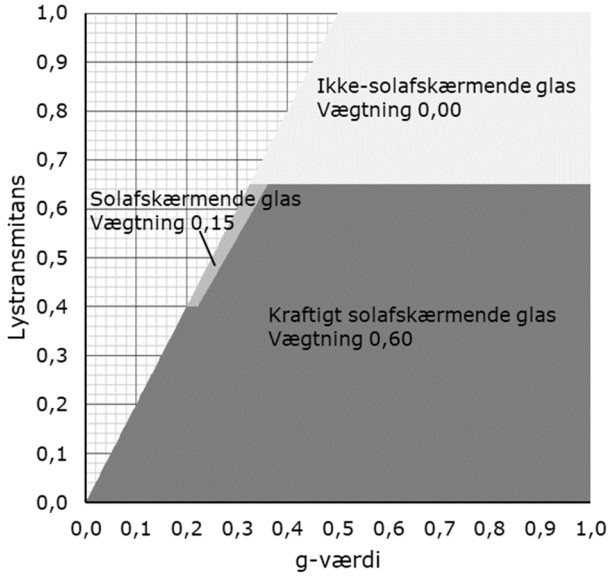
Tabel 24 Egenskaber for de almindeligste regulerbare solafskærmninger. Tabellen er baseret på SBi-anvisning 264 tabel 19, med enkelte justeringer[1] og med tilføjelsen af solafskærmende glas.

Placering	Afskærmningstype	Variant	Udsynsklasse	Vægtning
Udvendig	Persienne, vandrette lameller, grå	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, grå	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, grå	0°	4	0,15
	Lamelskodde, flytbar	Faste	1	0,95
	Lamelskodde, flytbar	Drejelige	2	0,80
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 10 %	1	0,95
	Screen, lys	Åbningsfaktor = 5 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, grå	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Markise, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markise, lys	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markisolette, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
	Markisolette, lys	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
Integreret	Integreret persienne, hvid	Lukket	0	1,00
	Integreret persienne, hvid	45°	2	0,80
	Integreret persienne, hvid	0°	3	0,60
Indvendig	Persienne, vandrette lameller, hvid	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, hvid	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, hvid	0°	4	0,15
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	1	0,95
	Gardiner, lyse	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mellem	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mørke	(Åbningsfaktor = 0 %)	0	1,00
Glas	Solafskærmende glas	Se næste side	4	0,15
	Kraftigt solafskærmende glas	Se næste side	3	0,60

[1] Efter samråd med forfatteren til SBi-anvisning 264.

Solafskærmende glas påvirker udsynet fra bygningen og derfor vægtes det på linje med øvrig solafskærmning. Hvor meget udsynet påvirkes, afhænger af typen og hvordan det afskærmer inden for det synlige spekter. Her benyttes lystransmittansen sammen med forholdet mellem lystransmitansen og g-værdien som indikatorer for hvor godt glasset gengiver forholdene udenfor. Dette er valgt fordi disse værdier tilsammen afspejler hvilken type belægning, der benyttes og samtidig er det værdier, som altid er tilgængelige fra glasproducenterne.

	LT/g ≤ 1,8	LT/g >1,8
0,00 ≤ LT < 0,40	0,60	0,60
0,40 ≤ LT < 0,65	0,60	0,15
0,65 ≤ LT < 1,00	0,00	0,00



Ved funktionsglas i forhold til lyd, sikkerhed og brand kan benyttes værdier for producentens tilsvarende standardrude.

Appendiks C - Forudsætninger for simuleringer af energi og indeklima

Inputs uafhængige af designvariationer

Program:	BSim, version 7.20.6.22		
Vejrdata:	Danmark_2013.dry		
Geometri:	Bruttoareal:	63 m²	
	Nettoareal:	58,8 m²	
Vinduer:	Karmfaktor:	0,85	
	Recess:	1 cm	
	Karm:	Alu/træ	
	Karm, U:	1,55 W/m²	
Brugstid:	Alle uger ekskl. 26 til 31. Ventilation startes dog i op uge 31.		
PeopleLoad:	Component:	Heat Gen.	100 W/person
	Profile:	100% 9-15, 75% i timerne 10, 12 og 14	
	Time:	Mandag til fredag	
Equipment:	Component:	Part to Air:	0,5
	Profile:	100% 9-15, 75% i timerne 10, 12 og 14	
	Time:	Mandag til fredag	
Lighting:	Component:	Gen. Lighting Level:	300 lux
	Time:	Mandag til fredag kl. 7.00-18.00	
Infiltration:	Component:	Basic AirChange:	0,08 h^{-1}
	Profile:	50% 1-24, 100% kl. 8.00-16.00 hverdage	
		50% weekend	
	Time:	Hele året	
Heating:	Component:	MaxPow	100 W/m²
	Profile:	Design Temp:	-12 °C
		Te Min	17 °C
	Time:	Alm. brug 6.00 til 18.00, ellers natsænkning	
Ventilation:	Component:	SEL 1,8 kJ/m³ (Total eff. 0,75, 675 Pa)	
		Max Heat Rec	0,8
		Max Moist Rec	0,6
		Max Power (Heating)	20 kW
Shading.:	Component:	Shading Coeff:	0,2
		Max. Wind	10 m/s

Inputs afhængige af variable designparametre

Mekanisk køling

- *Med køling* sættes Cooling Coil > Max Power til -100 kW.
  Setp. Cooling er fastsat til 24,5 °C

  Køleeffekten er således sat tilstrækkelig høj til at kunne køle luften ned uanset luftmængde og setpunkter. Den maksimalt afsatte køleeffekt varierer imellem 41 og 107 W/m² for de 44.293 simuleringer. Ved egentlig dimensionering vil den maksimale køleeffekt typisk være en anelse mindre end disse effekter, men det er har negligeabel betydning i det store billede.

Termisk masse

Konstruktionsopbygninger vil i praksis kunne variere på et utal af måder. For følgende bygningselementer er kun materialet af de inderste 1-2 lag vigtige. Små variationer i fysiske egenskaber af lagene vurderes ubetydelige sammenlignet med den samlede termiske (eksponerede) masse for de to scenarier, let og tung.

- Tung, eksisterende skole:
  - Ydervæg: U-værdi 0,26 W/m²K
    108 mm hollow clay brick, 125 mm stone wool 39, 108 mm brick 1850
  - Loft: U-værdi 0,35 W/m²K
    13 mm gips, 150 concrete rein. v/c 0,4 C420, 100 mm stone wool 39
  - Indv. vægge: Adiabatisk
    100 mm Concrete lgwt 1200
  - Gulv: Adiabatisk
    22 mm linoleum, 150 mm concrete rein. v/c 0,4 C420

- Let, ny skole:
  - Ydervæg: U-værdi 0,18 W/m²K
    26 mm gips, 190 mm glasuld kl. 36
  - Loft: U-værdi 0,11 W/m²K
    15 mm gips, hulrum (R=0,16), 150 mm concrete rein. v/c 0,4
  - Indv. vægge: Adiabatisk
    26 mm gips, 48 mm stone wool, 26 mm gips
  - Gulv: Adiabatisk
    20 mm wood fiber board hard, 20 mm trinlydsbatts, 80 mm concrete v/c C420, 150 mm

Luftskifter og ventilationsstrategi

- Variationerne 700 til 1600 m³/h omregnes til m³/s ved VAV-faktor på 4. Setp. Indoor Air er sat til 22 °C om sommeren og 21 °C om vinteren.

Natkøling

- Variationerne 0, 33% og 100% omregnes til 0, 1 og 4 i Part of nom. flow, da VAV-faktor er 4.
- Setpunkt afhænger af variablen ”Natsænkning”
- Top - Te > 3 °C
- Top - Setp. > 2 °C

- Min Inlet Air 16 °C
- CoolingCoil deaktiveret under natkøling
- Aktiv i sommerperioden i tidsrummet 20.00 til 05.00

Solafskærmning

- Variationerne angives som 15, 20 og 25% af skolens brugstid (8.00-15.00 uden sommerferie). For hver af de fire orienteringer (N/S/Ø/V) er Shade Close og Shade Open fastsat, så afskærmningen er aktiv i hhv. 15, 20 og 25% af brugstiden.
- Disse setpunkter for Shade Close og Shade Open anvendes dog i hele tidsrummet 7.00 til 18.00, så afskærmningen ikke er for ”aggressiv” i perioderne 7.00-8.00 og 15.00-18.00.
- Uden for ovennævnte perioder (dvs. primært aften og weekender) anvendes hhv. 5000 lux og 4500 lux for at sikre at afskærmningen fjerner så meget solvarme som muligt, når skolen ikke er i brug

Belysning

- Variationerne 10 W/m², 5 W/m² og 5 W/m² inkl. regulering omregnes til General Lighting i kW.
- Uden regulering sættes Desired Light Level til 100.000 lux, så belysningen ikke nedreguleres.
- Med regulering sættes Desired Light Level til 300 lux.

Glas-gulv-%

- Variationerne for Glas-gulv-% omregnes i BSim til hulareal i facaden ved karmfaktor på 0,85. Vindueshullet centreres i facaden.

Udhæng

- Variationerne for udhængets dybde på hhv. 0, 0,5, 1 og 1,5 angives som Overhang > Top > Depth for Windoor.

Natsænkning

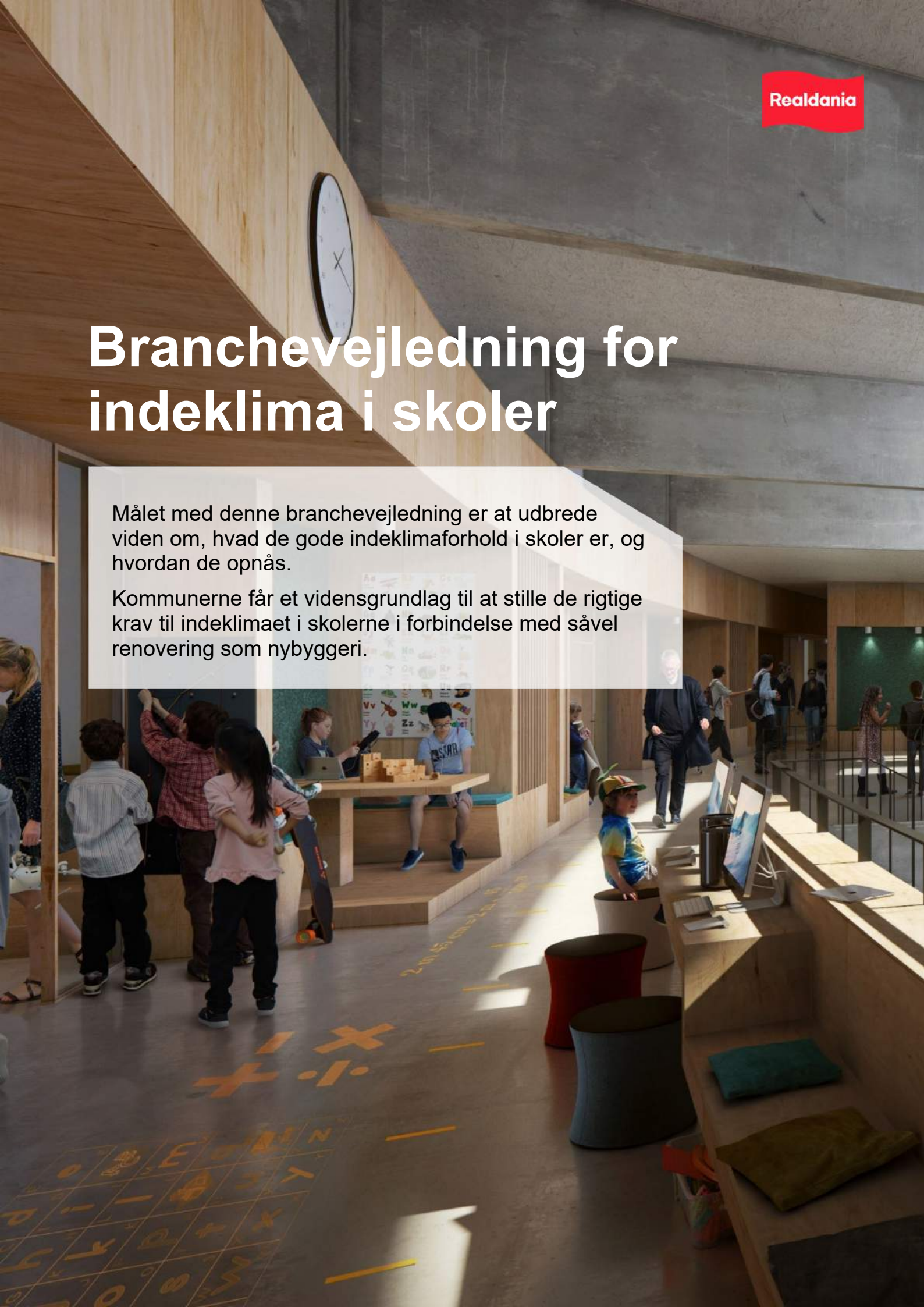
- Variationerne på 18 og 21 °C angives for følgende systemer:
    - HeatCoolCtrl > Setpoint. Denne er altid aktiv udenfor brugstid.
    - Ventilation > NightCoolCtrl > Set. Top. Denne er aktiv alle dage om sommeren i tidsrummet 20.00 til 5.00.

Kold start

- Ved kold start tillades setpunktet at være 1 °C lavere ved elevernes ankomst end det anbefalede minimum på 22 °C.
- Da ventilationen startes kl. 6.00, angives således et setpunkt på 21 °C i tidsrummet 6.00 til 9.00, når ”kold start” forudsættes. Ligeledes sænkes setpunktet for opvarmningen til 21 °C i samme tidsrum.

Energifaktorer og COP

- Energifaktor, varme: 0,85
- Energifaktor, el: 1,9
- COP, køleflade: 3



Branchevejledning for indeklima i skoler

Målet med denne branchevejledning er at udbrede viden om, hvad de gode indeklimaforhold i skoler er, og hvordan de opnås.

Kommunerne får et vidensgrundlag til at stille de rigtige krav til indeklimaet i skolerne i forbindelse med såvel renovering som nybyggeri.