



Energieffektiv renovering af skoler Dagslys, naturlig ventilation og naturlige materialer

Resultater fra en pilotundersøgelse NOTECH
løsning vs. mekanisk ventilation

Elforsk 350-048

Carlo Volf, Klaus Martiny, Mathias Andersen, Bodil E Pallesen Jakob Markvart, Kjeld Johnsen



Energieffektiv renovering af skoler Dagslys, naturlig ventilation og naturlige materialer

Resultater fra en pilotundersøgelse NOTECH
løsning vs. mekanisk ventilation

Indhold

Resumé	5
Summary	6
Introduktion	7
Metode	9
Beskrivelse af systemer.....	10
Mekanisk-løsning	10
NOTECH-løsning	10
Beskrivelse af dataindsamling	13
Resultater	14
Diskussion	18
Indeklima	18
Energi	19
Økonomi	20
Indlejret CO ₂ i byggematerialer	21
Konklusion	22
Referencer	24

Tak til

Denne rapport er støttet af Elforsk, projektnummer 350-048 og A & E Danielsens Fond. Forfatterne vil herudover gerne takke Velfac A/S, Windowmaster A/S, Region Hovedstaden, Skovbrynet Skole, Gladsaxe Kommune, Sustainable Build, samt Advanced Nonwoven. Januar 2021.

Resumé

I gennem de seneste årtier har energikrav og arkitektur forandret den måde, vi planlægger skoler og deres indeklima. Specifikke krav til lufttilførsel i kombination med krav til energirammer i Bygningsreglementet fra 1995 (BR95) har ført til at næsten alle skoler efter 1995 er opført som "lufttætte" bygninger med mekanisk ventilation og varmegenvinding.

Ser man tilbage i tiden, har dette dog langt fra altid været gængs praksis, hverken indenfor skolebyggeri eller byggeriet generelt i Danmark. Denne artikel beskriver en ny behovsstyret indeklimaløsning, kaldet NOTECH, baseret på naturlig ventilation. I projektet undersøges NOTECH løsningens indvirkning på indeklima og energiforbrug i en grundskoleklasse. I undersøgelsen sammenlignes et klasselokale med NOTECH systemet med et andet klasselokale med en konventionel løsning, baseret på mekanisk ventilation.

Resultaterne af undersøgelsen peger på, at mekanisk ventilation ikke altid behøver at være den mest bæredygtige løsning og, at der findes andre veje, når det gælder et godt indeklima på skoler. Overordnet viser resultaterne at både det behovsstyrede, naturlige ventilationssystem NOTECH og det mekaniske ventilationssystem, ved en belastning på 16 elever og 1-2 undervisere, kan opnå tilfredsstillende CO₂-niveauer på under 1000 ppm, indendørs komforttemperaturer, relativ luftfugtighed og støjniveauer.

Resultaterne af undersøgelsen viser samtidigt store forskelle imellem de to systemer når det gælder samlede installationsomkostninger og estimerede driftsomkostninger til elektricitet, opvarmning og vedligeholdelse. Disse omkostninger viser sig, at være markant lavere for NOTECH-løsningen, og udgør kun omkring 35 % af det mekaniske ventilationssystem. Endelig viser resultaterne, at NOTECH-løsningen giver mindre CO₂-belastning for indlejrede byggematerialer, og derved reducerer det samlede CO₂-aftryk med 95 % sammenlignet med den mekaniske ventilationsløsning.

Summary

Over the past few decades, energy requirements and architecture have changed the way we plan schools and their indoor climate. Specific requirements for air supply in combination with requirements for energy frames in the Building Regulations from 1995 (BR95) have led to “airtight” buildings with mechanical ventilation and heat recovery. Looking back in time, however, this has far from always been common practice, neither when it comes to schools nor the built environment in general in Denmark.

This article describes a pilot project where we developed and tested a new demand-controlled indoor climate solution, called NOTECH, based on natural ventilation. The project investigated the impact of the NOTECH solution on indoor climate and energy consumption. The study was carried out in a primary school, comparing a classroom with the NOTECH system with another classroom with a conventional solution, based on mechanical ventilation.

The results of the study indicate that mechanical ventilation is not always the most sustainable solution and point to other paths when it comes to obtaining and maintaining a good indoor climate in schools. Overall, the results of the project show that both the demand-controlled natural ventilation system NOTECH and the mechanical ventilation system, at a load of 16 students and 1-2 teachers, could achieve satisfactory indoor comfort temperatures, relative humidity and noise levels, as well as CO₂ levels under 1000 ppm.

In contrast, the results of the study show large differences between the two systems in terms of total installation costs and estimated operating costs for electricity, heating and maintenance. These costs turn out to be significantly lower for the NOTECH solution, amounting to a level of only 35% of the mechanical ventilation system. Finally, the results show that the NOTECH solution provides a much smaller embedded CO₂ load for building materials, reducing the overall CO₂ footprint by 95% when compared to the mechanical ventilation solution.

Introduktion

Historisk set har naturlig ventilation været den eneste mulige måde, at bringe frisk luft ind i en bygning på. Forskellige arkitektoniske løsninger har op igennem tiden draget nytte af naturlig, termisk opdrift i den opvarmede "brugte" luft. På den måde skabte den naturlige opdrift et undertryk i bygningen som igen kunne trække frisk luft udefra ind i bygningen. I den tidligste arkitektur blev bygninger konstrueret som "ventilationsmaskiner", der kunne skabe en naturlig luftstrøm, og et balanceret termisk indeklima, baseret på friskluftindtag direkte gennem facader og vinduer. Ordet 'vindue' stammer fra denne tradition, de oprindelige betydninger 'vindr - vind' og 'auga - øje' antyder på den måde, at vinduet tjente begge funktioner; dels at give adgang til frisk luft og dels at skabe udsyn (1, 2). Indtil midten af det 20. århundrede var vinduer, facader og arkitektur, helt centrale elementer i bestræbelserne på, at skabe et godt og balanceret indeklima, baseret på naturlig ventilation.

Gennem det seneste århundrede har den arkitektoniske praksis og planlægning dog ændret sig grundlæggende, også når det gælder planlægningen af indeklimaet. Oprindeligt, i den første halvdel af århundredet, var skoler bygget til naturlig ventilation, med højloftede rum og høje vinduer som integrerede, funktionelle dele af planlægningen af indeklimaet. Men med introduktionen af mekanisk ventilation i efterkrigstiden bliver den arkitektoniske planlægning forandret op igennem 1960'erne og 1970'erne. Mekanisk ventilation muliggør lavere etagehøjder, nedsænkede loftshøjder, mindre klasserum, samt mindre og lavere vinduespartier, ikke længere konstrueret med henblik på naturlig ventilation.

Set i dette perspektiv har mekanisk ventilation en kort tradition i Danmark, med en almindelig praksis, som begynder i efterkrigstiden efter 1945. Flere mekaniserede løsninger, muliggjort af bl.a. billigere elpriser, erstatter på dette tidspunkt tidligere praksis, heriblandt naturlig ventilation.

I 1980'erne bliver det klart, at flere skoler har problemer med indeklimaet på grund af utilstrækkelig ventilation. Derfor bliver der i det danske bygningsreglement i 1995 (BR95) (3, 4) for første gang indført et minimumskrav til ventilation på skoler og institutioner. Et krav som dybest set bliver sat som et krav til mekanisk ventilation, men som fortsat muliggør naturlig ventilation "ved at bruge designforanstaltninger, såsom større rumvolumener pr. person, eller optimerede ventilationsløsninger, herunder krydsventilation." Kravene blev formuleret på den måde for at undgå opførsel af skoler med naturlig ventilation, udelukkende baseret på ventilation gennem facadevinduer. De efterfølgende bygningsreglementer, BR10 og BR15, indføres imidlertid strengere krav til energiforbrug og nu stilles der endvidere krav om, at CO₂-indholdet ikke må overstige 1000 ppm. Stramninger af energirammen, sammen med krav om effektiv varmegenvinding for ventilation i BR10, medfører i praksis en drastisk begrænsning i brugen af naturlig ventilation, indtil muligheden for naturlig ventilation i praksis helt bliver fjernet i BR18. Her beskrevet i § 447:

Opholdsrum i daginstitutioner, undervisningsrum i skoler og lignende skal ventileres med et ventilationsanlæg, der omfatter både indblæsning og udsugning, samt varmegenvinding, der forvarmer indblæsningsluften.

Stk. 2. I daginstitutioner skal indblæsningen med udeluft og udsugningen mindst være 3,0 l/s pr. barn og mindst 5,0 l/s pr. voksen, samt 0,35 l/s pr. m² etageareal. I undervisningsrum i skoler og lignende skal indblæsningen med udeluft og udsugningen være mindst 5,0 l/s pr. person, samt 0,35 l/s pr. m² etageareal. I daginstitutioner og undervisningsrum i skoler og lignende skal det tillige sikres, at det maksimale CO₂-indhold i indeluften ikke overstiger 1.000 ppm for de dimensionerende forhold.

Stk. 3. Hvis der benyttes ventilationsanlæg med behovsstyret ventilation, kan der afviges fra de angivne luftmængder, når der er et reduceret behov. Ventilationen i brugstiden må ikke være mindre end 0,35 l/s pr. m² etageareal.

Kravet om mekanisk ventilation, sammen med den stramme energiramme, har betydet at arkitekturen i Danmark, bortset fra enfamiliehuse, idag ikke længere kan benytte naturlig ventilation. Derfor er byggeriet baseret på stort set lufttætte bygninger med fuld mekanisk ventilation.

Projektet her undersøger i den forbindelse, hvorvidt et behovsstyret NO-TECH-system kan være et alternativ til mekanisk ventilation ved renovering af eksisterende skoler. Projektet undersøger om systemet kan imødekomme indeklima krav (IEQ) og samtidigt bidrage til, at reducere den samlede CO₂-belastning til drift, installation samt byggematerialer. I modsætning til eftermontering af mekaniske ventilationsløsninger inkluderer naturlig ventilation nemlig hverken nedsænkede lofter, ventilationskanaler eller vedligeholdelse, hvilket ofte repræsenterer både dyre og omfattende ændringer i eksisterende arkitektur og bygningskonstruktion.



Metode

Metodisk sammenligner undersøgelsen effektiviteten af NOTECH-løsningen med en traditionel, mekanisk ventilationsløsning. Begge systemer implementeres i to ens klasseværelser, begge med østvendte facader. Skovbrynet Skole i Gladsaxe danner rammerne for undersøgelsen. Skovbrynet Skole er en offentlig skole opført i 1960'erne og efterfølgende renoveret i 2002. De to ens klasseværelser, inkluderet i undersøgelsen, er begge dimensioneret til 24 - 28 elever. Hver klasseværelse har i forsøgsperioden i alt 16 elever og 1-2 lærere. Begge klasseværelser måler 9,5 x 8,6 m svarende til 81 m². Klasseværelset med det mekaniske ventilationssystem har et nedsænket loft med en loftshøjde på 2,7 m, imens klasselokalet med NOTECH-systemet har fuld loftshøjde, svarende til 3,2 m, fordi NOTECH er et facadebaseret ventilationssystem. Således er rum volumener henholdsvis 220 m³ for det mekaniske system og 262 m³ for NOTECH-systemet. En forskel i volumen, der betragtes som typisk og repræsentativ fimellem de to forskellige systemer.

De to klasseværelser er helt ens i valg af materialer, indretning og møblement, bortset fra facader, hvor NOTECH-systemet introducerer naturlige isoleringsmaterialer (i form af bl.a. ålegræs) og højtransmittante vinduer, i form af jernfatige 2-lags ruder ($g = 0,72$ og $LT = 0,82$). Referenceklassen baseres på konventionelle materialer (i form af bl.a. mineraluld) og standard vinduer ($g = 0,60$ og $LT = 0,74$). Samlet glasareal i klasseværelset med NOTECH-løsningen er 14 m² (svarende til glas-gulvflade ratio 17,3 %). Samlet glasareal for den mekaniske løsning er 16,1 m² (svarende til glas-gulvflade ratio på 19,9 %). Begge klasseværelser har i øvrigt udvendig, centralt styret solafskærmning, samt to mindre sidehængte åbne/lukke vinduer.

Beskrivelse af systemer

Ventilationsprincipperne i de to klasseværelser er fundamentalt forskellige. NO-TECH-systemet i test-rummet består af et passivt, naturligt ventilationssystem, baseret på laminar ventilation (LAF), termisk drevet, mens det mekaniske ventilationssystem i referencerummet består af et centralt, mekanisk drevet ventilationsanlæg, baseret på turbulent ventilation (TAF). Begge systemer opfylder minimumskraverne i BR18 på 5 l/s pr. elev og 0,35 l/s pr. m² gulvareal. Ventilationen i referencerummet svarer til de øvrige klasseværelser på Skovbrynet Skole. I klasseværelset med NOTECH-løsningen bliver luftindtag og luftaftag fra det mekaniske ventilationssystem blokeret i hele forsøgsperioden.

Mekanisk løsning

Det mekaniske ventilationssystem er baseret på et standard, centralt system, som betjener en række andre klasselokaler (i alt 28 klasseværelser). Systemet bliver drevet af motorer, med en installeret effekt på 2x4 kW, behovsstyring sker ved hjælp af en timer funktion i CTS-systemet. Kapaciteten for det mekaniske ventilationssystem er dimensioneret til en maksimal luftstrøm på ca. 500 m³/h pr. klasselokale. Under eksperimentet estimeres luftstrømmen til, at køre på ca. 80 % af den fulde kapacitet.

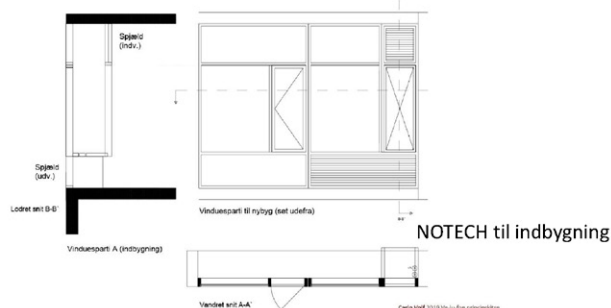
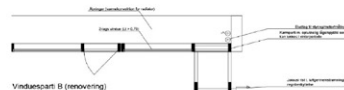
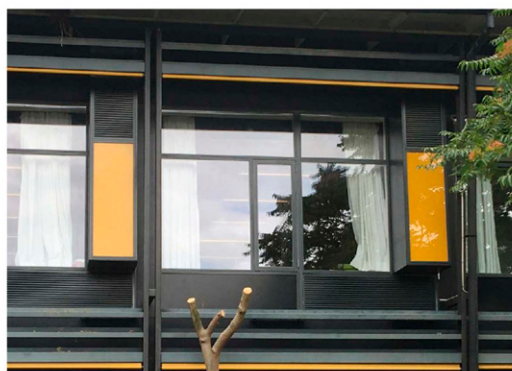
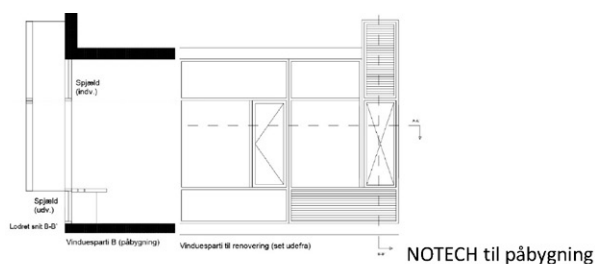
NOTECH løsning

NOTECH-systemets kapacitet er dimensioneret til en maksimal luftstrøm på ca. 750 m³/h pr. klasse-lokale. NOTECH-systemets behovsstyring indstilles til en anslået luftstrøm, estimeret til 50 % af fuld kapacitet, baseret på antallet af elever. Styringen bliver indreguleret to gange, den 6. oktober 2019 fra 20 °C til 22 °C og igen 20. december til 21,5 °C. De senere justeringer er baseret på et ønske om at optimere og afbalancere ventilationshastigheden og samtidig sikre, at ingen elever eller lærere oplever rummet for koldt. NOTECHs samlede luftudtag er 0,7 m² med en gennemsnitlig lufthastighed 0,3 m/s. Luftindtaget er større, 2,1 m² svarende til ca. tre gange luftudtagets areal, hvilket muliggør en høj luftstrøm uden trækgener. Samtidig designes NOTECH-systemet til, at reducere støj, med ålegræs som støjreducerende, akustisk materiale. NOTECH-systemet inkluderer også to solskorstene, hvilket muliggør højere ventilationshastigheder på solrige dage. Solskorstenes effekt vurderes at kunne medføre øget ventilation/passiv køling, når det måtte være nødvendigt f.eks. på solskinsdage, særligt i sommerperioden, men denne effekt blev dog ikke undersøgt separat i projektet.

Naturlig ventilation

I stedet for at fokusere på et enkelt indeklima element, integrerer NOTECH systemet tre elementer i en samlet indeklimaløsning. De tre elementer er:

- 1) Naturlig ventilation
- 2) Klare, højtransmittante ruder
- 3) Naturlige materialer



NOTECH er baseret på passiv, ensidig termisk ventilation, samt udnyttelse af solvarmestrålingen som en supplerende kraft til, at forbedre opdrifts- og ventilationseffekten. Solskorstenens ventilationssystem er designet til at reducere høje temperaturer i klasseværelset i sommerperioder. I vinterperioder er NOTECH-løsningen designet til i højere grad, at drage nytte af sollys og passiv solvarme ved hjælp af de højtransmittante ruder.

Højtransmittante ruder

Systemet introducerer vinduer med høj transmittans i form af 2-lags klare, jernfattige ruder. De øger mængden af transmitteret dagslys i form af synligt lys, UV- og IR-lys (5). Vinduerne tillader en klarere udsigt ud og de tillader, at noget UV-B lys trænger ind, hvilket potentielt kan have positive sundhedsmæssige virkninger, heriblandt dannelse af D-vitamin (6) samt antiseptisk virkning på bakterier og vira, etc. (7). En høj g-værdi af ruderne betyder øget passiv solvarme i opvarmningssæsonen, som rent styringsmæssigt i NOTECH bliver balanceret i forhold til en øget risiko for flere timer med overtemperaturer i sommerperioden.

Naturlige materialer

Systemet introducerer traditionelle, naturlige materialer kombineret med ny teknologi i form af intelligent, behovsstyret naturlig ventilation. De naturlige materialer er ålegræs. Ålegræs er et materiale som er kendt for at have en rensende indvirkning på luften og anvendes traditionelt i madrasser og indendørs møbler etc. Når ålegræs anvendes i større mængder, bidrager disse naturlige materialer til at opretholde en højere, mere naturlig, relativ luftfugtighed, idet ålegræs er et hygroskopisk byggemateriale, som kan absorbere og frigive fugt (8). På den måde introduceres ålegræs for at hjælpe med at balancere den naturlige luftfugtighed og opretholde en relativ luftfugtighed over 40 % RH, som er den anbefalede minimumstærskelværdi (9, 10).



Beskrivelse af dataindsamling

I projektet blev gennemsnitlige timeværdier af CO₂-koncentration, relativ luftfugtighed, støj og temperaturværdier analyseret for de repræsentative uger (Tabel 1) som gennemsnitlig, kumuleret hyppighed af CO₂-niveauer, % relativ luftfugtighed, temperatur og støjniveauer.

Tabel 1. Oversigt over dataindsamlingsperiode og tidsplan for sommer- og vintermålinger

PERIODE	Baseline måling	Effekt målinger	Repræsentativ periode
Sommer	08.03.19.-15.03.19	15.08. - 21.10.2019	26.08.19 - 15.09.19
Vinter (fyringssæson)		22.10.2019 - 11.3.2020	17.02.20 - 11.03.20

Driftsomkostningerne til elektricitet, eksklusive belysning, blev beregnet i begge systemer i kr. pr. elev pr. måned. Det samlede estimerede elforbrug blev baseret på en kWh-pris på kr. 2,25 med et anslået gennemsnit på 20 børn i hvert klasseværelse, 7 h pr. dag, 25,2 dage pr. måned (200 dage pr. år).

Driftsomkostningerne til varme for begge systemer blev baseret på målinger ved hjælp af digitale lsta-fordampningsmålere. Fordampningsmålerne blev monteret direkte på radiatorerne i hvert klasseværelse 0,5 m over gulvniveau. Installationen blev udført samme dag, og fordampningsmålere blev overvåget hvert 15. minut i opvarmningssæsonen. For at repræsentere et realistisk skolemiljø, blev beregningen af energiforbrug til el og varme baseret på i alt 10 klasseværelser for begge systemer.

Parametre inkluderet i beregningen af estimerede installationsomkostninger blev baseret på estimerede priser fra leverandører af hvert system, baseret på i alt 10 klasseværelser for begge systemer for, at repræsentere et realistisk skolemiljø.

NOTECH-systemet blev behovsstyret ud fra tre parametre: brugstid, temperaturniveau samt CO₂-niveau. Det mekaniske ventilations system blev styret ud fra brugstid som eneste parameter.

Den estimerede LCA-analyse blev baseret på den europæiske standard ECO2 CO₂ aftryk, gældende for materialer og produkter med fokus på bygningsprodukter i træ (18). Analysen blev baseret på data og beskrivelse af materiale fra leverandørerne. Materialeberegninger for det mekaniske system blev baseret på et centralt, mekanisk ventilationssystem, Danvent Combi Aggregate TC, med varmegenvinding samt galvaniserede stålskanaler. Materialeberegning for NOTECH-systemet blev baseret på 2 stk. IoT-styrede accentuatorer (WMX 804) i stål og 4 stk Klimatek-spjæld i aluminium med 24 V Belimo-motorer.

Resultater

De overordnede resultater af indeklimamålingerne og den indendørs luftkvalitet viste følgende forskelle mellem de to systemer.

CO₂-niveau

CO₂-niveauer for det mekaniske ventilationssystem var lavere end 1.000 ppm 100 % af skoletiden og 95 % af skoletiden for NOTECH-systemet, i perioden fra 26. august til 15. september 2019. CO₂-niveauer over 1.000 ppm blev nået i korte perioder på 10-15 minutter for NOTECH-systemet. I disse perioder oversteg CO₂-niveauet 1.200 ppm 0,8 % af tiden. CO₂-niveauer for det mekaniske system var generelt lavere end for NOTECH-systemet. I gennemsnit var CO₂-niveauerne 600 ppm for det mekaniske system mod 800 ppm for NOTECH-systemet. Højere CO₂-niveauer blev observeret i sommerperioden end i vinterperioden for NOTECH.

Indetemperatur

Indetemperaturer for NOTECH-systemet var typisk ca. 2 - 2,5 °C lavere end for det mekaniske system. NOTECH-systemet opnåede komforttemperaturer på 20-24 °C i 25,2 % af tiden i sommerperioden, uden timer med temperaturer over 27 °C (0 % af skoletiden (8:00 - 15:00)). Det mekaniske system opnåede komforttemperaturer på 20-24 °C 15,3 % af tiden om sommeren, med timer med temperaturer over 27 °C ca. 5 % af brugstiden.

De højtransmittante ruder ($g = 0,72$) i NOTECH-systemet forårsagede ikke flere timer med overtemperaturer i den analyserede sommerperiode. Temperaturer over 26 °C blev observeret 18,5 % af tiden for NOTECH-systemet sammenlignet med 21 % af tiden for det mekaniske system.

Temperaturen om vinteren var lavere for NOTECH med de laveste observerede temperaturer i intervallet mellem 20 og 21 °C 18,8 % af tiden, mens der ikke blev observeret temperaturer under 21 °C i klasseværelset med det mekaniske system.

Relativ luftfugtighed

Resultater af målingerne i sommerperioden viste, at den relative luftfugtighed var næsten ens for de to systemer. Dette til trods for at temperaturerne generelt var højere i klasselokalet med det mekaniske system. I vinterperioden var den relative luftfugtighed for NOTECH-systemet højere, med mellem 35-45 % RH 39,9 % af tiden mod 4,9 % for det mekaniske system. De generelle indendørs temperaturer var dog højere for det mekaniske system om vinteren, hvilket kan være årsagen til den lavere relative fugtighed.

Støjniveau

Støjniveauet dB (A) i skoletiden viste ingen målbare forskelle mellem de to forskellige systemer. Støjniveauer over 45 dB (A) var generelt hyppigere i sommerperioden for begge systemer (37,8 % NOTECH-system - 39,5 % mekanisk

system). Imens støjniveauer over 45 dB (A) generelt var mindre hyppige i vinterperioden (26,6 % NOTECH-system - 24,5 % mekanisk system). Høje værdier for CO₂, temperatur, luftfugtighed og støj fulgte generelt højere aktivitet og personbelastning i begge klasselokaler.

Dagslys

De gennemsnitlige dagslysniveauer indendørs var ikke målbart forskellige for de to systemer, selvom mere dagslys blev transmitteret gennem 2-lags jernfattede ruder i NOTECH-løsningen, sammenlignet med standardruderne i den mekaniske løsning. Den højere lystransmittans blev modsvaret af et reduceret glasareal i NOTECH systemet. Glasarealet i klasseværelset med det mekaniske system var på i alt 16,1 m², mens glasarealet i klasseværelset med NOTECH-systemet var 14 m². NOTECH havde således 87 % af glasarealet i referenceklasseværelse med mekanisk ventilation. Forskelle mellem klasselokalerne var visuelt synlige på grund af forskelle i loftshøjde og det reducerede glasareal, forårsaget af NOTECH ventilationen, der optog et areal på BxH: 1,05 m x 2 m (2,1 m²) af det samlede glasareal. Sidstnævnte påvirkede dog ikke vindueshøjden og reducerede derved ikke dagslysniveauerne dybt i klasseværelset med NOTECH-systemet.

Energiforbrug

Estimerede energiomkostninger til elektricitet blev beregnet for begge systemer, baseret på i alt 10 klasseværelser med 20 elever, en brugstid på 7 timer om dagen og 25,2 dage om måneden, svarende til 200 dage årligt, baseret på en kWh-pris på Kr. 2,25. Estimerede årlige driftsomkostninger for elektricitet blev baseret på en levetid på 20 år for begge systemer. Anslåede årlige elomkostninger beløb sig til Kr. 675 per klasselokale med det mekaniske system og Kr. 15 per klasselokale med NOTECH-systemet (Tabel 2).

Tabel 2. Estimeret udgift til elektricitet for NOTECH ventilation vs. mekanisk ventilation, baseret på i alt 10 klasserum

NOTECH	Elforbrug kWh/år per klasserum	7 kWh
	Estimeret udgift til elforbrug kr./år per klasserum	Kr. 15
Mekanisk Vent	Elforbrug kWh/år per klasserum	305 kWh
	Estimeret udgift til elforbrug kr./år per klasserum	Kr. 675

Energiforbrug til opvarmning blev registreret i begge klasseværelser, for henholdsvis NOTECH og det mekaniske system. Energi til opvarmning i fyringssæsonen (oktober-april) blev målt ved hjælp af Ista fordampningsmålere. Resultaterne viste 693 enheder for NOTECH-systemet og 1.351 enheder for det mekaniske system. Overvågning blev udført i to perioder, den første periode var 15.08.2019 - 31.12.2019 og anden periode 01.01.2020 - 01.03.2020.

Baseret på data fra Gladsaxe Kommune var det samlede energiforbrug til opvarmning af Skovbrynet Skole på i alt 1.358 MWh, korrigeret graddage i perioden oktober 2019 - april 2020. For et opvarmet bruttoareal på 11.080 m², giver det følgende gennemsnitlige energiforbrug til opvarmning for de to systemer, baseret på 81 m² klasseværelser og en kWh-pris på Kr. 2,25 (Tabel 3)

Tabel 3. Målt energiforbrug til opvarmning, baseret på Ista-målinger

NOTECH	Energiforbrug, opvarmning 2019/2020	62,9 kWh/m ² per år
Mekanisk Vent	Energiforbrug, opvarmning 2019/2020	122,6 kWh/m ² per år
NOTECH	Udgift til opvarmning per klasserum 2019/2020	kr. 11.463 per år
Mekanisk Vent	Udgift til opvarmning per klasserum 2019/2020	kr. 22.343 per år

Økonomi

De estimerede installationsomkostninger blev beregnet på basis af data fra Skovbrynet Skole og information fra leverandører af NOTECH-systemet (Windowmaster/Velfac), samt det mekaniske system (Dan-Vent). Beregningsmæssigt blev alle installationsomkostninger baseret på 10 klasseværelser, hver med 20 elever for begge systemer, baseret på 20 års levetid. De samlede installationsomkostninger for NOTECH-systemet var ca. 66 % mindre end for det konventionelle, mekaniske ventilationssystem (Tabel 4).

Tabel 4. NOTECH-system vs. mekanisk ventilationssystem. Estimerede investerings- og installationsomkostninger baseret ud fra i alt 10 klasseværelser

NOTECH	Ventilationssystem	kr. 360.000
	Rør, afkast, indblæsning, armaturer, filtre, etc.	kr. 0
	Total installationsudgift (20 år)	kr. 360.000
Mekanisk Vent	Mechanical ventilation system	kr. 300.000
	Rør, afkast, indblæsning, armaturer, filtre, m.m.	kr. 800.000
	Total installationsudgift (20 år)	kr. 1.100.000

De estimerede, samlede årlige omkostninger til energi, installation, opvarmning samt vedligeholdelse, baseret på 20 års levetid, ser således ud.

Tabel 5. Estimerede omkostninger pr. år til energi, installation, opvarmning og vedligeholdelse per klasselokale

Omkostninger	Installation	Energi, el	Energi, opvarmning	Vedligeholdelse	Omkostning I alt
System	kr./klasserum pr. år				
NOTECH	18.000	15	11.463	2.222	31.700
Mekanisk Vent	55.000	675	22.343	8.982	87.000

De samlede, estimerede omkostninger til energi, installation, opvarmning og vedligeholdelse, blev baseret på 20 elever pr. klasselokale og 200 skoledage pr. år, og var henholdsvis Kr. 7,90 pr. dag pr. elev for NOTECH-systemet og Kr. 22,60 pr. dag pr. elev for det mekaniske system. Alt i alt udgjorde de årlige estimerede omkostninger for NOTECH-systemet 35 % af det mekaniske system. Alle driftsomkostninger til elektricitet, varme og vedligeholdelse samt installationsomkostninger blev baseret på en levetid på 20 år, der betragtes som en normal levetid for konventionelle, mekaniske ventilationssystemer.

NOTECH-løsningen var baseret på naturlige materialer og derfor blev CO₂-aftrykket mindre for NOTECH, sammenlignet med det mekaniske system. NOTECH reducerede mængden af indlejret CO₂ med i alt 829 kg. Den konventionelle mekaniske løsning brugte i alt 873 kg CO₂, mens NOTECH-løsningen kun brugte 44 kg CO₂. NOTECH-systemet reducerede således den indlejrede CO₂ i byggematerialerne med i alt 95 % sammenlignet med det mekaniske ventilationssystem.

Diskussion

Formålet med undersøgelsen var at sammenligne NOTECH-systemet med et konventionelt, mekanisk ventilationssystem. Klasselokalerne i undersøgelsen var repræsentative for Skovbrynet Skole og andre skoler fra denne periode, resultaterne bør derfor ses som "proof-of-concept" for denne type skoler. De to klasserum var ens, selvom der var forskellig i volumen på grund af den nedsænkede loftshøjde (0,5 m) i klasseværelset med det mekaniske system - en forskel, som anses for at være repræsentativ for de mekaniske løsninger, da NOTECH som facadeløsning ikke optager loftplads. Ligeledes var der forskel i anvendte isolerings og byggematerialer, som beskrevet i metode afsnittet. Brugen af klasseværelserne var sammenlignelig, og hver af dem havde det samme antal elever i 4. eller 5. klasse i forsøgsperioden.

Indeklima

Luftstrømmen i det mekaniske system blev styret af en timer, mens NOTECH-systemet, ud over en timer, blev behovsstyret efter indholdet af CO₂ og temperaturen i den indendørs luft. Begge systemer kunne holde CO₂-niveauer og temperaturer inden for acceptable grænser under de givne betingelser og i de aktuelle måleperioder. Yderligere undersøgelser er nødvendige for at konkludere, at systemerne også kan opfylde de acceptable niveauer under dimensionerende forhold, det vil sige med 24-28 studerende i klasselokalerne og i koldere vinterperioder.

Den naturlige, temperaturredrevne ventilation i NOTECH giver per definition ikke et konstant luftskifte. Vi forventede at finde lavere CO₂-niveauer generelt i sommerperioden sammenlignet med vinterperioden, på grund af vinduer der kan åbnes og generelt højere udetemperaturer i sommerperioden. Dette var imidlertid ikke tilfældet. NOTECH-systemets behovsstyring og kontrol blev indstillet og justeret i vinterperioden for, at give et højere luftskifte i vinterperioden. I undersøgelsen kunne vi ikke eftervise, hvorvidt de lavere CO₂-niveauer om vinteren skyldtes disse justeringer. Vinduerne kunne åbnes manuelt, ligesom andre ukendte faktorer var til stede, der kunne have indflydelse på dette.

Normalt er vinterperioden "den kritiske" periode for naturlig ventilation, men behovsstyringen af NOTECH-systemet synes, at imødekomme kravene både i sommer- og vinterperioden og give et robust og tilstrækkeligt luftskifte, til en lavere pris i denne pilotundersøgelse. Man skal dog huske på, at vinteren 2019/2020 var mild sammenlignet med en normal dansk vinter.

I vinterperioden havde den relative luftfugtighed en generelt tendens til at være højere for NOTECH-systemet. Den nedre grænse <30 % RH blev nået oftere for det mekaniske system (37,1%) sammenlignet med NOTECH-systemet (9,8 %). Det skal her bemærkes at der generelt var en lavere temperatur i klasseværelset med naturlig ventilation, hvorved de relative fugtigheder ikke er direkte sam-

menlignelige for de to klasseværelser. Sammenhængen mellem den resulterende temperatur og tilhørende relative luftfugtighed fortjener at blive undersøgt nærmere.

De målte gennemsnitlige støjniveauer (dB (A)) var ikke forskellige mellem systemerne. Niveauer over 45 dB (A) var hyppigere i sommerperioden (37,8 % NOTECH - 39,5 % mekanisk system) end i vinterperioden (24,5 % mekanisk - 26,6 % NOTECH-system).

Resultaterne af temperaturmålingerne viste ikke flere timer med temperatur over 26 °C for NOTECH systemet i sommerperioden, sammenlignet med det mekaniske system (18,5% for NOTECH sammenlignet med 21 % for mekanisk ventilation). Faktisk resulterede det mekaniske system i en højere hyppighed af timer med temperaturer over 26 °C (21 %).

Det faktum, at de højtransmittante ruder i NOTECH blev modsvaret af at glasarealet samtidigt blev reduceret med ca. 13 % sammenlignet med det mekaniske system, kan forklare, hvorfor resultaterne viste færre ekstra timer med temperatur over 26 °C i klasseværelset med NOTECH, sammenlignet med klasseværelset med det mekaniske system (18,5 % for NOTECH sammenlignet med 21 % for mekanisk ventilation). Den højere hyppighed af timer med temperaturer over 26 °C (21 %) i det mekaniske system kan også forklares ved, at NOTECH-systemet generelt gav lavere indetemperaturer fordi solskorstene i NOTECH fungerer som et passivt kølesystem i sig selv, der i varme perioder med sol automatisk vil skabe et højere luftskift pr. time.

Forskellen i luftmængder i klasselokalerne kan også have indflydelse på temperaturerne, mens den større loftshøjde, øgede luftmængde og større eksponering af betonloftet fungerer som en buffer, der reducerer overtemperaturer. Samlet set kan disse faktorer alle være med til, at forklare, hvorfor de højtransmittante ruder i NOTECH-systemet viste færre skoletimer med overtemperaturer over 26 °C sammenlignet med det mekaniske system og flere skoletimer med komforttemperaturer mellem 20 - 24 °C (25,2 %) sammenlignet med det mekaniske system (15,3 %), selvom de giver mere transmitteret dagslys og mere transmitteret passiv solvarme.

Energi

Denne undersøgelse fandt flere forskelle mellem de to systemer, når det gælder energiforbrug til installation og drift, samt bæredygtighed. NOTECH-systemet betød generelt lavere estimerede, årlige omkostninger og NOTECH systemet var 65 % billigere end det mekaniske ventilationssystem.

Resultaterne viste, at NOTECH systemet kunne reducere energiforbruget til opvarmning med 59,7 kWh/m² pr. år (62,9 kWh/m² pr. år for NOTECH-systemet sammenlignet med 122,6 kWh/m² pr. år for det mekaniske system). Det svarer til en reduktion på 51 % til opvarmning. Dette var ikke, hvad vi forventede at finde. Fordi NOTECH-systemet er et passivt system, som optager udeluften

direkte uden forvarmning, er energiforbruget til opvarmning baseret på flere, dynamiske faktorer, såsom solvarme-forøgelse, vejr/vind/udendørs og indendørstemperaturer, etc. NOTECH-systemets funktion bør undersøges yderligere, også i kolde vinterperioder. Energiforbruget til opvarmning svinger fra år til år, og data i denne undersøgelse blev indsamlet empirisk i løbet af et år og gennem en mild vinterperiode. En kold vinterperiode kan resultere i koldere indendørs lufttemperaturer eller i et generelt højere energiforbrug til opvarmning og bør undersøges yderligere.

Økonomi

De estimerede installations- og driftsomkostninger for det mekaniske system (Tabel 4 og Tabel 5) er i overensstemmelse med en tidligere undersøgelse (11). Baseret på 10 klasseværelser og 20 års levetid er installationsomkostningerne for NOTECH-systemet anslået at spare 66 % sammenlignet med et konventionelt, mekanisk ventilationssystem. Forskellen mellem de to systemer i estimerede, samlede udgifter (driftsomkostninger til el, varme-, vedligeholdelses- og installation) viser, at NOTECH-systemet er markant billigere end det mekaniske system og samtidigt kun koster 35 % af et mekanisk ventilationssystem i samlede driftsomkostninger. Baseret på et klasseværelse med 20 elever er de estimerede samlede omkostninger for NOTECH Kr. 7,90 pr. dag pr. elev, mens omkostningerne til det mekaniske system er Kr. 22,60 pr. dag pr. elev.

Mere end halvdelen af de danske skoler står i dag over for et behov for energirenovering og forbedring af indeklimaet i form af bedre ventilation. I denne henseende viser resultaterne af denne undersøgelse, at systemer som NOTECH, kan være et alternativ til mekaniske systemer, et alternativ der samtidigt betyder færre og mindre ændringer i eksisterende arkitektur på skolerne, samt mindre CO₂-udledning og mindre energiforbrug.

På denne baggrund bør der stilles spørgsmålstejn ved udviklingen mod ventilation, som kun er baseret på mekaniske systemer. Mekaniske systemer er ikke den eneste løsning og kan suppleres med intelligente, naturlige ventilationssystemer, der kan skabe et afbalanceret indeklima til en billigere pris end de mekaniske systemer. I dag har eksisterende skoler ofte ikke råd til mekaniske ventilationssystemer, intelligente systemer som NOTECH kan være et alternativ der muliggør, at skoler kan undgå dyre, tekniske eftermonteringer, ændringer i eksisterende arkitektur, nedhængte lofter, kanaler, etc. Facadebaserede løsninger, såsom NOTECH-systemet vil ofte være teknisk lettere at implementere end mekaniske systemer, både når det gælder eksisterende og nybyggeri. Dette indebærer, at man kan bibeholde eksisterende loftshøjder, etc., hvilket betyder brug af færre materialer, samtidig med at der opretholdes mere plads, både i form af flere m³ (hvilket betyder øget buffer mod overtemperaturer) såvel som flere etage m² på grund af færre og mindre teknikrum.

Ifølge Danmarks Statistik er der ca. 710.000 elever i 0. - 10. klasse, baseret på en nylig 5-årig periode 2015-2020. Forudsat at 50 % af disse elever går på skoler, der er bygget i 1960'erne og 1970'erne, er der et marked på ca. 355.000 elever.

Forudsat at systemer, såsom NOTECH distribueres i klasselokaler svarende til 25 % af disse 355.000 elever med en besparelse på Kr. 14,70 pr. elev pr. dag, giver det en samlet reduktion i omegnen af 250 Mio Kr. årligt i Danmark, sammenlignet med konventionelle, mekaniske ventilationsløsninger

Indlejret CO₂ i byggematerialer

Ifølge den estimerede LCA-analyse, baseret på det europæiske ECO2-kulstofaftryk til bygningsdata til materialer og produkter med fokus på træbygningsprodukter (11), havde NOTECH-systemet et markant mindre CO₂-fodafttryk, svarende til kun 5 % af det mekaniske systems samlede CO₂-fodafttryk. I den henseende er NOTECH bedre i tråd med fremtidige bæredygtighedskrav som f.eks. LEVEL(s) fra den europæiske kommission og den Frivillige Bæredygtighedsklasse FBK i Danmark (12). Ifølge en ny undersøgelse (13) udgør affald og materialer fra byggebranchen i dag 50 - 83 % af den udledte CO₂ over en periode på 80 år. At gøre en indsats for at reducere CO₂-aftrykket fra byggematerialerne med 95 % er et væsentligt og værdifuldt bidrag til en mere bæredygtig arkitektur og et vigtigt resultat af denne undersøgelse.

Konklusion

Denne pilotundersøgelse kan ses som et "proof-of-concept" for NOTECH-systemet i et typisk skolemiljø på Skovbrynet Skole, opført i 1960'erne og renoveret i 2002. Klasselokalerne er repræsentative for skoler opført i samme periode. Resultaterne er kun repræsentative for lignende tilfælde, ligeledes er nedenstående konklusioner baseret på det specifikke casestudie.

- Med klasselokalernes personbelastning og i betragtning af at NOTECH-systemet blev behovsstyret af indholdet af CO₂ i den indendørs luft, kunne begge systemer overholde både CO₂-niveauet og temperaturen inden for acceptable grænser. CO₂-niveauerne var i gennemsnit lavere for det mekaniske system sammenlignet med NOTECH-systemet.
- Indetemperatur var generelt lavere for NOTECH-systemet sammenlignet med det mekaniske system. NOTECH-systemet resulterede i flere timer med komforttemperaturer mellem 20-24 °C sammenlignet med det mekaniske system og færre timer med temperaturer over 27 °C i sommerperioden sammenlignet med det mekaniske system.
- Den relative luftfugtighed var højere for NOTECH-systemet svarende til en generelt lavere indetemperatur. Den nedre grænse <30 % RH blev nået oftere for det mekaniske system (37,1 %) sammenlignet med NOTECH-systemet (9,8 %). Variationer i temperatur og relativ luftfugtighed havde generelt en tendens til at følge høj aktivitet og personbelastning i klasselokalerne.
- Støjniveauer dB (A) målt i skoletiden viste ingen målbare forskelle mellem systemerne, hvilket indikerer et ens aktivitetsniveau i klasselokalerne.
- Det estimerede, samlede energiforbrug (energiforbrug til el og varme) var lavere for NOTECH-systemet sammenlignet med det mekaniske system. Energiforbruget til opvarmning viste, at NOTECH-systemet kun tegnede sig for 51 % af energiforbruget, svarende til 62,9 kWh/m² pr. år sammenlignet med 122,6 kWh/m² pr. år for det mekaniske system i den testede varmesæson (oktober 2018 - April 2019). Den testede periode var dog, som tidligere nævnt, en mild vinterperiode, hvilket påvirkede energiforbruget. Dette var dog tilfældet for begge systemer.
- De samlede, estimerede installationsomkostninger for NOTECH-systemet udgjorde 35 % af de samlede installationsomkostninger for det konventionelle, mekaniske system i denne undersøgelse. Disse omkostninger kan dog variere fra leverandør til leverandør.
- I løbet af en periode på 20 år var de samlede estimerede driftsomkostninger for NOTECH-systemet 65 % billigere end de samlede estimerede driftsomkostninger for det mekaniske system.

- I livscyklusvurderingen (LCA) over 30 år blev NOTECH-systemet estimeret til at reducere CO₂-emissionen fra byggematerialer, den indlejrede CO₂, med 95 % sammenlignet med det mekaniske ventilationssystem.

Da NOTECH-systemet er et passivt system, der primært bruger energi til opvarmning, er vinterperioden afgørende for NOTECHs samlede energibalance. I denne undersøgelse viste resultaterne, at NOTECH reducerede energiforbruget til opvarmning i en mild vinterperiode - hvilket er det modsatte af hvad man kan forvente i en normal dansk vinter. Dette skal undersøges nærmere.

Denne pilotundersøgelse udfordrer det nuværende Bygningsreglement, når det gælder kravet til mekanisk ventilation. I dag er det obligatorisk at anvende mekaniske ventilationssystemer med varmegenvinding, hvilket forhindrer systemer som NOTECH i at blive anvendt i planlægningen af skoler i Danmark. Resultaterne indikerer, at intelligent behovsstyring af passive, naturlige ventilationssystemer kan være en bæredygtig løsning. En løsning som under de rette forudsætninger vil kunne erstatte et mekanisk ventilationssystem eller supplere mekaniske systemer. Resultaterne af denne undersøgelse viser, at NOTECH-systemet havde et lavere energiforbrug, krævede mindre ændringer i skolens arkitektur og havde et mindre materialeforbrug med mindre miljøpåvirkning. Resultaterne tyder på, at andre typer bygninger med rum med mindre personbelastning end klasselokaler også vil kunne drage fordel af intelligente, behovsstyrede naturlige ventilationssystemer, såsom NOTECH.

Referencer

1. Volf C. Light, Air and Natural Surroundings - Different Hospital Typologies. Aarch 17 Conference Poceedings p. 203 – 226. 2017
2. Hirsch S, Smith A. A view through a window: Social relations, material objects and locality. Volume: 66 issue: 1, page(s): 224-240. July 28, 2017. <https://doi.org/10.1177/0038026117724068>
3. Bygningsreglementet. <https://historisk.bygningsreglementet.dk/tidligerebygreg/0/40>
4. Ministry of Transport, Building and Housing, Copenhagen, 2018. Bygningsreglementet.dk. <https://bygningsreglementet.dk>. In English: BR18_Executive_order_on_building_regulations_2017.pdf
5. Volf C, Hagemann I, Martiny K, Petersen PM. Accessed 14.09.2020: https://researchgate.net/publication/279981028_Window_Glass_Quality_and_Depression. June 2015
6. Wirz-Justice A, Appelt J, Volf C, Matusiak B, Kuhn T, et al. Accessed 14.09.2020: Chapter 4 Daylight in the built environment in the "Changing perspectives on daylight: Science, technology, and culture". A Sponsored Supplement to Science. November 2017
7. Beck SE, Wright HB, Hargy TM, Larason TC, Linden KG. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. Water Res. 2015 Mar 1;70:27-37. doi: 10.1016/j.watres. 2014.11.028. Epub 2014 Nov 28. PMID: 25506761
8. Pallesen Engberg B. Klima, bolig og boformer. Momentum nr 1. Pages 29 – 31. 2020. <https://ipaper.ipapercms.dk/fsek/moMentum/2020/m012020/?page=28>
9. Sterling E M, Rundel A and Sterling T D. Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings. ASHRAE Transactions 1985, Vol. 91, Part 1
10. Wolkoff P, Kjærgaard S K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. Environment International. Volume 33, Issue 6, August 2007, Pages 850-857. https://researchgate.net/publication/6331976_The_dichotomy_of_relative_humidity_on_indoor_air_quality
11. Ruuska A, 2013. Carbon footprint for building products ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products. VTT technology 115, Espoo (2013). <https://vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T115.pdf>
12. According to e.g. the EU-Commission initiative Level(s) <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/levels-common-eu-framework-core-sustainability-indicators-office-and-residential-buildings-part-3>. Together with the Danish pendant <https://trm.dk/nyheder/2020/mere-baeredygtigt-byggeri-med-ny-frivillig-baeredygtighedsklasse/>
13. Birgisdottir H et al. "SBI 2020:04 – Klimapåvirkning fra 60 bygninger – Muligheder for udformning af referenceværdier til LCA for bygninger". 2020. <https://sbi.dk/Pages/Klimapaavirkning-fra-60-bygninger.aspx>