

Naturlig køling og ventilation via diffus loftsindblæsning og termoaktive konstruktioner

Elforsk - projekt 345-061

Per Heiselberg

Chen Zhang

Tao Yu

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektionen Architectural Engineering

DCE Technical Report No. 224

Naturlig køling og ventilation via diffus loftsindblæsning og termoaktive konstruktioner

Elforsk - projekt 345-061

Januar 2017

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Udgivet 2017 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
DK-9220 Aalborg Øst, Danmark

videnskabelige arbejde udført ved Institut for
it skabe dialog, information og kontakt om
rer status af forskningsprojekter, udvikling i
g nyeste forskningsresultater.

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-726X

DCE Technical Report No. 224

Indledning

Moderne lavenergi-kontorbyggeri er meget velisoleret og lufttæt, hvilket har resulteret i et stort behov for køling i brugstiden hele året rundt. I mange kontorbygninger bruges mekanisk ventilation og frikøling med udeluft til at tilvejebringe den nødvendige køleydelse. Men for at undgå træk i opholdszonen må udeluften i vinterperioden opvarmes enten via varmegenvinding eller direkte opvarmning, hvilket reducerer luftens køleydelse og øger luftmængden betragteligt. Dette resulterer i at både elforbruget til lufttransport og anlægsinvesteringen er betydeligt større end nødvendig.

Den bærende ide i dette projekt har været, at energiforbruget til ventilation og køling kan reduceres med mere end 90%, hvis der udvikles en ny teknologisk løsning, der anvender naturlig ventilation i kombination med termoaktive konstruktioner og luftindblæsning gennem et diffust loft. Denne løsning har potentialet til:

- Under anvendelse af naturlig ventilation at tilføre kold udeluft i vinterperioden til kontorbygningen uden at resultere i trækgener for brugerne.
- At lagre varmeoverskuddet i bygningskonstruktionen i brugstiden og udnytte denne til at holde bygningens varm om natten.
- At kombinere udeluftens natkølingspotentiale med passiv energilagring i bygningskonstruktionen i overgangs- og sommerperioder uden at skulle gå på kompromis med rummets akustiske egenskaber
- At udnytte termoaktive konstruktioner til supplerende højtemperaturkøling i de varmeste sommerperioder

Løsningen, hvor ventilation og eksponerede betondæk placeres over et nedhængt loft, resulterer desuden i en æstetisk løsning med større design frihed, blandt andet fordi den naturlige ventilation tilføres over hele loftsfladen og ikke kun ved facaden, og fordi der kan opnås en god akustisk dæmpning i lokalet samtidig med eksponering af betonens termiske masse.

Projektet har omfattet både teoretiske analyser af teknologiens anvendelsesområde og ydeevne samt dokumentation af ydeevne af prototyper via fuldskalaforsøg i laboratoriet. Projektet er gennemført i tæt samarbejde mellem virksomhederne WindowMaster A/S, Spæncom A/S og Troldekt A/S og Aalborg Universitet.

Formål

Projektets overordnede formål har været at udvikle en systemløsning, der kombinerer naturlig ventilation med diffus loftsindblæsning og som med udnyttelse af betondæks termiske egenskaber kan levere ventilation og køling til fremtidens kontorbyggeri året rundt.

Dette kræver både videreudvikling af de enkelte elementer såvel som udvikling og optimering af systemløsningen. Projektets mere specifikke formål har derfor været:

- At udvikle en række potentielle systemkonfigurationer for kontorbyggeri på basis af teoretiske analyser og numerisk simulering af energi og massestrømme

- At teste, udvikle og optimere udvalgte systemkonfigurationer gennem en serie laboratorieforsøg.
- At udvikle styringsstrategier for den optimerede løsning
- At udforme en design guide for projektering

Gennemførelse

Forskning- og udviklingsarbejdet har været opdelt i en række delprojekter og omfatter både teoretiske og eksperimentelle analyser af teknologiens forventede ydeevne og anvendelsesområde samt dokumentation af teknologiens ydeevne via fuldskalaforsøg med prototyper i laboratoriet.

Delprojekt 1 Indledende teoretiske og eksperimentelle analyser:

Formålet med dette delprojekt har været at skabe vidensgrundlaget for udvikling af forslag til udformning af systemløsningen, som kunne videreudvikles og optimeres i delprojekt 2. Delprojekt 1 omfattede følgende aktiviteter:

1. Der opstilles/udvælges et eksempel på en “typisk” kontorbygning, der opfylder fremtidens krav til energiforbrug (BR2020), inklusiv forskellige brugsscenerier.
2. Dette eksempel bruges som udgangspunkt for teoretiske analyser og numerisk simulering med henblik på at definere forventede krav til ventilation, opvarmning og køling og herunder specifikke krav til løsningen, der udvikles. Dette omfatter både detaljerede undersøgelser af energi- og luftstrømme for løsningen (COMSOL, COMIS) samt timebaseret simulering af bygningens energibalance og indeklima (BSim).
3. På baggrund af ovenstående samt resultater fra tidligere gennemførte projekter er der udviklet et konceptforslag til, hvordan naturlig køling og ventilation via diffus loftsindblæsning og termoaktive konstruktioner kan implementeres i fremtidens kontorbyggeri, og hvilke ydeevnekrav en sådan løsning skal kunne opfylde.

Delprojekt 2 Udvikling og optimering af systemløsning:

Formålet med dette delprojekt har været, at undersøge ydeevnen og anvendelsesområde under kontrollede forhold i fuldskala i laboratoriet. Delprojektet 2 omfattede følgende undersøgelser:

1. Undersøgelse af funktionen af diffus loftsindblæsning i kombination med naturlig ventilation. Herunder udvikling og afprøvning af praktiske løsningsmuligheder.
2. Undersøgelse af energilagringkapacitet og varmeafgivelse ved passiv energilagring i betondæk og ved anvendelse af termoaktive konstruktioner placeret over et nedhængt diffust loft med lufttilførsel.
3. Undersøgelse af ydeevnen (ventilation, køling, opvarmning, energilagring) af forskellige driftsstrategier for de vigtigst forekommende driftssituationer.

Delprojekt 3 Udvikling af styringsstrategier:

Formålet med dette delprojekt har været er at udvikle styringsstrategier for de typisk forekommende driftssituationer.

Delprojekt 4 Udvikling af design guide:

Formålet med dette delprojekt har været at samle resultater fra litteraturen og fra undersøgelserne i dette projekt i en design guide for diffus loftsindblæsning.

Projektresultater

I det følgende er projektet resultater i hvert delprojekt kort opsummeret med henvisning til de publikationer (se publikationsliste), hvor en mere uddybende og detaljeret beskrivelse af de foretagne undersøgelser, deres forudsætninger og opnåede resultater kan findes.

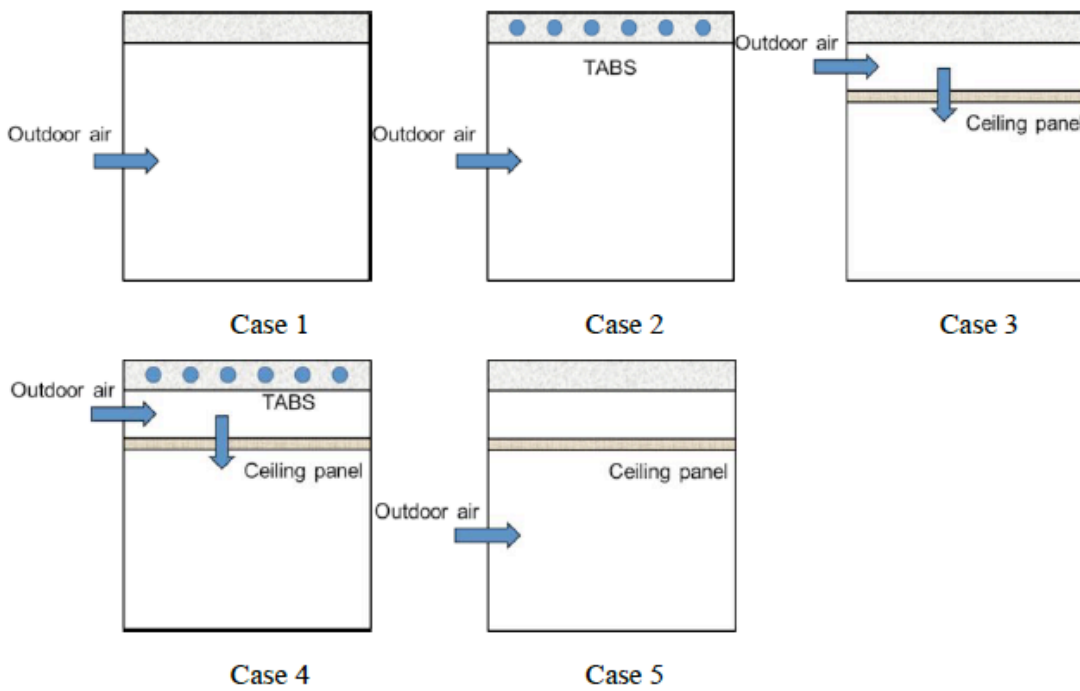
Forskningsmæssige resultater er hovedsageligt publiceret i to PhD-afhandlinger, /16/ og /17/. Derudover er relevante resultater fra projektet samlet i en design guide for diffus loftsindblæsning, /18/.

Delprojekt 1: Indledende teoretiske og eksperimentelle analyser:

Som basis for arbejdet i projektet blev der gennemført et litteraturstudie af diffus loftsindblæsning, /2/. Studiet gennemgik omkring 35 publikationer og konkluderede at diffus loftsindblæsning kunne tilhøre meget kold luft til opholdszonen uden trærisiko for brugerne. Arbejdet identificerede også kritiske områder, hvor vidensniveauet ikke var tilstrækkeligt. Dette vedrørte primært krav til design af luftplenum over det nedhængte loft, således at en jævn fordeling af lufttilførslen til rummet kan sikres samt udformning af det nedhængte loft i forhold til at udnytte kølingspotentialet af rummets termiske masse.

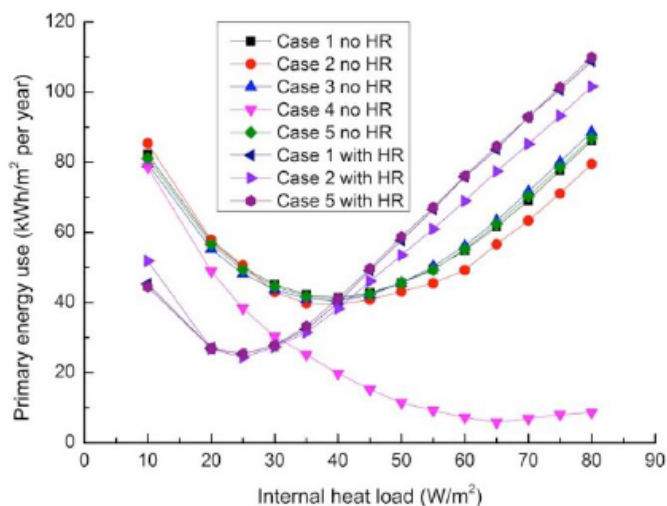
For at dokumentere potentialet for energibesparelser blev der gennemført en række teoretiske analyser og numerisk simulering af funktionen af TABS og diffus loftsindblæsning i henholdsvis en ”typisk” kontorbygning (BR2020) og et typisk skoleklasseværelse/mødelokale, hvor resultaterne blev sammenlignet med andre typiske HVAC løsninger, /1/ og /6/.

Figur 1 viser de 5 forskellige systemkonfigurationer, der blev sammenlignet i arbejdet.

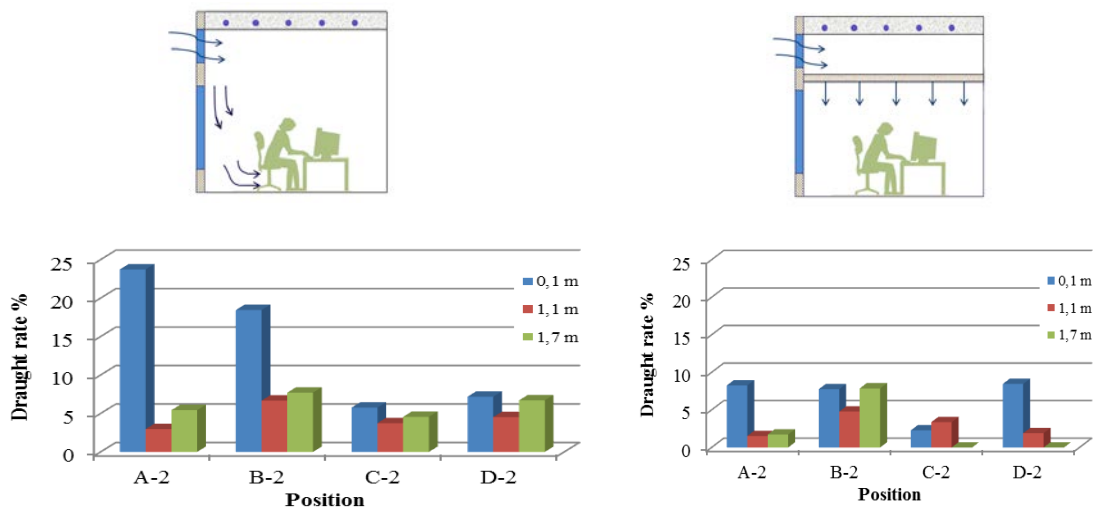


Figur 1. Undersøgte cases. Case 1,3 og 5 er med mekanisk ventilation med og uden varmegenvinding. Case 2 og 4 er med naturlig ventilation. TABS er aktiv i case 2 og 4.

For de fem forskellige systemkonfigurationer blev der gennemført BSim simuleringer for at fastlægge energibesparelspotentialet ved det foreslåede system (Case 4) i sammenligning med energiforbruget ved andre mere traditionelle HVAC-systemer, se figur 2. Sammenligningerne viste meget lovende resultater og et stort potentiale for energibesparelser især i lokaler med middel til høj varmebelastning. For et typisk kontorrum med intern varmebelastning på 30-40 W/m eller højere kan energibesparelspotentialet for det nye system være mere end 50 %.



Figur 2. Samlet primært energiforbrug (varme, køling, ventilator) for et helt år for de undersøgte 5 cases med og uden varmegenvinding.



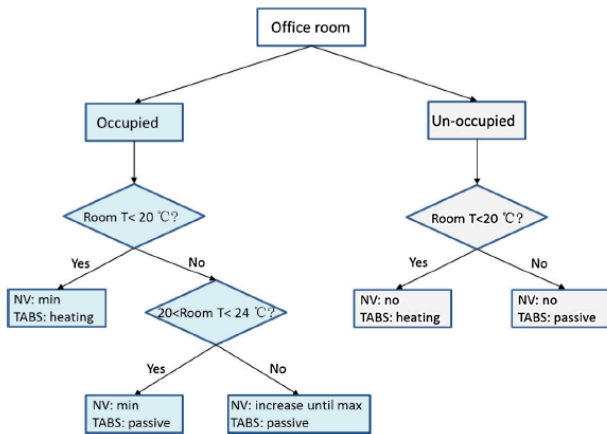
Figur 4. Sammenligning af trækrisiko ved indblæsning til rummet med eller uden diffust loft. Luftskifte 4/h. Indblæsningstemperatur -4°C .

Forsøgene tager meget lang tid at gennemføre og for at gøre det muligt at undersøge funktionen under mange forskellige situationer, blev det besluttet at udvikle en metode til CFD beregning af diffus loftindblæsning i kombination med TABS og validere denne i forhold til de gennemførte målinger. Dette arbejde blev gennemført i samarbejde med Prof. Yan Chen, Pursue University i USA. Det viste sig at være noget vanskeligere end forudset at udvikle en model for diffus loftindblæsning, der både kunne modellere energitransporten korrekt og give den rette luftfordeling. Løsningen blev gennemførelse af 2 efterfølgende beregninger. Først en beregning af energitransporten og derefter en beregning af luftfordelingen. Denne metode viste sig at fungere meget tilfredsstillende og der blev gennemført en lang række beregninger i forbindelse med udvikling af design guiden, /9/ og /10/.

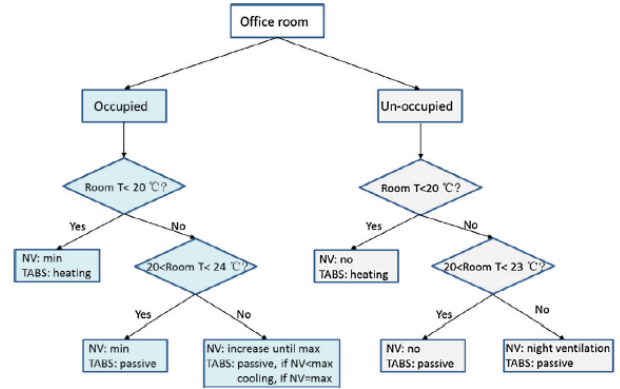
Delprojekt 3 Udvikling af styringsstrategier:

I dette delprojekt blev der udviklet forskellige styringsstrategier for forskellige tidspunkter på året (vinter, forår/efterår og sommer), se figur 5a-c.

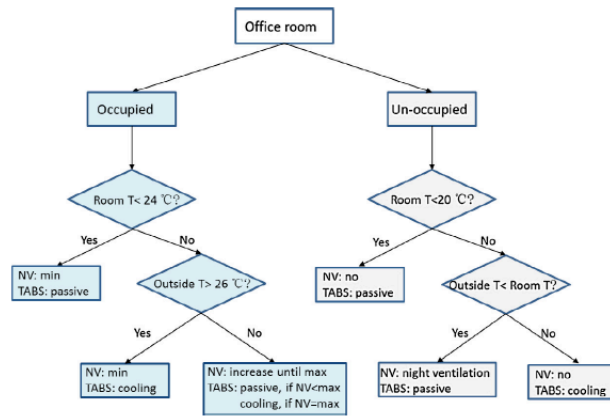
A



B



C



Figur 5. Styringsstrategier for forskellige tidspunkter på året: A) Vinter, B) Forår/Efterår og C) Sommer, /11/.

Styringsstrategierne blev afprøvet via en række dynamiske forsøg i laboratoriet, se tabel 2. Forsøgene viste meget tilfredsstillende resultater, idet systemet var i stand til at kontrollere indeklimaet indenfor de forventede grænser, /11/.

Case number	Typical days	Outside air T (°C)	Internal heat load (W/m ²)	Solar radiation (Wh/(m ² window/day))	Upper/surrounding zone air T(°C)
Case 1	Winter	-1.0±2.5	30	0	22
Case 2	Transitional season	10.9±5.75	30	3432	23
Case 3	Summer	20.0±6.0	30	4848	24

Case number	Time	Ventilation	TABS	Internal heat sources	Solar radiation
Case 1	6:00	Off	Heating	Off	Off
	8:00	Off	Off	Off	Off
	9:00	On (Min)	Off	On	Off
	17:00	Off	Off	Off	Off
Case 2	7:00	On (2×Min)	Off	Off	On
	9:00	On (2×Min)	Off	On	On
	10:15	On (4×Min)	Off	On	On
	17:00	On (2×Min)	Off	Off	On
	19:00	Off	Off	Off	On
Case 3	7:00	On (3×Min)	Cooling	Off	On
	9:00	On (3×Min)	Cooling	On	On
	10:10	On (5.1×Min)	Cooling	On	On
	17:00	On (5.1×Min)	Off	Off	On
	19:40	On (3×Min)	Off	Off	On

Tabel 2. Hovedtal for dynamiske forsøg, /11/.

Delprojekt 4 Udvikling af design guide:

I denne del af projektet blev der udarbejdet en ”projekterings- og anvendelsesguide”, /18/. Denne guide skal benyttes af de tilknyttede virksomheder i deres samarbejde med kunderne i forbindelse med projektering og dokumentation af energiforbrug og bygningens indeklima og medvirke til at sikre et gennembrud i anvendelsen af den udviklede løsning.

I forbindelse med udarbejdelse af guiden blev der gennemført en række CFD beregninger for at afdække en række uklare forhold primært i forhold til projekterings af plenum og sikring af ensartet luftfordeling gennem det diffuse loft, /10/.

Opsummering

Projektet har resulteret i:

- Udvikling af systemløsninger med diffus loftsindblæsning kombineret med forskellige ventilationsformer (naturlig ventilation, mekanisk ventilation, fan-coil) samt passive eller aktive betondæk inklusiv anbefaling til i hvilke situationer forskellige kombinationer (systemløsninger) er velegnede

- Vurdering af systemløsningers anvendelsesområde, anbefaling til styringsstrategier og beregning af energibesparelspotentiale
- Grænser for leveret luftmængde og kølekapacitet under hensyntagen til sikring af termisk komfort og trækniveau.
- Identifikation og dokumentation af indflydelse af væsentlige designparametre som plenum højde, lofts type, rumgeometri, varmebelastning, udeluftmængde og –temperatur,...
- Design guide for diffus loftsindblæsning.

Publikationer

Artikler:

1. Yu, T., Heiselberg, P., Pomianowski, M. Comparison of Energy Performance of Different HVAC Systems for a Typical Office Room and a Typical Classroom. Department of Civil Engineering, Aalborg University, DCE Technical Report Nr. 164, November 2013.
2. Zhang, C., Heiselberg, P., Nielsen, P.V. Diffuse Ceiling Ventilation: A Review. *International Journal of Ventilation*, Vol. 13, No. 1, pp 49-64, June 2014.
3. Yu, T., Lei, B., Heiselberg, P., Pomianowski, M. A Simplified Method for Stationary Heat Transfer of a Hollow Core Concrete Slab Used for TABS. Proceedings of the 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association, Nagoya, Japan, November 28-29, 2014.
4. Yu, T., Heiselberg, P., Lei, B., Pomianowski, M. Validation and modification of modeling thermally activated building systems (TABS) using EnergyPlus. *Int. J. of Building Simulation*, Volume: 7, Issue: 6, Pages: 615-627, Published: DEC 2014.
5. Zhang, C., Yu, T., Heiselberg, P., Pomianowski, M. Experimental Study of an Integrated System with Diffuse Ceiling Ventilation and Thermally Activated Building Constructions. Department of Civil Engineering, Aalborg University, DCE Technical Report Nr. 182, December 2014.
6. Tao Yu, Per Heiselberg, Bo Lei, Michal Pomianowski, Chen Zhang. A novel system solution combining natural ventilation with diffuse ceiling supply and thermally activated building constructions for cooling and ventilation in office buildings: a review of applied technologies and a case study, [ENERGY AND BUILDINGS](#) Volume: 90 Pages: 142-155 Published: MAR 1 2015.
7. Yu, T., Heiselberg, P., Lei, B., Pomianowski, M., Experimental investigation of cooling performance of a novel HVAC system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS. *Energy and Buildings*, Vol.: 105, pp 165-177, Oct 2015.
8. Zhang, C., Heiselberg, P., Pomianowski, M., Jensen, R.L. Experimental study of diffuse ceiling ventilation coupled with a thermally activated building construction in an office room. *Energy and Buildings*, Vol.: 105, pp 60-70, Oct. 2015.
9. Zhang, C., Chen, Q., Heiselberg, P., Pomianowski, M. Airflow pattern and performance analysis of diffuse ceiling ventilation in an office room using CFD study. *Building Simulation Conference 2015*, Hyderabad, India, December 7-9.
10. Zhang, C., Kristensen, M.H., Jensen, J.S., Heiselberg, P., Jensen R.L. Pomianowski, M. Parametrical analysis on the diffuse ceiling ventilation by experimental and numerical studies. *Energy and Buildings*, Vol. 111, pp 87-97, January 2016.
11. Yu, T., Heiselberg, P., Lei, B., Zhang, C., Pomianowski, M., Jensen, R.L. Experimental study on the dynamic performance of a novel system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS. *Applied Energy*, volume 169, pp 218 – 229, May 2016
12. Zhang, C., Heiselberg, P., Pomianowski, M. The effect of diffuse ceiling panel on the energy performance of Thermally Activated Building Constructions. Accepted for IAQVEC

2016, 9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings, October 23-26, 2016, Seoul, South Korea.

Masterprojektrapper offentliggjort på AAU's hjemmeside over studenterprojekter:

13. Analyse og evaluering af luftstrømninger og indeklima ved brug af termoaktive konstruktioner. Anne Sofie Palle og Lise Møllgaard Jensen. Aalborg Universitet, Juni 2013.
14. Analyse af styringsstrategier ved anvendelse af termoaktive dækelementer. Camilla Højgaard Hansen, Tina Østergaard Strømkjær. Aalborg Universitet, Juni 2013.
15. Diffuse Ceiling Ventilation in Danish Classrooms. Martin Heine Kristensen & Jakob Søland Jensen, Aalborg Universitet, June 2015

PhD Afhandlinger:

16. Tao Yu. Thesis title: Energy Performance of a Novel System Combining Natural Ventilation with Diffuse Ceiling Inlet and Thermally Activated Building Systems (TABS). 2015
17. Chen Zhang. Thesis title: Diffuse Ceiling Ventilation – Air Distribution and Thermal Comfort. 2016

Design Guide:

18. Zhang, C, Yu, T, Heiselberg, PK, Pomianowski, MZ & Nielsen, PV 2016, *Diffuse Ceiling Ventilation: design guide*. Aalborg University, Department of Civil Engineering, Aalborg. DCE Technical Reports, nr. 217

ISSN 1901-726X

DCE Technical Report No. 224