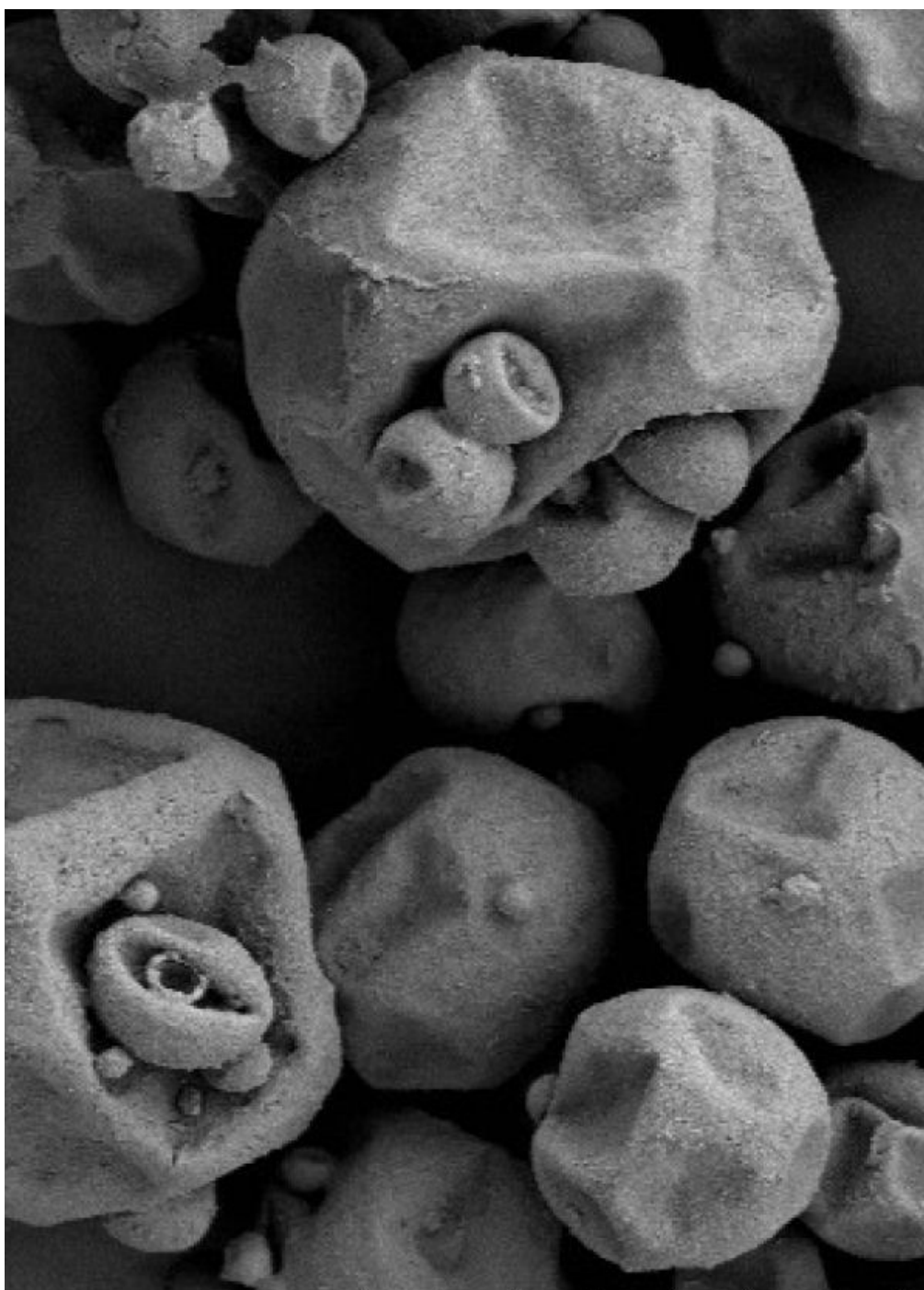


SBi 2011:11

Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger

Forbedring af energieffektivitet og indeklima



Statens Byggeforskningsinstitut
AALBORG UNIVERSITET

Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger

Forbedring af energieffektivitet og indeklima

Jørgen Rose
Rasmus Lund Jensen
Per Heiselberg
Magne Hansen
Ane Mette Kjeldsen
Camilla le Dous
Niels Uhre Christensen

Titel	Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger.
Undertitel	Forbedring af energieffektivitet og indeklima
Serietitel	SBI 2011:11
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2011
Forfattere	Jørgen Rose, Statens Byggeforskningsinstitut Rasmus Lund Jensen, Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet Per Heiselberg, Aalborg Universitet Magne Hansen, Byggeridivisionen, Teknologisk Institut Ane Mette Kjeldsen, Teknologisk Institut Camilla le Dous, Teknologisk Institut Niels Uhre Christensen, Ingeniørhøjskolen i Århus
Sprog	Dansk
Sidetæl	47
Referencer	Side 47
Emneord	Faseskiftende materiale, indeklima, køling, opvarmning, ventilation, energieffektivitet, energiramme
ISBN	978-87-563-1528-9
Tegninger	Forfatterne
Fotos	Forfatterne
Omslag	Mikroindkapslet paraffinvoks i størket tilstand, forstørret ca. 10.000 gange. Foto: Forfatterne).
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut Dr. Neergaards Vej 15, DK-2970 Hørsholm E-post sbi@sbi.dk www.sbi.dk

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

Forord

Denne rapport er afslutningsnotat for PSO 340-045 projektet 'Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger. Forbedring af energieffektivitet og indeklimate'.

Formålet med nærværende projekt er at opbygge grundlaget for anvendelsen af faseskiftende materialer til at forbedre temperaturforholdene om sommeren i fremtidens bygninger. Bygningernes varmekapacitet har stor betydning for at undgå risikoen for overtemperaturer om sommeren og for at reducere kølebehovet. Bygningernes aktive varmekapacitet kan øges markant ved at anvende faseskiftende materialer (PCM), hvor der akkumuleres betydelige energimængder ved selv små temperaturstigninger, når materialet skifter fase fra fast form til flydende.

Med de nye energibestemmelser i Bygningsreglementet fra april 2006, stramningen af bestemmelserne i 2010 og 2015 samt den planlagte introduktion af krav på passivhusniveau vil det være nødvendigt, at fremtidens bygninger kan holdes komfortable om sommeren, uden at det kræver ekstra elforbrug til ventilation og mekanisk køling.

Projektets resultater er formidlet på mange forskellige måder gennem projektperioden. Der er blevet udarbejdet et internationalt conferencebidrag (Rose et al., 2009), som beskriver, hvorledes faseskiftende materialer håndteres beregningsmæssigt i forbindelse med bygningssimulering. Herudover er der udarbejdet adskillige artikler til nationale tidsskrifter, fagblade og aviser samt afholdt foredrag, oplæg og præsentationer i forskellige sammenhænge for at formidle projektets resultater (en samlet liste over formidlingsaktiviteter er givet i kapitlet 'Formidling'). Projektets vigtigste analyse, 'Energi- og indeklimapotentiale', er endvidere beskrevet i detaljer i en separat rapport (Heiselberg, Jensen, Nørgaard & Justesen, 2010). På baggrund af nærværende rapport er der udarbejdet en sammenfatning, (Rose et al., 2011), som har til formål at informere den danske byggebranche om muligheder og potentiale for anvendelsen af faseskiftende materialer i danske bygninger.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Energi og miljø
Maj 2011

Søren Aggerholm
Forskningschef

Indholdsfortegnelse

Forord	3
Indholdsfortegnelse	4
Indledning	5
Baggrund.....	5
Formål.....	6
Metode	6
Videnopsamling	8
Test og modelopbygning	10
Forsøg med PCM i mørtel og beton	10
PCM-mørtel.....	12
PCM-Beton.....	13
PCM-Flydemørtel.....	15
Forsøg med PCM i EnergyFlexHouse (EFH)	15
Konklusion.....	21
Modellering i BSim og Be10	22
Indledning.....	22
Matematisk model.....	22
Varmeledning i konstruktioner	22
Modellering af faseskiftende materialer	23
Validering	24
Beregningseksempler	27
Case study	28
Diskussion.....	32
Konklusion.....	32
Implementering af PCM beregning i Be10	32
Energi- og indeklimapotentiale	34
Indledning.....	34
Parametervariation.....	34
Modelbeskrivelse	36
Resultatbehandling	39
Konklusion.....	41
Anvendelses- og videreudviklingspotentiale	43
Formidling	44
Deltagerliste.....	46
Referencer	47

Indledning

Baggrund

Fra 1. april 2006 gælder der nye, skærpede energikrav i Bygningsreglementet. De nye energikrav i Bygningsreglementet er baseret på en energiramme, der angiver det tilladelige energiforbrug til drift af en bygning, herunder energiforbruget til klimatisering om sommeren. Ved opførelse af en bygnings energibehov, sammenvejes elbehovet med varmebehovet, ved at gange elbehovet med 2,5 inden det lægges sammen med varmebehovet. Den nye energiramme afspejler mere reelt end tidligere det faktiske energiforbrug til bygningsdrift. Med de nye energikrav er der kommet markant større fokus på elforbruget til bygningsdrift, herunder elforbruget til forøget ventilation og eventuel mekanisk køling i sommerhalvåret.

Elforbruget til at klimatisere nye kontorbygninger udgør sædvanligvis en væsentlig del af det samlede energiforbrug i disse bygninger. I en typisk kontorbygning - selv uden mekanisk køling - opført efter de nye energikrav i Bygningsreglementet fra 2006, udgør elforbruget til ventilatordrift typisk 20 - 30 % af den samlede energiramme, hvor af 70 - 80 % af forbruget ligger i sommerhalvåret, hvor der ikke er gavn af varmegenvindingen. Hertil kommer, at de dimensionerende luftstrømme i ventilationsanlæggene ofte er fastsat ud fra kølebehovet om sommeren, hvilket medfører et unødvendigt stort elforbrug også om vinteren. I bygninger med mekanisk køling vil elforbruget i sommerhalvåret være endnu højere, afhængigt af størrelsen af varmebelastningerne, glasarealet og solafskærmningens effektivitet.

En tilsvarende udvikling ses desværre også i institutions- og boligbyggeri, hvor anvendelsen af mekanisk køling begynder at brede sig. Også for disse bygningstyper vil anvendelsen af faseskiftende materialer kunne dæmme op for anvendelsen af mekanisk køling.

Folketinget vedtog i juni 2005 at fortsætte udviklingen af et mere energieffektivt nybyggeri med yderligere skærpelse af energikravene til nybyggeriet i Bygningsreglementet med 25 % i 2010 og igen yderligere 25 % i 2015, under forudsætning af at det er arkitektonisk, byggeteknisk og økonomisk forsvarligt. For kontorbyggeri og lignende vil det være overordentligt vanskeligt at opnå en sådan reduktion i energiforbruget, idet varmemeforbruget i forvejen normalt er ret lavt, og elforbruget til fx belysning er vanskeligt at bringe ned under et vist niveau med tilgængelig teknologi, selv med høj grad af dagslysudnyttelse og effektive armaturer og styringer.

Udvikling af løsninger, der markant kan reducere eller eventuelt helt fjerne elforbruget til klimatisering af især kontorbygninger om sommeren, vil være et nødvendigt element for at kunne opnå de 25 % reduktion af energiforbruget i fremtidens kontorbygninger fra 2010, således som det er planlagt i henhold til Folketingets beslutning fra juni 2005. Alternativt vil det formodentlig være nødvendigt at udskyde stramningen af Bygningsreglementets energikrav til kontorbygninger og lignende indtil diodebelysning er blevet tilstrækkeligt udviklet, eller solceller er faldet markant i pris. Problemet vil dog uundgåeligt melde sig igen ved den næste af de planlagte stramninger.

Samlet kan det forventes, at anvendelse af faseskiftende materialer vil kunne reducere det samlede elforbrug i fremtidens bygninger med 10 – 20 %. Reduktionen vil være en kombination af en reduktion af et i dag allerede eksisterende elforbrug og en reduktion eller elimination af stigningen i elforbruget til mekanisk køling og ventilation.

Faseskiftende materialer er nu så færdigudviklede af især BASF i Tyskland, at de er begyndt at finde anvendelse som et varmekapacitetsforøgende tilslagsmateriale til fx gipsplader, porebeton og puds. Ved at anvende faseskiftende tilslagsmaterialer i en gipsplade kan den opnå samme termiske egenskaber som en ½-stens mur. Dertil kommer at faseskiftet sker indenfor et meget snævert temperaturinterval. Anvendelsen af faseskiftende materialer retter sig både mod nybyggeriet og mod eksisterende byggeri i forbindelse med ombygning og renovering.

Flere af de tyske byggematerialeproducenter, som anvender faseskiftende tilslagsmaterialer i deres produkter i Tyskland fx Knauf Danogips og maxit (Weber), er også aktive på markedet i Danmark, i dag dog uden at markedsføre faseskiftende tilslagsmaterialer. Der er over de sidste 5 år opført eller renoveret ca. 25 bygninger i Tyskland med anvendelse af faseskiftende materialer. Tilsvarende udvikling er i gang i andre lande fx Frankrig. På nuværende tidspunkt er prisen på det faseskiftende materiale forholdsvis høj, hvilket skyldes at det er et nyt produkt. På lidt længere sigt forventes prisen at falde som følge af forøget anvendelse og forøget produktionskapacitet.

Formål

Formålet med projektet er at opbygge grundlaget for anvendelsen af faseskiftende materialer til at forbedre temperaturforholdene om sommeren i fremtidens bygninger.

Formålet er således, at gennemføre en detaljeret undersøgelse af state-of-the-art på området, således at den nyeste viden indsamles og udnyttes i projektet. Formålet er endvidere, at foretage en række laboratorie- og in-situ målinger for at afdække og teste materialernes dynamiske egenskaber, således at disse resultater kan anvendes i udviklingen af detaljerede dynamiske simuleringsmodeller. Simuleringsmodellerne indlejres efterfølgende i bygningssimuleringsprogrammet BSim og energiberegningsprogrammet Be10, således at faseskiftende materialer kan medtages i fremtidige beregninger i forbindelse med projektering af nye bygninger og renovering af eksisterende. Med udgangspunkt i de udviklede rutiner til BSim gennemføres der til sidst i projektet en analyse af energi- og indeklimapotential for anvendelsen af PCM i danske bygninger, og denne analyses resultater udmøntes i en vurdering af materialernes anvendelses- og videreudviklingspotentiale.

Metode

For at opnå det bedst mulige grundlag for den fremtidige anvendelse af faseskiftende materialer vil projektet blive gennemført af en bredt sammensat projektgruppe med deltagelse af byggematerialeproducenter, udførende, rådgiver og arkitekt samt centrale vidensinstitutioner på området.

Dette første projekt om faseskiftende materialer vil fokusere på udvikling af det generelle grundlag for den fremtidige anvendelse af faseskiftende materialer i byggeriet i Danmark samt på at udpege områder, hvor der er behov

for yderligere udvikling for at udnytte det fulde potentiale. Projektet vil således også omfatte identificere af nye anvendelser af PCM, som kan føre til yderligere energibesparelse og komfortforbedring i bygninger. Projektet vil ikke omfatte egentlig produktudvikling af byggematerialer eller gennemførelse af demonstrationsbyggeri. Projektet vil alene omfatte fremstilling af prototyper, som kan testes for termiske egenskaber. Egentlig produktudvikling og demonstrationsbyggeri forventes i en senere fase med deltagelse af udvalgte parter.

Projektet vil bestå af følgende aktiviteter:

- Videnopsamling: Indsamling og bearbejdning af europæisk og international viden fx tyske erfaringer og IEA Annex 44. Videnopsamlingen vil både fokusere på praktisk viden om anvendelsen af PCM i byggematerialer og bygningskonstruktioner og på teoretisk viden fx om modellering af konstruktioner med PCM-holdige byggematerialer.
- Test og modelopbygning: Test af dynamiske egenskaber for bygningskonstruktioner med PCM i klimakammer samt evt. i udvalgte rum i bygninger. Testene vil både omfatte eksisterende (fx tyske) løsninger og nye løsninger. På baggrund af testene opstilles detaljerede dynamiske modeller fx i HEAT 2.
- Modellering i BSim og Be10: På baggrund af testene og de detaljerede dynamiske modeller i fx HEAT2 opstilles komplette bygningsmodeller i BSim og Be10 inklusive PCM-holdige byggematerialer og -konstruktioner.
- Energi- og indeklimapotentiale: Bygningsmodellerne bruges til at vurdere energibesparelses- og indeklimaforbedringspotentialet i typiske bygninger ved anvendelse af PCM. Bygningerne vil omfatte småhuse, etageboliger, institutioner og kontorer samt både nyt byggeri og renoveringer.
- Anvendelses- og videreudviklingspotentiale: Det fremtidige anvendelses- og videreudviklingspotentiale for PCM i byggeriet vurderes. I vurderingen vil både indgå teknik og økonomi.
- Formidling: Projektets resultater formidles bredt til byggebranchen bl.a. gennem artikler, foredrag og seminar.

Videnopsamling

I projektets opstartsfasen er der gennemført en større state-of-the-art undersøgelse vedrørende anvendelsen af faseskiftende materialer til klimatisering af bygninger. Undersøgelsen har dels fokuseret på anvendelsesmuligheder men også på erfaringer vedrørende udvikling af simuleringsmodeller mv. Undersøgelsen er ikke publiceret, men har udelukkende fungeret som en indsamling af relevant viden til støtte for projektets gennemførelse.

Følgende litteraturliste er benyttet i hele projektet (Se nærværende rapport anvendte litteratur i kapitlet 'Referencer'):

1. Phase-change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings, Ste-tiu, C. and Feustel, Helmut E., Lawrence Berkeley Laboratory.
2. Simplified numerical description of latent storage characteristics for phase change wallboard, Feustel, Helmut E., Lawrence Berkeley Laboratory.
3. Testing large samples of PCM in water calorimeter and PCM used in room applications by night-air cooling, Bellander, Rickard, Licentiate Thesis, Building Materials Technology, KTH.
4. Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage, Medved, S. and Arkar, C., Energy and Buildings 40 (2008) 429-437.
5. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, Pasupathy, A. and Velraj, R., Energy and Buildings 40 (2008) 193-203.
6. Mathematical modelling of the thermal performance of a phase-change material (PCM) store: Cooling cycle, Kürklü, A. Wheldon, A. and Hadley, P., Applied Thermal Engineering Vol. 16, No. 7, pp. 613-623, 1996.
7. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, Neeper, D. A., Solar Energy Vol. 68, No. 5, pp. 393-403, 2000.
8. PCM-facade-panel for daylighting and room heating, Weindlader, H. Beck, A and Fricke, J., Solar Energy Vol. 78, pp. 177-186, 2005.
9. Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system, Arkar, C. and Medved, S., Solar Energy Vol 81, pp. 1078-1087, 2007.
10. PCM thermal storage in buildings: A state of art, Tyagi, V. V. and Buddhi, D., Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 11, pp. 1146-1166, 2007.
11. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, Pasupathy, A, Velraj, R. and Seeniraj, R. V., Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 12, pp. 39-64, 2008.
12. Free-cooling of buildings with phase change materials, Zalba, B. et al. International Journal of Refrigeration Vol. 27, pp. 839-849, 2004.
13. Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building, Arkar, C., Vidrih, B. and Medved, S., International Journal of Refrigeration Vol. 30, pp. 134-143, 2007.

14. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, Zhang, Jinping et al., *Building and Environment* Vol. 42, pp. 2197-2209, 2007.
15. Thermal behavior of mixtures of perlite and phase change materials in a simulated climate, Petrie, T. W. et al., Oak Ridge National Laboratory (ORNL/m-6639).
16. Advanced zone simulation in Energyplus: Incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability, Pedersen, C. O., *Proceedings: Building Simulation 2007*.
17. Improving energy efficiency through artificial inertia: the use of phase change materials in light, internal components, Imperadori, M. et al., PLEA2006 - The 23rd conference on passive and low energy architecture.
18. Mathematical modeling and experimental study on building ceiling using phase change material for energy conservation, Avadaiappa, P. et al., *The 2nd joint international conference on "sustainable energy and environment (SEE 2006)"*.
19. Removing unwanted heat in lightweight buildings using phase change materials in building components: simulation modelling for PCM plasterboard, Kendrick, C. and Walliman, N., *Architectural Science Review* Vol. 50.3, pp. 265-273, 2007.
20. Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation, Heim, D., *Ninth International IBPSA Conference*, 2005.
21. Modeling phase change materials with conduction transfer functions for passive solar applications, Barbour, J. P. and Hittle, D. C., *Solar Energy Engineering* Vol. 128, pp. 58-68, 2006.
22. Numerische und experimentelle Untersuchung von Phasenübergangsmaterialien zur Reduktion hoher sommerlicher Raumtemperaturen, Hoffmann, S., *Dissertation*, Weimar, September 2006.
23. Passive cooling of buildings by night-time ventilation, Artmann, N., *DCE Thesis No. 16*, Aalborg University, November 2008.
24. Testing large samples of PCM in water calorimeter and PCM used in room applications by night-air cooling, Bellander, R., *Licentiate Thesis in Building Materials Technology*, KTH Research School HiG, Centre for Built Environment, University of Gävle, October 2005.
25. High-Capacity Cool Thermal Energy Storage for Peak Shaving, He, B., *Doctoral Thesis*, Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes, KTH, Stockholm, Sweden, 2004.

Test og modelopbygning

Dette kapitel beskriver dels laboratorieforsøg hvor faseskiftende materiale blandes med hhv. mørtel og beton og dels in-situ forsøg fra EnergyFlex-House hvor PCM-beton er anvendt i forbindelse med udstøbningen af betondæk.

Forsøg med PCM i mørtel og beton

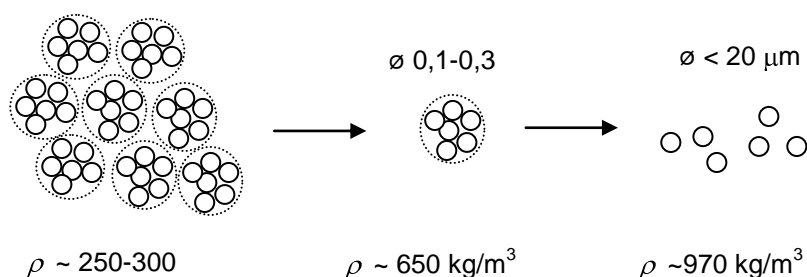
Formål

Formålet med denne indledende forsøgsrække er at undersøge om det er muligt at iblande den ønskede mængde Micronal og samtidig opnå en brugbar betonkonsistens der muliggør udstøbning af f.eks. SCC (selvkomprimerende beton).

Forsøgsbeskrivelse

Den benyttede PCM er leveret som tørt pulver og kernen består af en blanding af to paraffiner, blandet så den fælles faseskiftende temperatur ligger ved ca. 23 °C. Skallen er en akrylpolymer. Pulverfremstillingsprocessen består i en forstøvning af emulsionen umiddelbart fulgt af spray-tørring. Under denne proces vil en mængde af primærpartiklerne (<20 µm) agglomerere til større partikler (0,1-0,3 mm). Når pulveret bliver mekanisk bearbejdet under betonblandingen, vil disse agglomerater formentlig blive dispergeret.

Nedenfor er skematisk vist forskellen i den målte densitet, alt efter om der er tale om bulk densitet (venstre), absolut densitet af agglomeraterne (midten) eller absolut densitet af de dispergerede partikler (til højre). Bulk densiteten og den absolutte densitet af agglomeratet er angivet af BASF mens den absolutte densitet af det dispergerede pulver er bestemt af Teknologisk Institut, Murværkscentret.

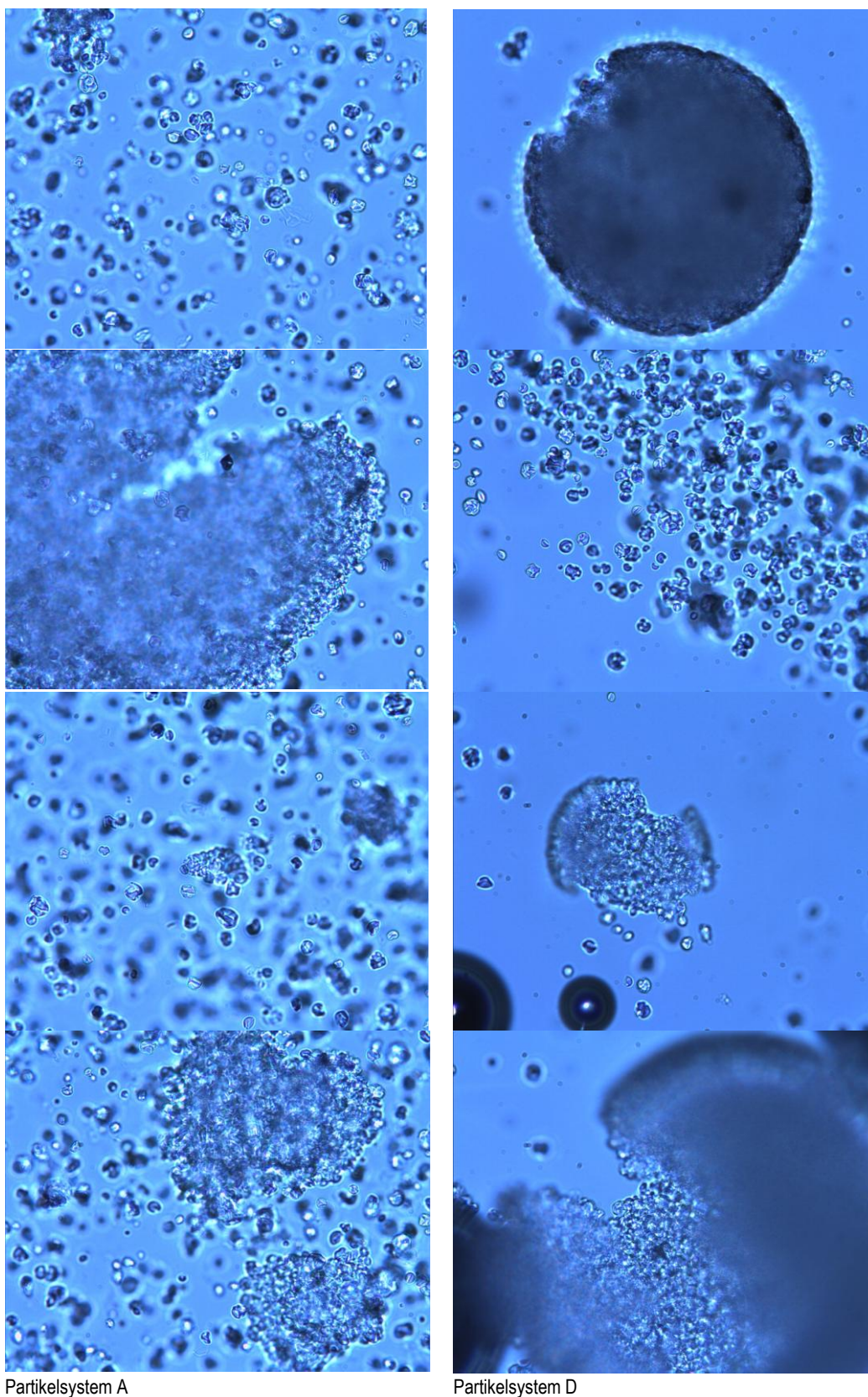


Figur 1. Forskel i densitet. Bulk densitet (venstre), absolut densitet af agglomeraterne (midten) eller absolut densitet af de dispergerede partikler (til højre)

For at undersøge, hvorvidt primærpartiklerne tager skade af det høje alkaliske miljø der opbygges i en frisk beton, samt om den mekaniske bearbejdning skader skallen, er der foretaget indledende forsøg omkring dette. Forsøgene er opdelt i fire kategorier:

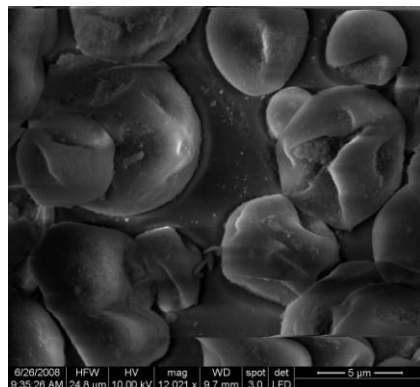
- PCM stødt i mørtel
- PCM opblandet i 0,1 M NaOH-opløsning i 2,5 timer
- PCM stødt i mørtel og derefter opblandet i 0,1 M NaOH-opløsning i 2,5 timer
- PCM uden forarbejdning

Partikelsystemerne A og D er efterfølgende undersøgt med optisk mikroskopi mens alle partikelsystemerne er undersøgt i SEM (Scanning Electron Microscope). Resultaterne fra optisk mikroskopi ses nedenstående:

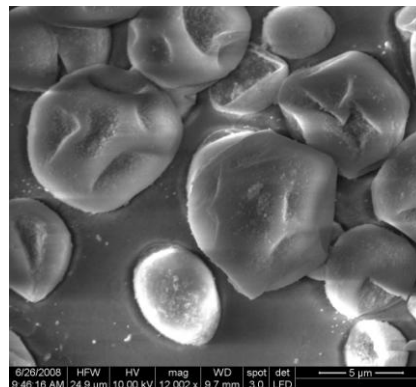


Figur 2. Billeder fra optisk mikroskopi. Partikelsystem A og D.

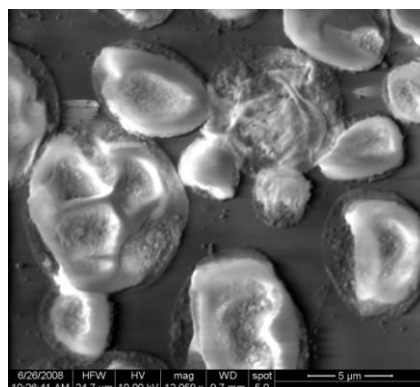
SEM undersøgelserne er foretaget ved tre forskellige forstørrelser, hvoraf den bedste, 12000x, er vist i figur 3.



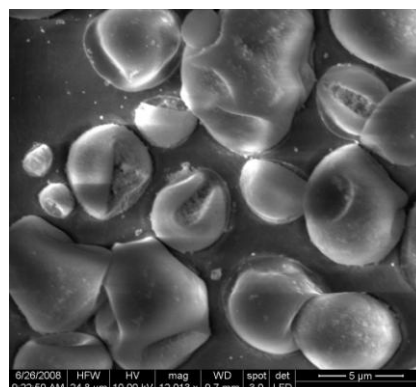
Prøve A: PCM stødt i morter.



Prøve B: PCM i 0.1M NaOH i 2.5 time.



Prøve C: PCM stødt i morter og derefter i 0.1M NaOH i 2.5 time.



Prøve D: PCM uden forarbejdning

Figur 3. SEM undersøgelse, 12000x.

Konklusion

Med udgangspunkt i mikroskopibillederne kan der ikke observeres ændringer af betydning i mikronalernes tilstand. Dvs. at det umiddelbart kan antages at mikronalerne er af sådan en beskaffenhed at de dels kan tåle den mekaniske påvirkning de udsættes for under blandedprocessen, og dels kan tåle det alkaliske miljø i den friske beton. Der arbejdes derfor videre med udvikling af PCM-mørtel på vejen hen imod PCM-beton.

PCM-mørtel

Som udgangspunkt blev det forsøgt at blande en mørtel med 5 vægt- % PCM og udbredelsesmål på 200 mm svarende til en SCC-beton.

Nedenstående er de til den initiale mørtelblanding benyttede materialer, listet inkl. evt. absorption og densitet.

Materialer	Type	Absorption [%]	Densitet [kg/m ³]
Cement	Rapidcement	0,0	3160,0
Sand (tørret)	RN 0/4 E	0,2	2640,0
Vand	Hanevand	0,0	1000,0
Superplast	Sika Viscocrete -10	0,0	1070,0
Luftindblanding	SikaAer 15b 1:1	0,0	1002,0
PCM	Micronal DS 5008 - 23°C	0,0	973,7

Den benyttede blandedprocedure er beskrevet i det følgende.

Der blandes 1.5 liter mørtel i 5L Hobart-mixeren:

1. Sand, cement og PCM tørblendes i 30 sekunder ved lav hastighed
2. 80 % af blandevandet tilsættes, og der blandes i 30 sekunder ved lav hastighed.
3. Det resterende blandevand, iblandet det superplastificerende tilsætningsstof, tilsættes, og der blandes i yderligere 30 sekunder ved lav hastighed
4. Hastigheden sættes op til medium, og der blandes i 30 sekunder
5. Mørtlen hviler i 90 sekunder, dog skræbes i løbet af de sidste 30 sekunder mørtel ned fra siderne af stålskålen.
6. Der blandes i 60 sekunder ved medium hastighed

Efter blanding skal udbredelsesmålet bestemmes (tredobbelt bestemmelse) på en glat tør glasplade ved hjælp af en mørteludbredelseskegle. Keglen er 60 mm høj med en nedre diameter på 100 mm og en øvre diameter på 70 mm. Efter keglen var fyldt blev den løftet og glaspladen fik 10 lodrette stød.

Der blev sigtet efter tilsætning af 5 vægt- % PCM. Initialt forsøgte direkte tilsætning, udskiftning af sand med PCM samt frasingning af mindste sandfraktion. v/c, tilsætningen af superplast og PCM-andel justeredes, så udbredelsen blev ca. 220 mm.

Mørtelforsøgene viste i øvrigt at doseringen af superplast har stor indflydelse på afbindingstiden. Indikationen var at omkring 1,5 % af cementvægten kan accepteres.

Konklusion

Forsøgene med PCM-mørtel blev primært gennemført for at undersøge om det overhovedet er muligt at iblande PCM i cementbaserede materialer og at få disse til at hærde. Forsøgene viste at det var muligt og den udviklede mørtelrecept anvendes videre i arbejdet med at udvikle den egentlige PCM-beton.

PCM-Beton

Der blev 11. august udstøbt 9 stk. Ø150 mm cylindre med en beton af følgende sammensætning (formodet P20) svarende til 5 vægt- % PCM (blandet i en 50 L tvangsblender):

Materiale	Type	Mængde, VOT [kg/m³]
Cement	Rapidcement	270,1
Sand	RN 0/4 E	818,4
Sten	Stenrand 6/16	812,2
Superplast	Sika Viscocrete -10	4,2
Vand	Aqua Communalis	170
PCM	Micronal DS 5008 - 23°C	108,9

Betonens sætmål kunne ikke bestemmes, idet betonen er så klæbrig at den ikke kommer ud af sætmålskeglen når denne løftes. Betonens densitet blev målt til 2162 kg/m³ og luftindholdet til 2-3 %. Betonen responderede godt på vibrering antagelig på grund af dens høje pastaindhold (inkl. PCM).

Styrkeudviklingen for betonen var følgende:

Alder (døgn)	Trykstyrke (MPa)
1	5
3	10
7	14
28	-

Der blev indstøbt termofølere i midten og nær kanten af én betoncylinder således, at der efterfølgende kunne gennemføres forsøg til bestemmelse af varmekapacitet etc. af betonen.

12. august blev der støbt én Ø150 mm cylinder af en "referencebeton" med termofølere placeret som i PCM-betonen. Denne beton havde følgende sammensætning:

Materiale	Type	Mængde, VOT [kg/m³]
Cement	Rapidcement	235,9
Sand	RN 0/4 E	920,7
Sten	Stenrand 6/16	913,7
Superplast	Sika Viscocrete -10	1,9
Vand	Aqua Communalis	170
Flyveaske	Micronal DS 5008 - 23°C	94,4

"Referencebetonen" har således samme v/c-tal men med væsentligt lavere pastaindhold end PCM betonen.

Der blev 29. august blandet 100 liter PCM-beton med samme sammensætning som overfor beskrevet i TIs industriblander (Haarup, 250L). Betonens opførsel i blanderen samt konsistens i øvrigt blev vurderet af folk fra Unicon, som mente, at betonen godt kunne blandes og transporteres til en byggeplads (Energy Flex husene).

Der blev støbt 4 stk. Ø100 mm cylindre samt en plade 150 x 100 x ca. 40 mm.

Konklusion

Formålet med forsøgene var først og fremmest at undersøge hvor stor indflydelse iblanding af PCM har på betonens bearbejdelighed og hvorvidt det var muligt at udvikle en SCC-beton.

Det viste sig at PCM-beton bliver så klæbrig at sætmålet ikke kunne bestemmes, da betonen i det udførte forsøg ikke kommer ud af sætmålskeglen når denne løftes. Betonen responderede godt på vibrering antagelig på grund af dens høje pastaindhold (inkl. PCM). Dvs. at det i praksis er muligt at anvende betonen såfremt denne vibreres under støbeprocessen. Det er ikke muligt inden for dette projekts rammer at udvikle en SCC-beton med PCM.

PCM-Flydemørtel

Følgende blev blandet i Hobart-mixer

Mix1:

Combimix - 1500 g

Vand - 300 g

Mix er "selvsnivellerende" og løb således ud over kanten af glaspladen i mørteludbredelsestest. Mørtlen er tyndflydende med relativt lav viskositet.

Mix 2:

Combimix - 1500 g

Vand - 300 g

PCM - 90 g

Mix 2 har ingen selvsnivellerende egenskaber. Faktisk kan mørtlen "står selv" med udbredelse 130 mm i mørteludbredelsestest. Mørtlen er meget klistret, tyktflydende og har umiddelbart vurderet høj viskositet.

Konklusion

Man kan ikke uden videre tilsætte PCM til flydemørtel.

Forsøg med PCM i EnergyFlexHouse (EFH)

Indledning

I fortsættelse af laboratoriemålingerne beskrevet i foregående afsnit, er der gennemført in-situ forsøg med den udviklede PCM-beton for at vurdere hvor stor en betydning anvendelsen af PCM har i tunge bygninger.

Formål

Formålet med forsøgsrækken er, at undersøge hvorledes PCM i betongulv påvirker energibehovet i et rum med tunge konstruktioner. Der tages udgangspunkt i betongulvets temperatur, sensorer i betonen og lufttemperaturen i opholdszonen.

Baggrund

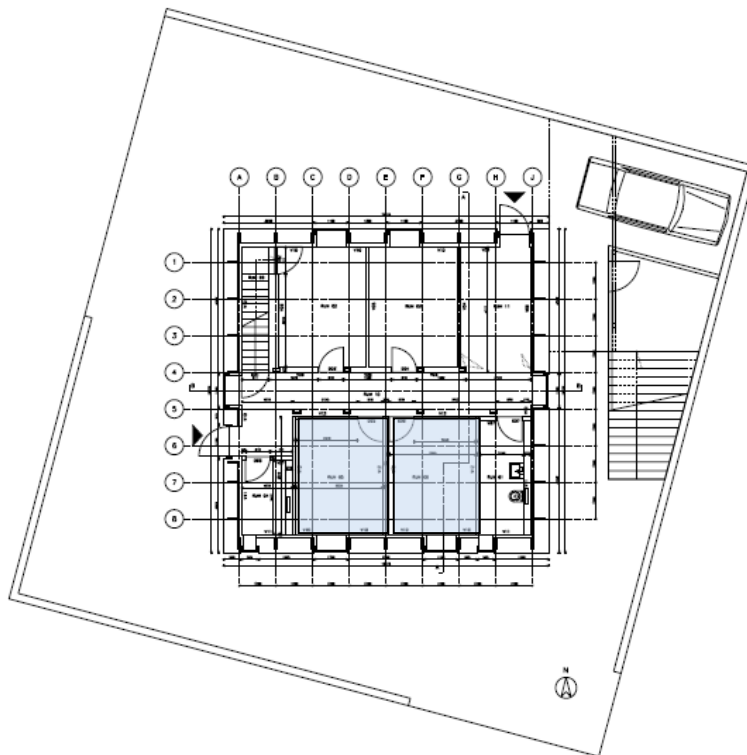
Betoncentret har hovedsagligt sammenkørt aktiviteterne i PSO-projektet om anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger med aktiviteterne i EnergyFlexHouse. De mest interessante resultater er listet i det følgende:

- Udvikling af beton med faseskiftende materialer – PCM-beton - Herunder dokumentation af styrkeegenskaber og termiske egenskaber (forøgelse af varmekapaciteten med 100-150 %).
- Dokumentation af udtørningsforløb ved forskellige betontyper. Der er anvendt selvudtørrende beton som giver et energibesparelspotentiale da aktiv udtørring ved vinterbyggeri kan undgås. Nærværende rapport beskæftiger sig ikke med dette.

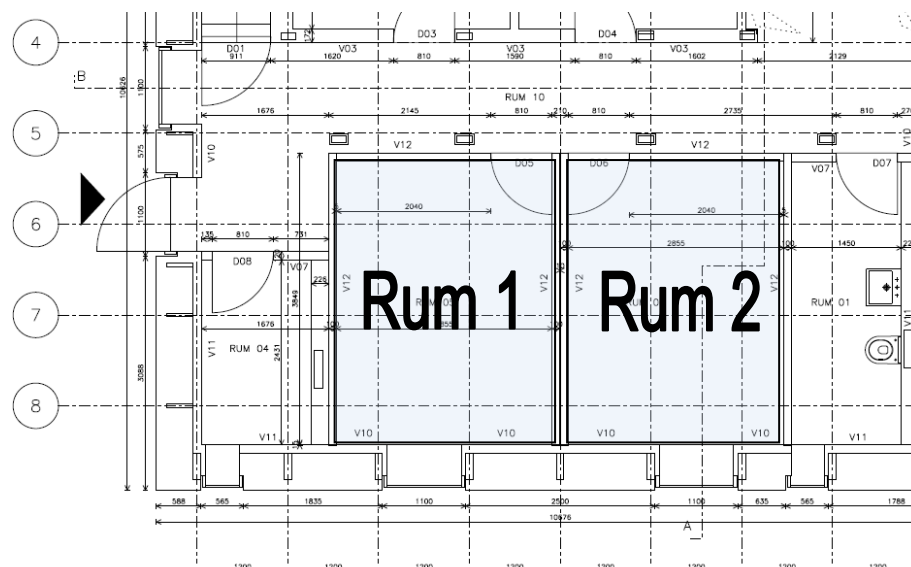
Aktiviteterne omkring udvikling af PCM-betongulvet i EnergyFlexHouse har været hovedinspirationskilden til to projektansøgninger til henholdsvis Højteknologifonden og Energistyrelsens EUDP. De to projektansøgninger har et samlet budget på ca. 25 mio. DKK og blev bevilliget sommeren 2009.

Beskrivelse af forsøgsopstilling

I det følgende redegøres for tre forsøg udført i EFH. Forsøgene er udført i to identiske rum (benævnt rum 1 og rum 2) vendende mod syd. I figur 4 er vist en plantegning af EFH hvor de to rum er skraveret. I figur 5 er vist et nærbillede af plantegningen med de to rum. Rummene er beskrevet i det følgende.



Figur 4. Plantegning af EFH.



Figur 5. Nærbillede af plantegning for EFH hvor rum 1 og rum 2 vises.

Rum 1 – Reference rum

L x B x H mm 3849 x 2855 x 2500

Rum 2 – PCM i gulv

L x B x H mm 3849 x 2855 x 2500

Andel af PCM i gulvet: 5 vægt -% (ca. 140 kg PCM i rummet totalt).

Smeltepunkt for PCM er 21 °C.

- A. Data logges uden provokeret påvirkning, og rummene sammenlignes.
- B. Opvarmning af beton lokalt over temperaturfølere i begge rum og logging af tilhørende data
- C. Afkøling af begge rum og logging af tilhørende data

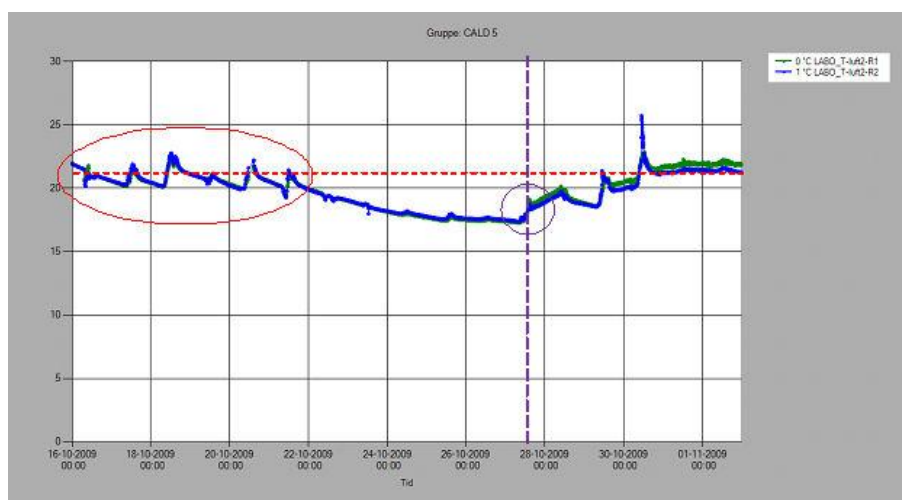
Brugen af PCM er interessant i overgangsperioder fra varmt til koldt og omvendt, derfor laves der provokerede forsøg (B+C) for at få nærmere indblik i hvorledes PCM og betonen opfører sig i disse perioder.

Ligeledes undersøges PCM's smeltepunkt nærmere. Den interne varmebelastning i huset er ca. 21 °C, og vi vil undersøge om smeltepunktet i virkeligheden ligger over eller under det angivne smeltepunkt fra fabrikanten. Det kan også være at betonens blandeproces og den tidlige hærdeproces for betongulvet har indvirket på smeltepunktet for PCM.

Der er lavet udtræk af data for samtlige markerede målepunkter for alle tre scenarier. I beskrivelsen af hvert scenarie vil der kun være de mest relevante kurver samt kommentarer.

Resultater og analyse, Scenarie A – Uden påvirkning

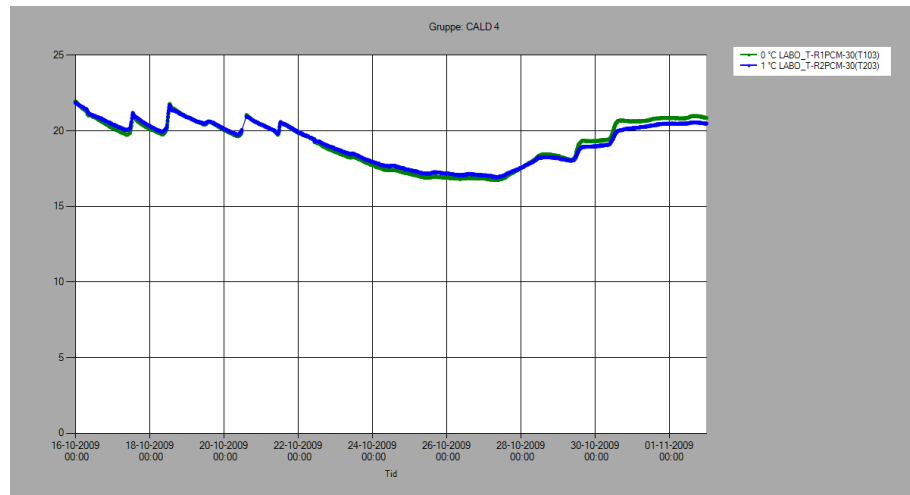
Først logges data for rummene uden påvirkning i perioden 16. oktober 2009 – 1. november 2009. Perioden er valgt da der her sker temperaturændringer og det angivne smeltepunkt for PCM passerer. I figur 6 er vist lufttemperaturen i opholdszonen gennem måleperioden.



Figur 6. Lufttemperaturer i opholdszonen.

Den røde stiplede linje angiver smeltepunktet for PCM opgivet af fabrikanten. Lufttemperaturen passerer smeltepunktet for PCM uden at der kan ses effekt. Der opstår først en tydelig forskel mellem rummene, da varmen tændes i huset, og interne varmelaster påvirker rummene. Forskellen mellem rummene skyldes højst sandsynlig rummenes placering i forhold til de interne varmekilder.

Undersøges temperaturerne i selve betongulvet er billedet det samme – bare med mindre udsving i temperaturerne der skyldes betonens træghed. I figur 7 er vist kurve fra sensorer placeret 30 mm nede i gulvet fra overfladen.

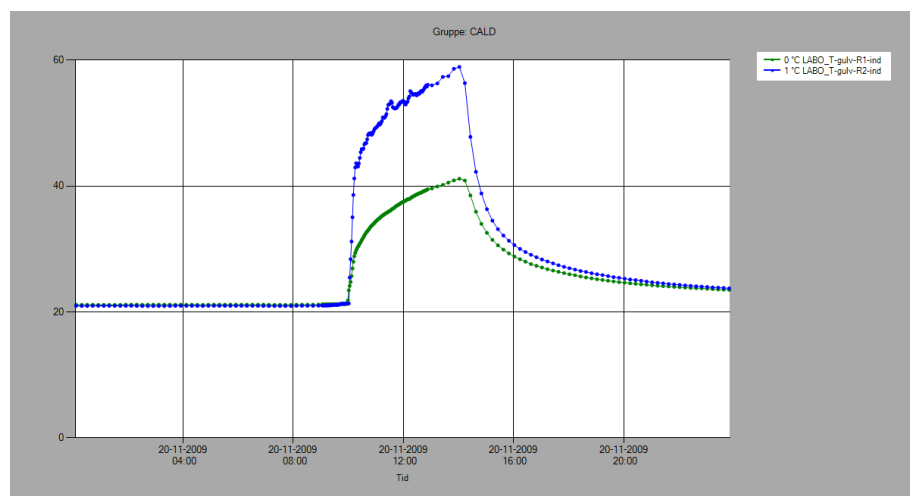


Figur 7. Temperaturer i gulv, 30 mm nede i betonen.

Resultater og analyse, Scenarie B – Lokal opvarmning

To varmekilder sættes op det sted hvor temperaturfølerne i betondækket er placeret. Varmekilderne tændes og varmer betonen op i 4 timer. Det interessante her er at undersøge hvorledes PCM opfører sig under opvarmning samt afkøling. Her undersøges PCM'ens effekt samt smeltepunkt. Hvis eksperimentet skal passe på simuleringer, skulle temperatursvingningerne i rum 2 (PCM-rum) gerne være mindre end i rum 1, på grund af PCM's virkning.

Figur 8 viser overfladetemperaturen for betonen i rum 1 og rum 2.



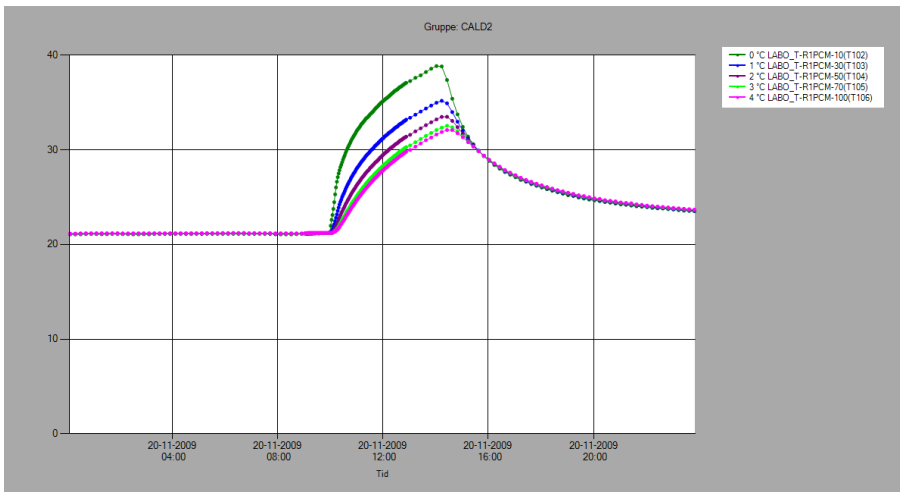
Figur 8. Overfladetemperatur for beton i rum 1 og rum 2.

Lufttemperaturen i rummene var i forsøget ikke ens. Der forekom en større opvarmning i rum 2 end i rum 1. Dette skyldes at vi testede varmekilderne i rum 2 inden forsøgene gik i gang, hvilket også forklarer den væsentlig højere overfladetemperatur i rum 2 (se figur 8).

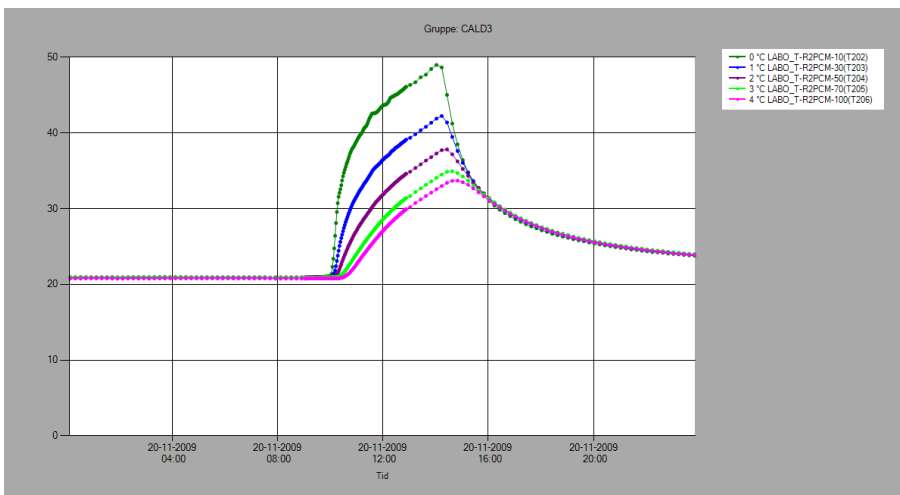
Det interessante ved overstående graf er imidlertid at trods ekstra varmetilførsel i starten af eksperimentet, så indstilles ligevægt som før forsøget relativt hurtigt efter en hastig afkøling.

PCM-betonen er repræsenteret ved den blå kurve, og her skulle vi gerne se at PCM'en påvirker overfladetemperaturen således at en afkøling vil ske langsommere end i referencerummet. Af denne graf ses at det ikke er tilfældet, hvorfor det er interessant at undersøge temperaturforholdene dybere nede i betondækket.

Figur 9 viser temperaturen ned gennem dækket i referencerummet i hhv. 10, 30, 50, 70, 100mm dybde. Figur 10 viser temperaturen ned gennem dækket i rum med PCM i hhv. 10, 30, 50, 70, 100mm dybde.

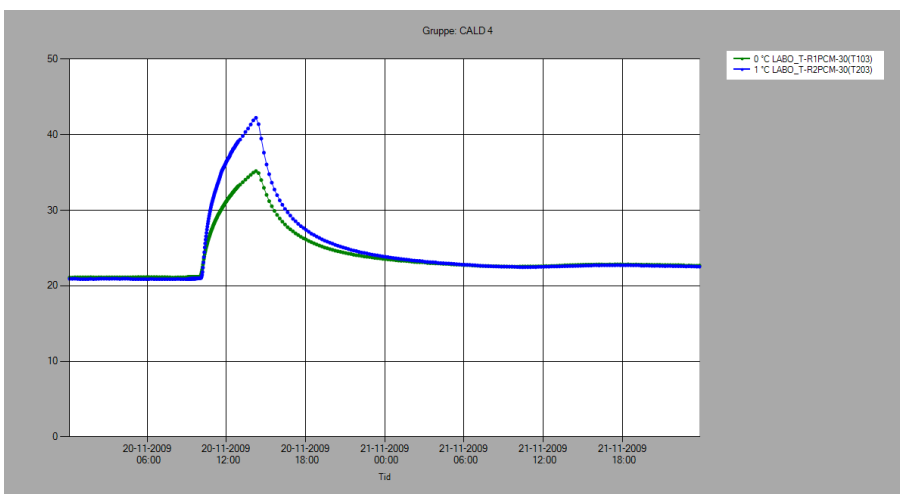


Figur 9. Temperaturer i betondæk, reference rum.



Figur 10. Temperaturer i betondæk, rum med PCM.

Temperaturforskellene i betonen er størst i rum 2, dette skyldes sandsynligvis at overfladen påvirkes af en højere temperatur som tidligere beskrevet. Figur 11 viser temperaturen 30 mm nede i betondækket for de to rum.



Figur 11. Temperatur i betondæk 30 mm nede for begge rum.

Her er ingen tydelige tegn på at PCM påvirker temperaturforløbene i gulvet, da der forholdsvis hurtigt indstiller sig en ligevægt for begge rum efter opvarmningen. Skulle virkningen have vist sig på kurven, ville den blå kurve

”blive hængende” et stykke tid over den grønne kurve, men det er altså ikke tilfældet.

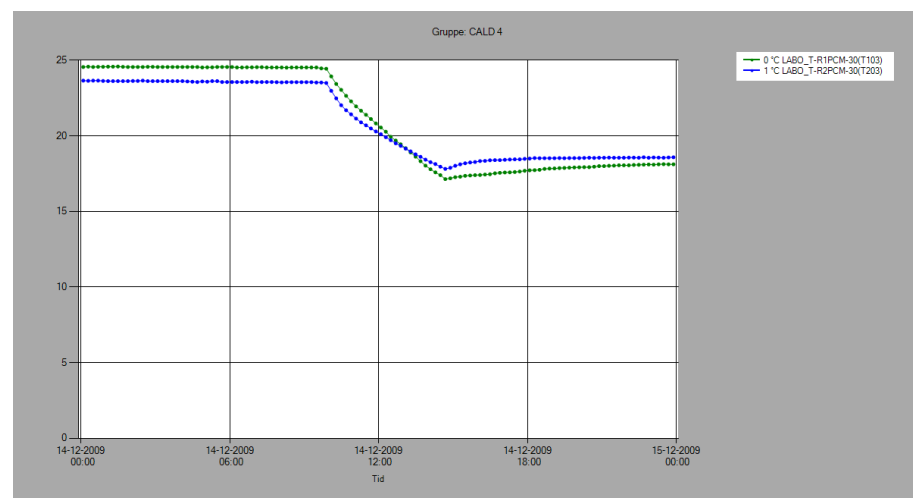
Teoretisk kunne fabrikantens oplysninger om PCM’ens smeltepunkt være forkerte, men målingerne viser at smeltepunktet i hvert fald ikke ligger mellem 21 °C og 42 °C.

Resultater og analyse, Scenarie C – Afkøling af rum

Det naturlige temperaturniveau i huset i løbet af efteråret og vinteren har været ca. 21 °C, og vi vil undersøge om smeltepunktet for PCM’en eventuelt ligger under det angivne smeltepunkt fra fabrikanten.

For at undersøge hvorledes betongulvet med PCM reagerer på kulde, afkøles rummet nu med udeluft. Vinduerne holdes åbne på en kold decemberdag uden vind i 4 timer imens data logges.

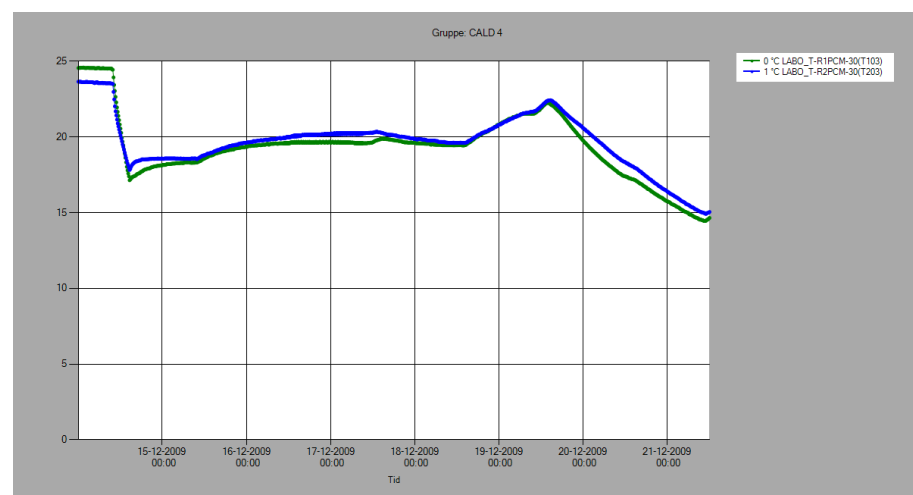
I figur 12 ses temperaturen 30 mm nede i betondækket for de to rum.



Figur 12. Temperatur i betondæk 30 mm nede for begge rum.

Det ses tydeligt er at rummene reagerer forskelligt på en hurtig afkøling. Største udsving ses for rum 1, referencerummet. Dækket i rum 2 (PCM-rummet) når ikke lige så langt ned temperaturmæssigt og bliver langsommere opvarmet igen sammenlignet med dækket i referencerummet.

I figur 13 ses lufttemperaturen i de to rum under nedkølingen og i perioden efter.



Figur 13. Lufttemperaturen i de to rum under nedkøling og derefter.

I en periode på ca. fire dage efter nedkøling er temperaturen en anelse højere i PCM-rummet, hvorefter der bliver tændt for varmen. Normaltilstanden er at der er en anelse højere temperatur i referencerummet sammenlignet med PCM-rummet. Det er derfor sandsynligt at PCM'en spiller en rolle energimæssigt.

Konklusion

Ud fra de målinger der er foretaget indtil nu er PCM'ens effekt på temperaturen i rum 2 ikke som forventet. Når der ikke er interne varmelaster i lab-huset opfører de to rum sig fuldstændig ens temperaturmæssigt. Ved provokerede forsøg med opvarmning af de to rum ses ingen temperaturmæssig effekt fra PCM'en overhovedet. Ved provokerede forsøg med nedkøling ses en lille temperaturmæssig effekt som sandsynligvis kan relateres til PCM'en.

Efterfølgende har vi forsøgt at finde en forklaring på den manglende virkning af PCM-betonen i EnergyFlexHouse. En hypotese er at betonen hærdet omkring PCM-kapslerne mens disse har deres mindste volumen da indholdet af voks er i fast tilstand. Når temperaturen efterfølgende stiger og voksen skal til at skifte fase fra fast til flydende er der ikke plads til denne udvidelse. Dvs. voksen kommer under tryk og smeltepunktet stiger. Det har ikke været muligt inden for rammerne af dette projekt at eftervise denne hypotese.

Modellering i BSim og Be10

Dette kapitel beskriver en numerisk beregningsmetode til bestemmelse af betydningen af latent varmelagring i bygningskomponenter der indeholder PCM, som er udviklet i forbindelse med projektet. Beskrivelsen er et uddrag af artiklen "Numerical Method for Calculating Latent Heat Storage in Constructions Containing Phase Change Material".

Formålet med udviklingen af metoden er, at kunne fastlægge PCM's betydning for varme- og kølebehovet i bygninger. Den udviklede beregningsmetode er implementeret i bygningssimuleringsprogrammet BSim (Wittchen, Sørensen, Johnsen & Rose, 2008). Kapitlet beskriver også sammenligninger mellem laboratoriemålinger på specifikke bygningskomponenter indeholdende PCM og resultater opnået med den udviklede simuleringsmodel, samt et case study hvor beregningsmetoden afprøves på en hel bygning. Disse tests af beregningsmetoden benyttes som validering.

Sidst i kapitlet er der ligeledes givet en kort beskrivelse af, hvorledes PCM er implementeret i Be10 (Be06) (Aggerholm, Sørensen & Wittchen, 2008).

Indledning

PCM kan anvendes i bygninger for at forøge den termiske masse betydeligt, og dermed reducere risikoen for overophedning. For at byggebranchen kan begynde at anvende disse materialer, er det nødvendigt at dokumentere deres egenskaber og undersøge de potentielle energibesparelser der kan opnås. For at kunne gennemføre en analyse af potentielle energibesparelser er der udviklet et simuleringsmodul til bygningssimuleringsprogrammet BSim.

Matematisk model

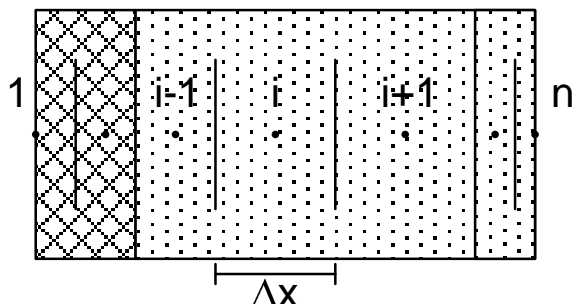
I BSim er en bygning opdelt i en række termiske zoner adskilt fra hinanden, udeklimaet eller fiktive zoner ved forskellige typer af konstruktioner. Varmebalancen for hver zone er koblet til varmetransporten gennem alle tilstødende konstruktioner.

I den numeriske model som anvendes i BSim, er den dynamiske opførsel af en bygning beskrevet i diskret form. Dette betyder at en kontinuerlig proces beskrives som step-vise ændringer fra tidsskridt til tidsskridt. I et tidsskridt betragtes modellen som værende i en kvasistationær tilstand dvs. at temperaturerne er konstante. Ved at anvende en tilstrækkelig mængde tidsskridt i beregningen giver denne metode en rimelig tilnærmelse.

Varmeledning i konstruktioner

På samme måde er byggematerialer opdelt i kontrolvolumener som hver især repræsenteres af én knude. I hvert kontrolvolumen beregnes temperaturen som en funktion af varmen der strømmer til og fra volumenet sammen med materialets varmekapacitet. Selvom kontrolvolumenet har en vis stør-

relse, antages det at de termiske forhold er ensartede i hele volumenet. Dette er også en rimelig tilnærmelse, så længe kontrolvolumenerne er små nok. Varmetransport gennem konstruktioner betragtes som dynamisk, dvs. under hensyntagen til varmekapaciteten af de enkelte lag i konstruktionen. Et eksempel på opdelingen i knuder er vist i figur 1.



Figur 1. Kontrolvolumener og knuder i konstruktion.

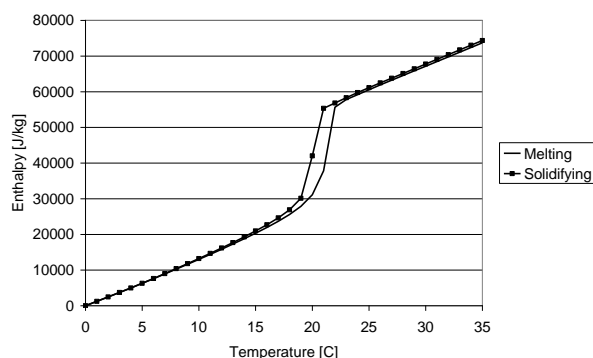
For en mere detaljeret gennemgang af hvordan varmeledning i konstruktioner beregnes, henvises til brugervejledningen til BSim.

Modellering af faseskiftende materialer

Der er mange forhold som skal overvejes når PCM skal modelleres i et bygningssimuleringsprogram. Den vigtigste af disse er varmekapacitetens afhængighed af temperaturerne og herunder effekten af såkaldt hysteres. Tidligere undersøgelser har vist, at det er vigtigt at tage hensyn til hysteresen for at opnå en korrekt bestemmelse af varmeoverførslen.

Et andet forhold som skal overvejes er varmeledningsevnen afhængighed af temperaturen. Adskillige tidligere undersøgelser har påpeget, at denne afhængighed er væsentlig og derfor også relevant at inddrage i modellen.

Den metode som er anvendt til at beskrive PCM's opførsel i BSim beskrives bedst gennem et simpelt eksempel. Micronal SmartBoard (30%, 23 °C) er et byggemateriale, der indeholder PCM. SmartBoard er en 15 mm tyk gipsplade indeholdende 30% (3 kg pr. m²) mikroindkapslet PCM (paraffin). Gipspladen har en specifik varmekapacitet på 1,20 kJ/kgK, en varmeledningsevne på 0,18 W/mK (i fast form) og en latent varmekapacitet i faseovergangen på 330 kJ/m². I figur 2 er enthalpien vist som funktion af temperaturen.



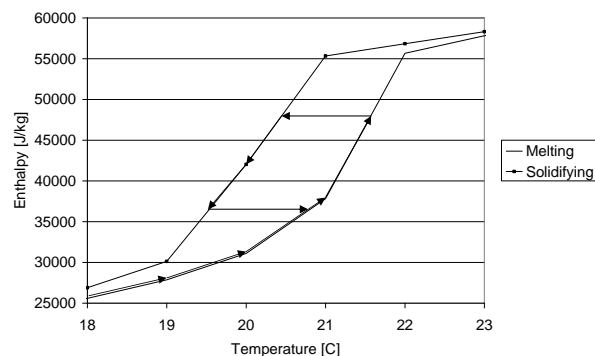
Figur 2. Enthalpi som funktion af temperaturen.

For at modellere hysteres-effekten er det nødvendigt at have oplysninger om PCM's tilstand i det foregående tidsskridt for at kunne beregne tilstanden i det nuværende tidsskridt, dvs. at tilstanden til enhver tid er afhængig af tilstandens forløb i tidligere tidsskridt.

Vi har valgt at benytte en simplificeret metode til at modellere virkningen af hysteres i beregningerne. For et faseskiftende materiale er varmekapaciteten for kontrolvolumen "i" i tidsskridt "j" baseret på temperaturen af kontrolvolumenet i tidsskridt "j-1", dvs. den senest kendte temperatur for det pågældende kontrolvolumen.

Ved at anvende denne forenklede fremgangsmåde undgår vi at tilføje unødigt kompleksitet til simuleringsmodellen, men samtidig kræver metoden at tidsskridtene er så små at ustabilitet i beregningen undgås.

Inden den egentlige simulering påbegyndes er temperaturen 20 °C i hele modellen og for ethvert faseskiftende materiale i modellen defineres denne initialtilstand som værende "på smeltekurven". Herefter vil tilstanden altid følge enten smeltekurven (dvs. en opvarmning), den størknekurven (dvs. en nedkøling), eller befinde sig et sted mellem de to kurver. Mellem kurverne antages det at tilstanden bevæger sig vandret, indtil den når enten smelte- eller størknekurven. Metoden er demonstreret i figur 3, hvor pile symboliserer overgangen af PCM tilstanden.



Figur 3. Tilstand for PCM. Eksempel på et smelte/størkne forløb.

Når tilstanden er mellem de smelte- og størknekurven fastlægges den samlede varmekapacitet ved lineær interpolation mellem de tilsvarende punkter på hhv. smelte- og størknekurven.

Validering

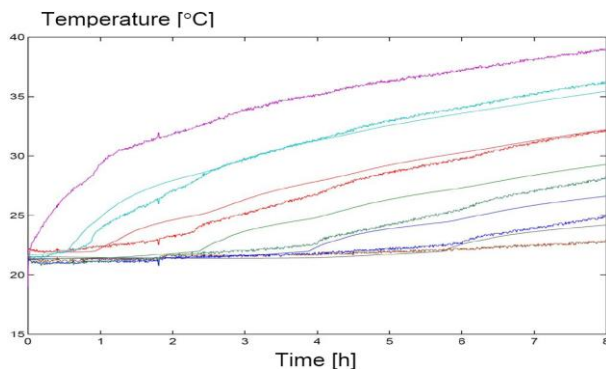
Validering af beregningsmodellen blev udført på baggrund af relativt simple laboratoriemålinger. Baggrunden for valideringen er laboratoriemålinger udført i 2008 (Pedersen, 2008) på en 270 mm tyk "væg" af Micronal SmartBoards, svarende til 18 stk. á 15 mm's tykkelse boltet sammen. Figur 4 viser forsøgsopstillingen.



Figur 4. Laboratorieforsøg. 18 stk. 15 mm SmartBoards boltet sammen.

Test A

Den første test er der som udgangspunkt stationære randbetingelser på begge sider af væggen. På den ene side af konstruktionen tændes derefter en 1000 W lampe, som hæver overfladetemperaturen til lige over 60 °C. I figur 5 er vist temperaturudviklingen som funktion af tiden (der er vist i alt 7 temperaturkurver, én på hver overflade og én for hvert 3. SmartBoard i væggen). De tykke linjer er de målte data mens de tynde linjer er beregnede temperaturer. Temperaturmålingerne på overfladerne af væggen er benyttet som randbetingelser i simuleringen.

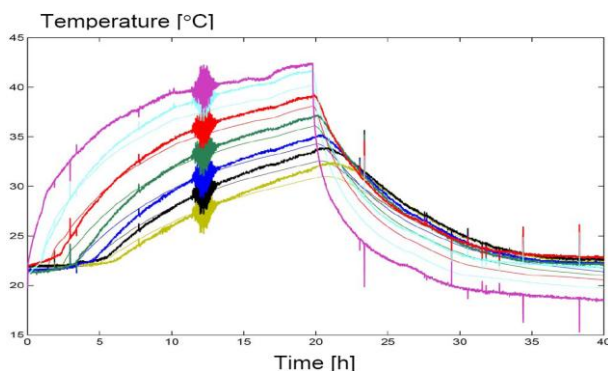


Figur 5. Test A. Kontinuerlig opvarmning på én side af vægkonstruktionen.

Af figur 5 er det tydeligt at temperaturprofilerne viser de samme tendenser. Smeltning af PCM'en forekommer generelt senere i simuleringsmodellen end i målingerne, dvs. at ca. 15 mm inde i konstruktionen er der en forsinkelse på ca. 15 minutter og desto længere ind i konstruktionen jo længere bliver forsinkelsen. 60 mm inde i konstruktionen er forsinkelsen ca. 2 timer. Dette kunne indikere at den latente varme er for lav i beregningsmodellen, eller at den termiske varmeledningsevne er højere end forventet.

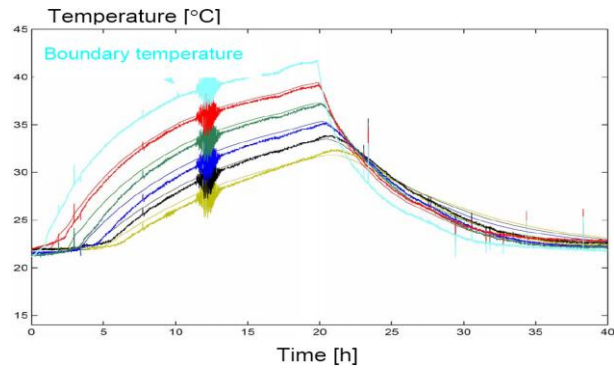
Test B

Test B svarer til test A, men efter 20 timer slukkes lampen og køling påbegyndes. Figur 6 viser temperaturudviklingen som funktion af tiden for både målinger (tykke linjer) og simulering (tynde linjer).



Figur 6. Test B. 20 timer med opvarmning og derefter afkøling.

Figur 6 viser en rimelig god overensstemmelse mellem målinger og simulering, men det lader til at der er en generel forskydning af temperaturerne, dvs. ca. 2 °C for målingen tættest på den varme side. Dette kan skyldes at målingerne af overfladetemperaturen er påvirket af stråling fra lampen. For at vurdere dette, er der lavet en anden beregning, hvor målingen tættest på den varme side bruges som randbetingelse i stedet. Resultaterne er vist i figur 7.

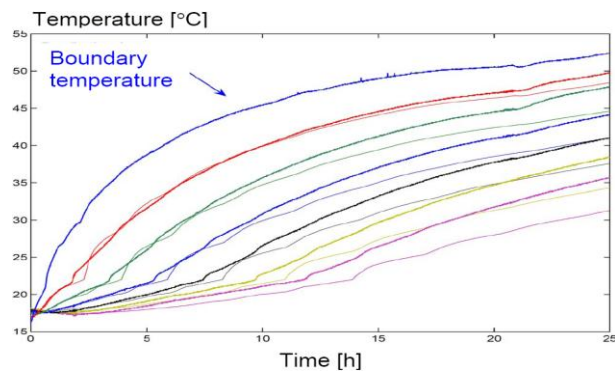


Figur 7. Test B. Knude 2 bruges som randbetingelse.

Figur 7 viser, at brugen af temperaturen i knude 2 resulterer i en meget bedre overensstemmelse mellem målinger og simulering, og det kan derfor konkluderes, at målingen af overfladetemperaturen til en vis grad er fejlbehæftet.

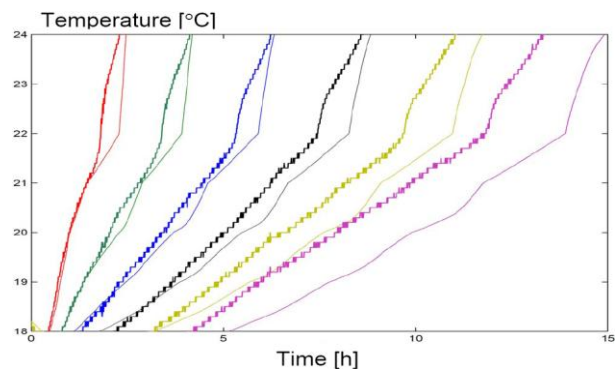
Test C

Test C er identisk med test A, dog med den forskel at starttemperaturen er lavere end smeltepunktet for PCM'en. Figur 8 viser temperaturer for både målinger og simulering. I simuleringen benyttes temperaturen i knude 2 som randbetingelse.



Figur 8. Test C. Kontinuerlig opvarmning på én side af vægkonstruktionen.

Figur 8 viser en relativt god overensstemmelse mellem målinger og simulering. Igen bliver forskellen mellem målinger og beregninger større desto længere ind i konstruktionen man kommer. Dette kunne indikere at smeltevarmen er for lav. Figur 9 viser et nærbillede af temperaturer i området hvor faseskiftet indtræffer, og dette viser at simuleringsmodellen ikke er tilstrækkelig dynamisk til at modellere PCM'en.



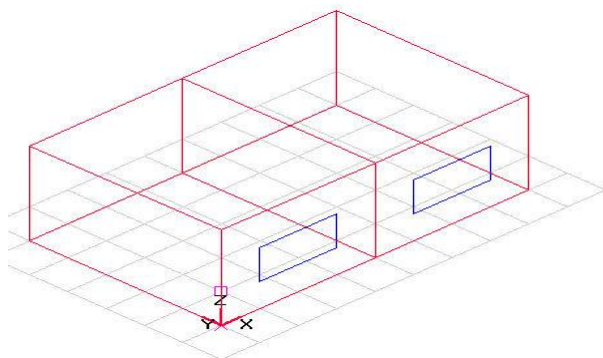
Figur 9. Test C. Nærbillede af faseskift.

Den overordnede konklusion for sammenligningen mellem målinger og simuleringer er, at simuleringsmodellen synes at fungere i almindelighed og generelt er afvigelserne ret små. Hvis overfladetemperaturen, som tilsyneladende var påvirket af lampen i forsøget, udelades fra målingerne, er den

overordnede overensstemmelse mellem målinger og simuleringer god, og der er kun relativt små forskelle i resultaterne.

Beregningseksempler

Der er gennemført en række simple beregninger med henblik på at evaluere PCM modulet. Den model der anvendes i disse beregninger, er en simpel model bestående af 2 kontorer. Kontorerne er geometrisk identiske. Det ene kontor fungerer som reference og det andet kontor benyttes til at teste forskellige konstellationer af PCM. Modellen er vist i figur 10.



Figur 10. Simpel BSim model bestående af 2 kontorer.

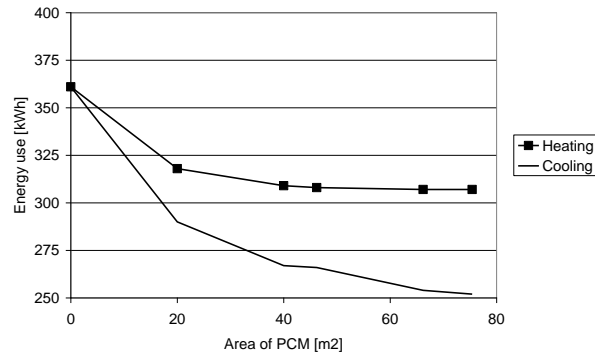
Hvert kontor har en dybde på 5,0 m, en bredde på 4,0 m og en højde på 2,8 m. Begge kontorer har et vindue som er 1,0 m højt og 2,0 m bredt vendende mod syd. Alle konstruktioner i modellen er lette konstruktioner bestående af 225 mm isolering, med 16 mm krydsfiner på begge sider.

Kontorerne har identiske systemer. Den interne varmebelastning er 100 W. varmeanlægget har en maksimal effekt på 100 kW og en sætpunkt på 20 °C. Kølesystemet har en maksimal effekt på 100 kW og en sætpunkt på 24 °C.

Der gennemføres årssimuleringer ved hjælp af vejrdata svarende til Danish Reference Year (DRY). Hvert kontor bruger som udgangspunkt hhv. 361 kWh/år til opvarmning og 361 kWh/år til køling.

Areal af PCM

Den første analyse er en undersøgelse af hvor meget PCM som kan udnyttes i rummet, og om der er en øvre grænse for hvor meget der kan opnås. Krydsfineren på den indvendige side af konstruktionerne erstattes i det ene kontor af SmartBoard (som beskrevet tidligere). I den første simulering udskiftes krydsfineren i loftet med SmartBoard, i den næste udskiftes også krydsfineren på den ene væg og så videre. I den sidste simulering er således alle områder med krydsfiner erstattet af SmartBoard, med undtagelse af skillevæggen mellem de to kontorer. I figur 11 er vist energiforbruget til opvarmning og afkøling som funktion af det samlede areal af PCM.

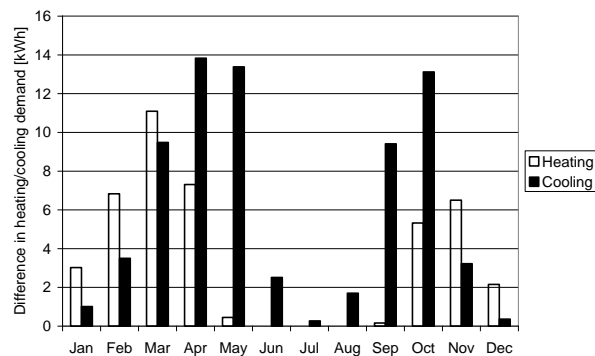


Figur 11. Energiforbrug til opvarmning/køling som funktion af arealet af PCM.

Figuren viser klart, at den relative effekt af PCM reduceres når arealet forøges. For de første 20 m² reduceres energiforbruget væsentligt, mens de sidste 20 m² næsten ingen reduktion giver. Dette er forventeligt, da der helt naturligt vil være en øvre grænse for hvor meget PCM der kan udnyttes.

Variation over året

Hvis vi nu tager et nærmere kig på resultaterne af simuleringen for situationen med 16 mm PCM på loftet, og undersøger hvordan behovet for opvarmning og afkøling varierer over året, får vi resultater som vist i figur 12.



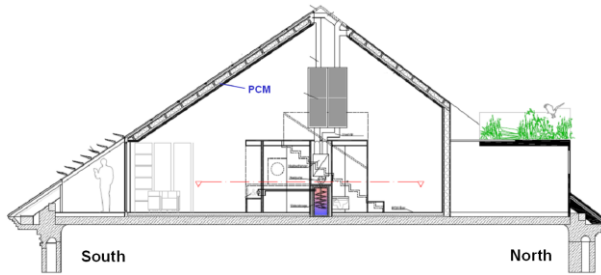
Figur 12. Forskel i opvarmnings- og kølebehov mellem model med og uden PCM.

Figur 12 viser at forskellen i opvarmnings- og kølebehov mellem de to kontorer, er større i foråret hhv. efteråret end om vinteren og sommeren.

Årsagen til dette er at rumtemperaturen om vinteren er lav (tæt på de 20 °C) for begge kontorer og derfor aktiveres PCM'en ikke. Om sommeren er det den modsatte situation der gør sig gældende; temperaturen er høj hele dagen hvilket medfører at PCM'en ikke får mulighed for at afgive den lagrede varme. Dette viser klart, at udnyttelsen af PCM i kontoret udelukkende er effektiv hvis temperaturen svinger i løbet af dagen, således at PCM'en skiftevis smelter og størkner, ellers er det ikke muligt at drage fordel af materialernes egenskaber.

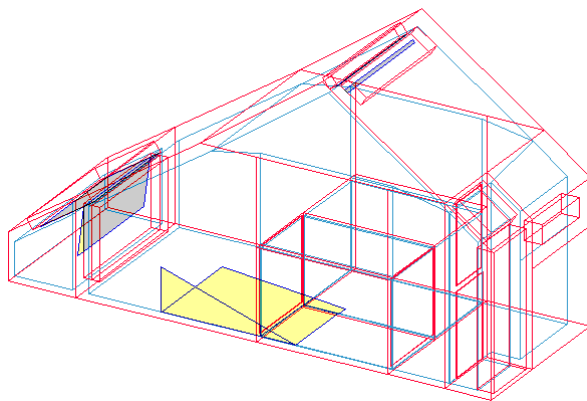
Case study

Et case study er udført med BSim på en lille to-etagers tagbolig beliggende på taget af en eksisterende bygning. Et snit i bygningen er vist i figur 13.



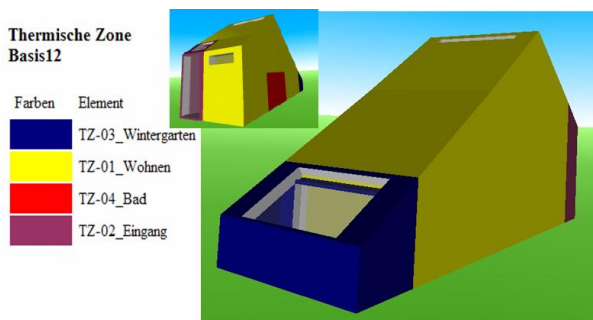
Figur 13. Tværsnit af tagbolig.

Tagboligen er 9,25 m lang og 4,20 m bred. Det samlede etageareal er ca. 60 m² og volumenet er omkring 220 m³. Tag og vægge er lette konstruktioner så tagboligen har en relativt lille termisk masse som udgangspunkt. Bygningen er højisoleret, og U-værdien for taget er 0,155 W/m²K. Til venstre og højre for bygningen er der identiske bygninger. Dette medfører at der (i teorien) ikke er varmeudveksling gennem de østlige og vestlige vægge. I den sydlige ende af tagboligen er der lavet en vinterhave. Opvarmning sker via ventilationssystemet. Bygningen er beliggende i München, Tyskland.



Figur 14. BSim model af tagboligen.

Formålet er nu, ved hjælp af BSim, at optimere det termiske indeklima ved at bruge PCM i bygningen. Bygningsmodellen som simuleres i BSim er konstrueret som en model med fire termiske zoner (bolig, badeværelse, vinterhave, og entré). Som vejrdata er benyttet TRY 13 (München).



Figur 15. VRML præsentation som viser de termiske zoner i BSim modellen (fra 3D Thermal-View).

Der er gennemført simuleringer af to varianter af tagboligen:

Variation 1 er "Basis", der repræsenterer tagboligen uden PCM, dvs. svarende til en reference. Nattekølingen er i denne model sat til maksimalt 5 h⁻¹ med en setpunkttemperatur på 20,5 °C. Nattekøling er begrænset til sommermånederne.

Variation 2 er "PCM". I denne model er der benyttet Micronal SmartBoard med en tykkelse på 15 mm på den indvendige side af tagkonstruktionen i

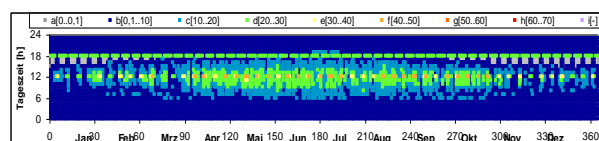
stedet for gipsplader. Nattekølingen er igen sat til maksimalt 5 h^{-1} med en setpunkttemperatur på $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$, og nattekøling foretages kun i sommermånederne.

I begge modeller indsættes en varmebelastning svarende til hhv. personbelastning, udstyr, belysning og solindfald. Størrelsen af varmebelastningen er vist i tabel 1.

Tabel 1. Varmebelastning anvendt i de to BSim modeller.

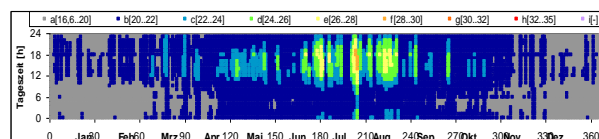
Zone		Total	People	Equipment	Lighting	Solar
Heat load	[W/m ²]	30,9	2,4	16,7	7,0	30,1
Heat energy	[kWh/m ² a]	73,4	14,8	6,1	15,1	37,5

Figur 16 viser den totale varmebelastning for hver time af året i den termiske zone "bolig". Man kan endda se den varme, der kommer fra madlavning kl. 12:00 og kl. 18:00.

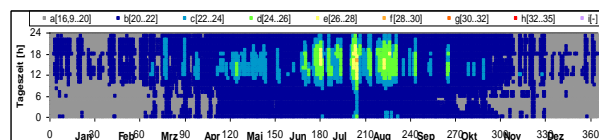


Figur 16. Total varmebelastning [W/m²] over året.

Rumtemperaturen for zonen "bolig" er vist i hhv. figur 17 og 18.

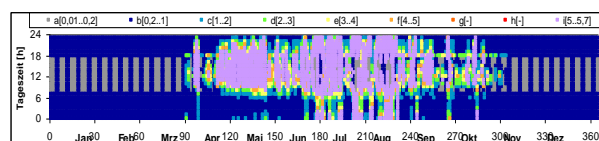


Figur 17. Rumtemperatur [°C] for "Basis" modellen.



Figur 18. Rumtemperatur [°C] for 'PCM' modellen.

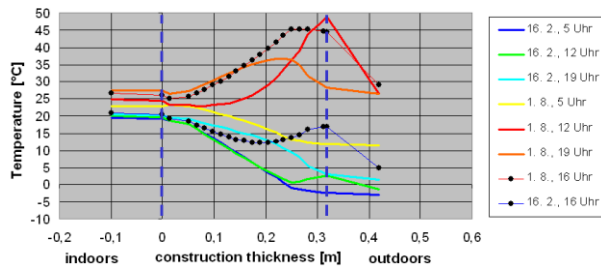
Figurene ovenfor viser rumtemperaturen for hver af de 8760 timer i et år fordelt på timerne i døgnet (Y-aksen) og dagene i året (X-aksen). Figur 17 viser temperaturen i zonen "bolig" for "Basis" modellen mens figur 18 viser tilsvarende modellen 'PCM'. Sammenlignes de to figurer, kan man se at bygningen med PCM generelt får lavere rumtemperaturer om sommeren. I vinterperioden er rumtemperaturerne i de to varianter meget ens. Overtemperaturer (rumtemperaturer over $26 \text{ }^\circ\text{C}$) forekommer 0,6% af tiden for "Basis" og 0,2% af tiden for "PCM". Luftsiftet er næsten det samme i begge modeller.



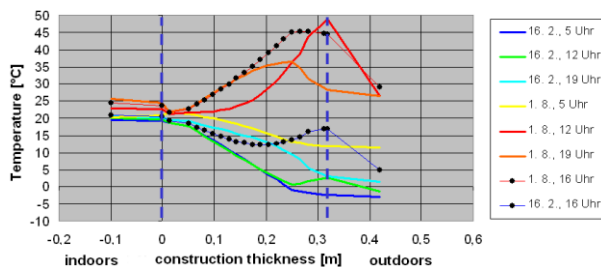
Figur 19. Luftsifte [h⁻¹] over året for 'PCM' modellen.

BSim beregner også temperaturfordelingen gennem konstruktionerne. Diagrammerne vist i figur 20 og 21 viser temperaturen i tagkonstruktionen. Temperaturerne er vist for hhv. en kold vinterdag (16 februar kl. 05:00, 12:00, 16:00 og 19:00) og en varm sommerdag (1. august kl. 05:00, 12:00,

16:00 og 19:00). Figur 20 viser resultatet for "Basis" modellen og figur 21 viser resultatet for "PCM" modellen.



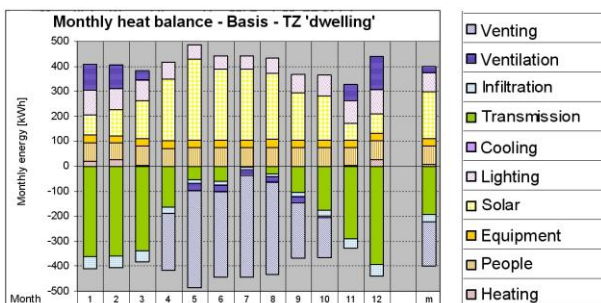
Figur 20. Temperaturer i tagkonstruktion med gipsplader – "Basis".



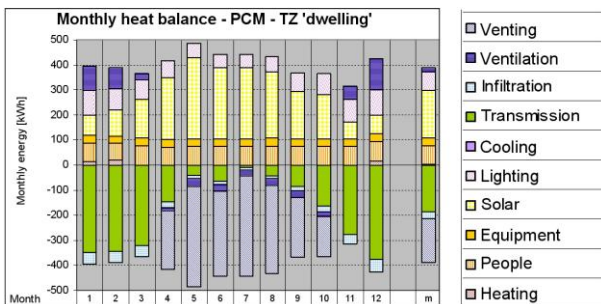
Figur 21. Temperatur i tagkonstruktionen med faseskiftende materiale – "PCM".

Af figurerne er det tydeligt at der er meget små forskelle i resultaterne. For vinterdagen er temperaturforløbene stort set identiske, hvilket også er forventeligt da PCM'en ikke aktiveres. For sommerdagen er temperaturerne også meget ens, men specielt indetemperaturen (venstre side af graferne) viser at der i situationen med PCM haves en temperatur som er ca. 2,1 °C lavere end for situationen uden PCM.

I figur 22 og 23 er vist de månedlige varmebalancer for zonen "bolig".



Figur 22. Månedlig varmebalance for den termiske zone "bolig" – "Basis".



Figur 23. Månedlig varmebalance for den termiske zone "bolig" – "PCM".

Forskelle mellem figur 22 og 23 ligger primært i den månedlige energi til opvarmning (heating): Bygningen uden PCM ("Basis") har generelt brug for mere energi til opvarmning om vinteren.

Tabel 2 viser de væsentligste forskelle i resultaterne.

Tabel 2 Simulation resultater for 'Grundlag' og 'PCM'

Name	Zone	[>26°C] [h/a]	Max. [°C]	Heating_total [kWh/m²a]	Venting [kWh/m²a]
Basis	Dwelling	39	28,7	10,4	35,2
PCM	Dwelling	13	28,0	8,8	35,4

Tabel 2 viser, at man ved at benytte PCM Micronal SmartBoard i tagboligens tagkonstruktion kan reducere antallet af timer med overophedning fra 39 til 13 timer. I løbet af en dag hvor PCM'en udnyttes (sommerdage) bliver rumtemperaturen op til 2 °C lavere i bygningen med PCM end i bygningen uden. Opvarmningsbehovet falder ligeledes en lille smule. Energibehovet til udluftning for at undgå overtemperaturer forbliver næsten det samme.

Diskussion

Der er tilføjet et PCM modul til bygningssimuleringsprogrammet BSim, og der er foretaget en simpel validering af modulet på baggrund af simple laboriemålinger. Denne analyse viser at modulet med rimelig nøjagtighed kan forudsige PCM's betydning når den anvendes i bygningskonstruktioner.

Simple beregninger viser, at der er en øvre grænse for hvor stor en mængde PCM der kan udnyttes i et givet rum. De simple beregninger demonstrerer i øvrigt hvordan PCM modulet kan anvendes til at undersøge forskellige aspekter og muligheder der er for anvendelsen af PCM.

Der er også gennemført et case study, hvor PCM er lagt på den indvendige side i en tagkonstruktion. Denne undersøgelse viser, at for at en bygning skal kunne udnytte PCM fuldt ud til klimatisering, er det nødvendigt at have temperatursvingninger af en vis størrelse. Amplituden af temperaturen skal være tilstrækkeligt høj til at PCM'en kontinuerligt "oplades" og "aflades". Hvis temperaturen i bygningen er tæt på at være konstant, bliver PCM'en aldrig aktiveret. For eksempel kan nævnes, at på storknekurven mellem 20 °C og 19 °C (se figur 2) har PCM omkring 20 % af sin enthalpi. For at udnytte dette potentiale er det nødvendigt, at rumtemperaturen kommer under 19 °C, men dette sker ikke da setpunktet for opvarmning er højere.

Konklusion

Der er udviklet en numerisk metode til beregning af latent varmelagring i konstruktioner der indeholder faseskiftende materiale. Beregningsmetoden er implementeret i bygningssimuleringsprogrammet BSim og der er gennemført en simpel validering baseret på sammenligninger med laboriemålinger. Der er endvidere præsenteret nogle simple regneeksempler, der viser, hvordan modulet fungerer, og hvordan det kan udnyttes til teoretiske analyser. Endelig er præsenteret et case study som eksempel – dette demonstrerer hvorledes beregningsmodulet kan bruges til optimering af indeklimaet i et rum ved hjælp af PCM.

Implementering af PCM beregning i Be10

I forbindelse med udgivelsen af den seneste version af beregningsprogrammet Be10, er der tilføjet mulighed for at medtage effekten af faseskiftende materiale i bygninger. I modsætning til BSim foretages beregningerne i Be10 på baggrund af månedsmiddelværdier for temperaturer mv., og da udnyttelsen af PCM, som tidligere vist, er meget afhængig af temperatursvingning-

gerne over døgnet, er det vanskeligt at kvantificere effekten af PCM i et "simpelt" beregningsprogram som Be10.

Det er derfor som udgangspunkt valgt, at PCM indgår i Be10 beregninger ved en forøgelse af varmekapaciteten for bygningen som angives under menupunktet "Mekanisk køling". Værdien indsættes i Wh/m^2 , og dermed medtages effekten af PCM som et tillæg til bygningens samlede varmekapacitet. PCM vil dermed have størst potentiale i bygninger der i forvejen har en relativt lav samlet varmekapacitet.

Det forventes at den simplificerede beregningsmetode for PCM som benyttes i Be10 i fremtiden vil blive revideret/udvidet, så den i højere grad afspejler mulighederne for klimatisering af bygninger vha. PCM. Beregningsmetoder videreudvikles i forbindelse med EUDP projektet "Multifunction fabrics for new building and retrofitting".

Energi- og indeklimapotentiale

Indledning

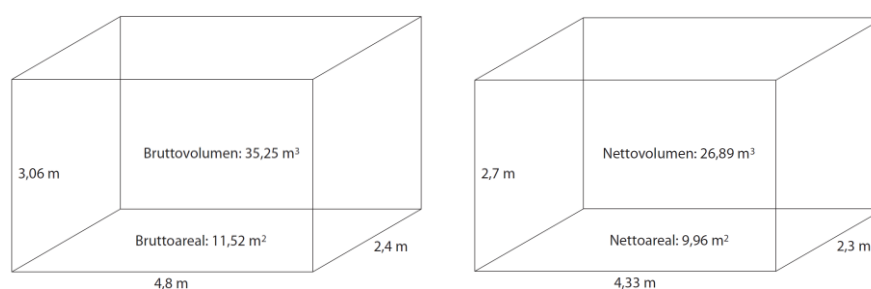
I denne undersøgelse fokuseres på passiv køling der kunne omhandle en reduktion af belastninger, udnyttelse af naturlige varmedræn eller akkumulering af varme. I dette projekt er der anvendt en kombination af de to sidstnævnte til at evaluere potentialet af faseskiftende materialer (PCM) i bygninger. Ved brug af naturlig ventilation skal udeluften benyttes som varmedræn til at bortlede varmen i bygningen. Det er dog ikke muligt i sommerdagtimerne, dels pga. høj udetemperatur og dels pga. begrænsninger af ventilationsrater. Derimod er der masser af kølingspotentiale om natten, hvorfor natventilation er særlig interessant. Idet ventilationen ikke aktiveres sammenfaldende med belastningerne i dagtimerne, er varmeakkumulering en essentiel del af natventilation. Det grundlæggende princip er at akkumulere belastningerne i den tunge bygningsmasse i løbet af dagen og derefter bortlede den gemte varme om natten, hvor kølingspotentialet er størst. På den måde er ideen at fremtidens bygninger kan holdes komfortable om sommeren, uden at det kræver ekstra energi til mekanisk køling.

Bygningens evne til at akkumulere varme er bestemt ved dens varmekapacitet. Tungere bygningsdele har en højere kapacitet og kan således binde mere varme. Hvis bygningen ikke har tilstrækkelig varmekapacitet eller de tungere dele f.eks. ikke er eksponerede, kan varmekapaciteten øges markant ved at anvende faseskiftende materialer. Disse er karakteriseret ved at kunne akkumulere betydelige energimængder ved selv små temperaturstigninger, når materialet skifter fase fra fast til flydende form og frigive det igen ved den modsatte proces.

Som nævnt er formålet med denne undersøgelse at evaluere energibesparelses- og indeklimaforbedringspotentialet ved brug af PCM i bygninger. På baggrund af ovenstående forventes implementering af PCM at kunne nedbringe det mekaniske kølebehov.

Parametervariation

Det er besluttet at undersøge effekten af implementering af PCM i et kontormiljø, idet kølebehovet typisk er stort. Udgangspunktet er en række cellekontorer side om side. Da de alle er ens, fokuseres der i simuleringerne kun på et enkelt cellekontor. I figur 1 er cellekontorets mål vist.



Figur 1. Brutto- og nettomål for cellekontor

Kontoret har et areal på 4,8 m x 2,4 m med øvrige brutto- og nettomål som vist på ovenstående figurer.

Under simuleringerne er det valgt at variere fem parametre, som alle har stor indflydelse på varmeakkumuleringen i og belastningen på bygningen. De fem parametre og de værdier der har været benyttet er listet i tabellen nedenfor.

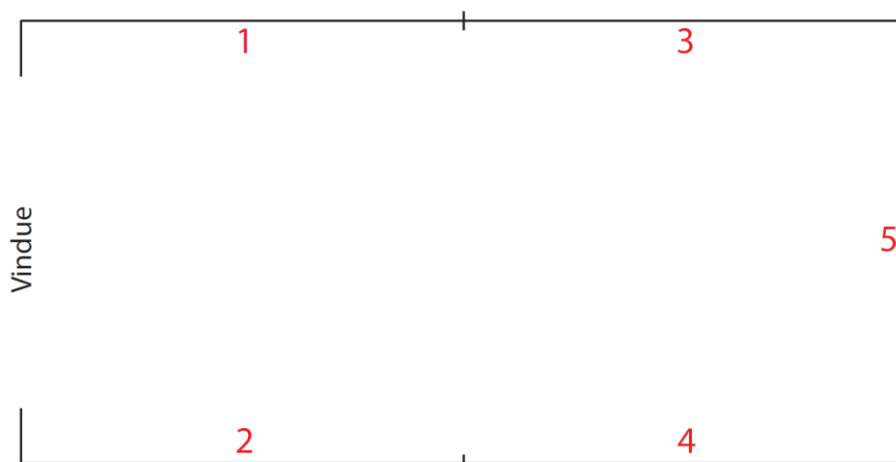
Brugen af rummet er den samme for alle simuleringerne, hvorfor antallet af personer og udstyr ikke ændres.

PCM [%]	g-værdi [-]	Natvent. [h ⁻¹]	Rudestørrelse [m ²]	Orientering [-]
0	0,60 (ingen solafskærmning)	0	2	N
20	0,50 (indvendig gardin, åben)	2	4	NØ
40	0,40 (indvendig gardin, tæt)	4	6	Ø
60	0,30 (gardin mellem glaslag)	6		SØ
80	0,20 (udvendig rullegardin)	8		S
100				SV
				V
				NV

Den ønskede parametervariation resulterer samlet set i 3600 årssimuleringer. Til at udføre de omtalte simuleringer benyttes BSim. Opsætningen af modellen i BSim er beskrevet i afsnittet "Modelbeskrivelse".

PCM

Modelleringen af de forskellige mængder af PCM er sket ved at opdele kontorets indervægge i fem dele som vist i figur 2. Det betyder at hver af de to lange sider er opdelt i to mindre vægge.



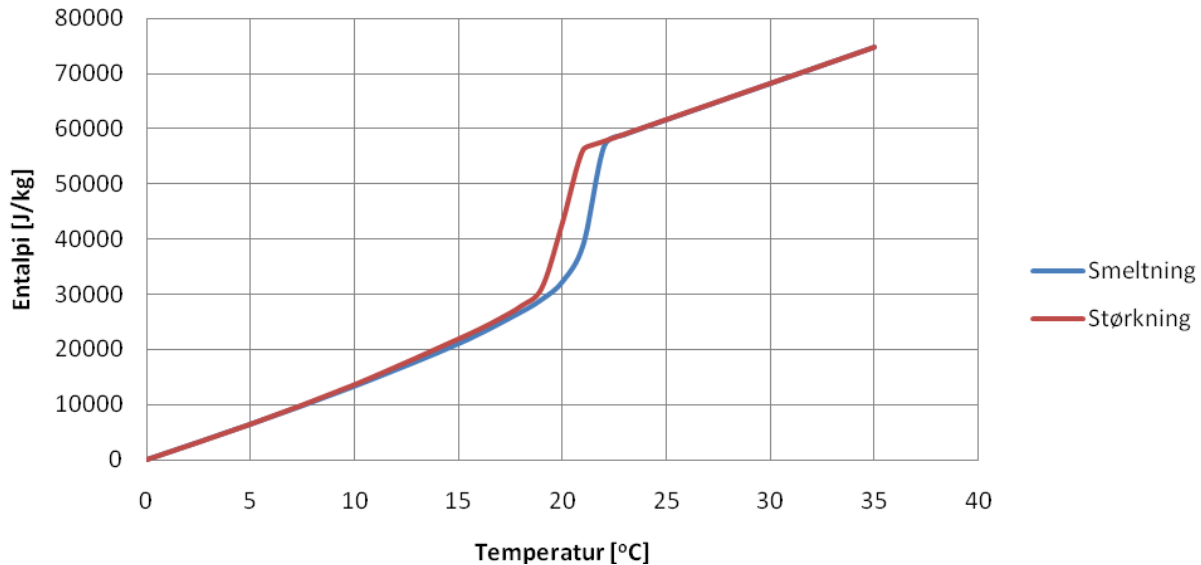
Figur 2. Opdeling af kontorets indervægge (arealer med PCM).

Implementering af PCM sker i det yderste lag gips. Det er tilføjet efter følgende mønster, når der er kørt simuleringer:

0 %	Ingen
20 %	Væg 5
40 %	Væg 1 + 2
60 %	Væg 3 - 5
80 %	Væg 1 - 4
100 %	Alle

Til gipsmaterialet er der tilføjet 30 vægt % PCM. Egenskaberne fra ovenstående tabel forbliver de samme for kompositmaterialet. Den integrerede PCM

består af mikroindkapslede enheder af paraffin, hvilket er udviklet, så smeltepunktet er 23 °C. I faseskiftet mellem fast og flydende form bindes betydelige energimængder og frigives ved den modsatte proces. Disse egenskaber ønskes udnyttet til at dæmpe temperaturfluktuationer i kontoret henover dagen ved at akkumulere varmebelastning og frigive det ved natventilation. På nedenstående figur er enthalpien for PCM materialet plottet som funktion af temperaturen.



Figur 3. Enthalpi som funktion af temperaturen for PCM med smeltepunkt på 23 °C.

g-værdi, solafskærmning

Solafskærmning modelleres ved at sænke g-værdien af glasset i vinduerne. I tabellen på foregående side er der i parentes angivet hvilken solafskærmning reduktionen i g-værdien svarer til (Andersen, Heiselberg & Aggerholm, 2002). Modelling af solafskærmningen vha. ændring af g-værdien er taget ud fra simulerings-tekniske hensyn og er en udmærket approksimation for køleperioden.

Natventilation

Natventilationen er afgørende for at kunne fjerne den energi der oplagres om dagen. Det er valgt at natventilationen er aktiv hele tiden uden for brugstiden. Dvs. at hvis udetemperaturen er lav i weekenden åbnes vinduerne.

Vinduesstørrelse

Vinduesstørrelsen er afgørende for solindfaldet og det er valgt at variere størrelsen fra "hele facaden" til "minimum". "Hele facaden" svarer til ca. 6 m² og "minimum" til ca. 2 m² for at opfylde kravene til dagslys. Der undersøges også for en "mellem værdi" på 4 m².

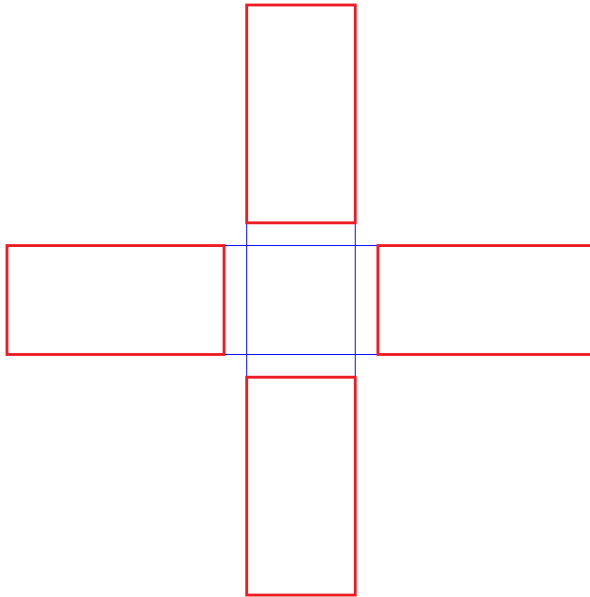
Orientering

Da solindfaldet er afgørende for kølebehovet, undersøges otte forskellige orienteringer (S, SV, V osv.).

Modelbeskrivelse

I det følgende vil opbygningen af modellen til brug ved de nævnte simuleringer samt de tilhørende overvejelser blive gennemgået. Til at undersøge og evaluere energibesparelses- og indeklimaforbedringspotentialer af PCM opbygges en model med et kontor vendt mod hvert af de fire verdenshjørner,

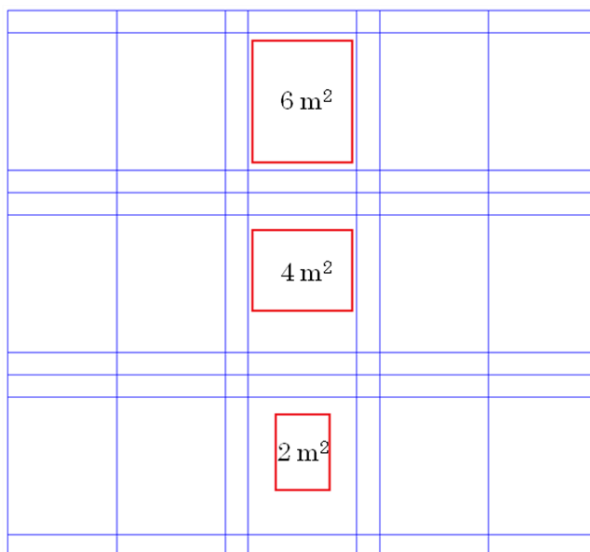
som vist på følgende figur. Hvert kontor vil i modellen blive modelleret som en termisk zone, så de ikke påvirker hinanden.



Figur 4. Plan af model. Cellekontorer vendende mod 4 forskellige retninger.

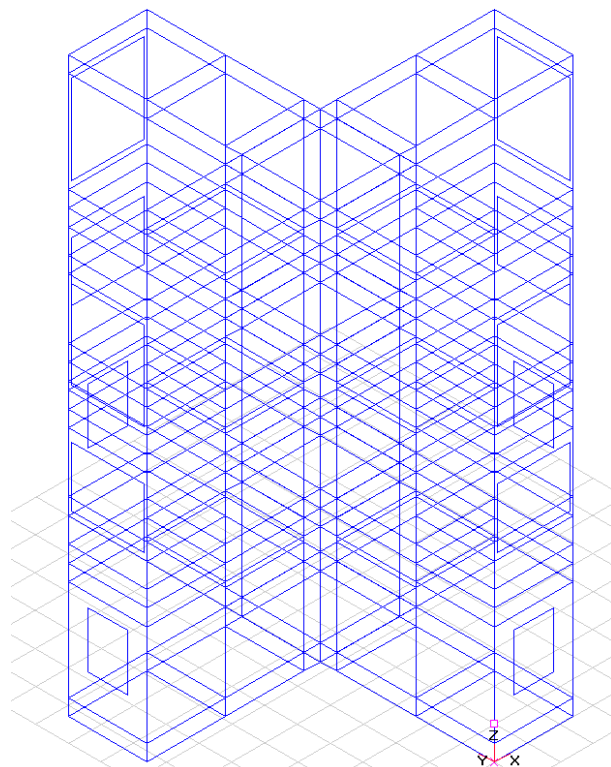
Endvidere vil denne model blive simuleret for både 0 og 45 grader, således at de i alt otte orienteringer undersøges. For at øge styrken af denne variation og opnå en grundigere evaluering af potentialet af PCM, opbygges modellen med tre vinduesstørrelser. Som med de fire orienteringer, er det valgt at implementere de tre vinduesstørrelser i den samme model, så løbende ændringer af parametre og lignende kun skal gøres dette ene sted fra simulering til simulering. Dette er gjort ved at udvide fra en etage til tre, som vist på nedenstående figur. Størrelserne af vinduerne er valgt således at det største fylder hele enden af kontoret (6 m²) og derefter følger 4 m² og 2 m².

Modellen er opbygget så det er muligt at dække alle orienteringer samt vinduesstørrelser ved hver simulering.



Figur 5. BSim model med 3 etager repræsenterende forskellige vinduesstørrelser.

Modellen ser nu i sin helhed ud som vist i figur 6.



Figur 6. BSim model anvendt i analyse.

I det følgende beskrives en række af de elementer som er indtastet i BSim. I den første tabel er informationen om de forskellige bygningskomponenter listet.

Emne	U-værdi	Materialer	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	c_p [J/kgK]
Ydervæg	0,17	Beton, 70 mm	2400	2,1	1000
		Isolering, 200 mm	21	0,037	800
		Beton, 150 mm	2400	2,1	1000
Etagedæk	0,67	Trægulv, 20 mm	950	0,14	1800
		Huldæk, 320 mm	1440	0,4	1000
		Isolering, 20 mm	21	0,037	800
Indervæg	0,46	2 lag gips, 30 mm	880	0,2	1000
		Isolering, 40 mm	21	0,037	800
		2 lag gips, 30 mm	880	0,2	1000
Vinduer	Glas:	U-værdi: 1,1	-	-	-
		Transmittans: 0,78			
	Ramme:	U-værdi: 1,8			
		Area: 20 % af murhul			

I den næste tabel er kontorets systemer listet. Arbejdstid angiver mandag – fredag kl. 8 – 17, opvarmningssæson angiver september – maj.

System	Beskrivelse	Tidsplaner (schedule)	
		Regulering	Tidsangivelse
Personlast	1 person, standard	80 % tilstede	Arbejdstid
Udstyr	60 W	100 % tændt	Arbejdstid
Infiltration	Luftskifte 0,12 h ⁻¹	100 %	Arbejdstid
		63 %	Altid
Belysning	Almen belysning 90 W	Dagslysregulering	Arbejdstid
	Arbejdslys 7 W	Ønsket 200 lux	
	Dagslysfaktor 3 %	Kontinuert	
	Lysstofrør (Fluorescent)		
Opvarmning	MaxPow 1 kW	Set Point 20°C	Opvarmningssæson
Ventilation	<u>Input</u>	Tin1 on line 18 °C	Arbejdstid
	Supply 0,02 m ³ /s	Tin2 on line 18 °C	
	Pressure Rise 0 Pa		
	<u>Output</u>		
	Return 0,02 m ³ /s		
	Pressure Rise 0 Pa		
	<u>Recovery Unit</u>		
	Max Heat Rec 0		
	<u>Heating Coil</u>		
	Max Power 0 kW		
Udluftning	Luftskifte 2 h ⁻¹	SetPoint 26 °C	Arbejdstid
		SetPoint 22 °C	Altid

Referencepunktet til beregning af dagslysfaktoren er valgt placeret i midten af rummets plan i bordhøjde (0,85 m)

Resultatbehandling

Resultatet af projektet bliver en evaluering af antallet af overtemperaturlimer over 26 °C henholdsvis 27 °C for alle kombinationer af parametre, samt en beregning af besparelsespotentialet for mekanisk køling.

Intern belastning

Resultaterne er primært opgjort i forhold til den samlede interne belastning der er beregnet efter følgende formel:

$$q = \frac{Q_{\text{år}}}{t_{\text{år}} \cdot A_{\text{gulv}}} = \frac{Q_{\text{intern}} + Q_{\text{sol}}}{8760h \cdot 11,52m^2}$$

Hvor:

q	Varmebelastningen i kontoret [W/m ²]
Q _{år}	Den årlige belastning i kontoret [kWh]
t _{år}	Antal timer på et år [h]
A _{gulv}	Gulvareal [m ²]
Q _{intern}	Intern belastning [kWh]
Q _{sol}	Belastning fra solen [kWh]

Termisk masse

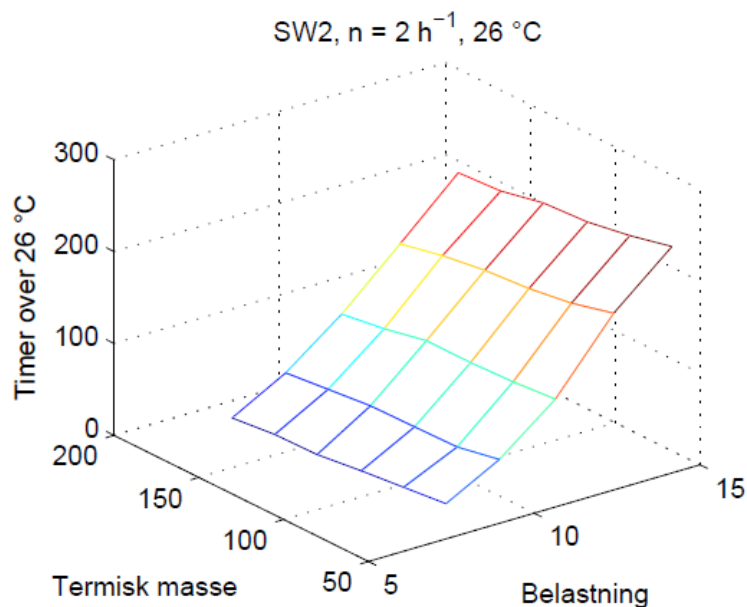
Beregning af den termiske masse er sket i henhold til EN ISO 13786 Annex A (European Standard, 2005). Ved beregningen er der taget hensyn til følgende:

- Termisk masse i inventaret er medtaget
- Varmeakkumulering i etagedækket er ikke medregnet, idet der er trægulv ovenpå samt isolering under
- Den termiske masse af PCM er taget fra BSim

Resultatgrafer

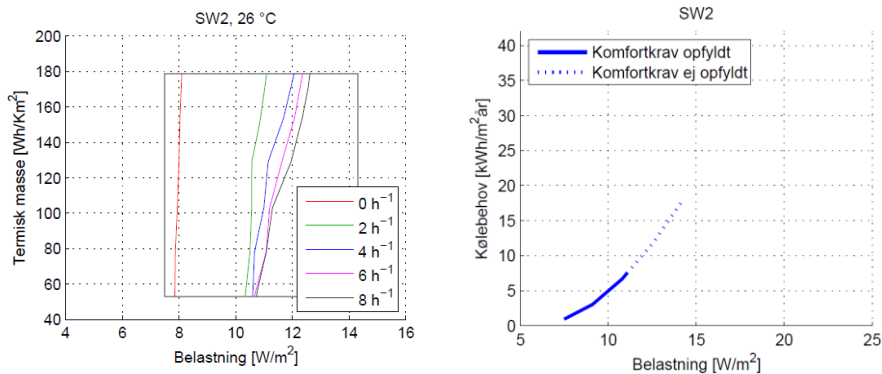
Ideen med resultatbehandlingen er at skabe designkurver for hvert rum på baggrund af belastningen i rummet, den termiske masse og natkølingens luftskifte. Designkurverne skal indikere hvilke kombinationer af de tre parametre, der sikrer et anbefalet termisk indeklima med maksimalt 100 timer over 26 °C og 25 timer over 27 °C. I første omgang er det valgt at plote antallet af overtemperaturtimer som funktion af belastningen og den termiske masse med et låst luftskifte. Dette er således gjort for alle luftskifter, alle rum, alle orienteringer og både 26 og 27 °C. Et eksempel på en resultatmatrix og tilhørende plot er vist på nedenstående figurer. Tabellen viser antallet af overtemperaturtimer over 26 °C, som funktion af belastningen (vandret) og den termiske masse (lodret). Dette er plottet i figur 7.

Termisk masse [Wh/Km ²]	Intern belastning [W/m ²]				
	14,3	12,6	10,8	9,1	7,5
53	242	188	113	65	34
78	231	176	109	56	29
103	223	169	107	55	24
129	220	165	107	54	18
154	210	158	97	49	17
179	207	148	90	44	12



Figur 7. Antal timer over 26 °C som funktion af belastning og termisk masse.

Efterfølgende udtages konturlinjen svarende til skæringen med 100 timer over 26 °C (tilsvarende for 25 timer over 27 °C) og dette plottes for alle luftskifter som funktion af belastning og termisk masse. Dette er således de ønskede designkurver og et eksempel kan ses på figur 8 (venstre). Samtidig er der for alle cases undersøgt hvad det ville koste af energi at opretholde det anbefalede termiske indeklima ved brug af mekanisk køling. Dette er altså tænkt som det besparelespotentiale, der kan opnås ved implementering af de passive løsninger. Et eksempel er vist på figur 8 (højre), hvor det nødvendige kølebehov er plottet som funktion af den korresponderende varmebelastning i rummet. Der er dels angivet i hvilket interval det anbefalede termiske indeklima er opfyldt og dels de yderligere muligheder for besparelse, hvis der kan kompenseres på dette område. Ved beregning af energi til mekanisk køling er natventilationen 0 h^{-1} .



Figur 8. Eksempel på designkurver.

Den samlede række af resultater er præsenteret i rapporten ”Energibesparelses- og indeklimateforbedringspotentialet”.

Konklusion

Resultaterne viser generelt at indsættelse af PCM har positiv indflydelse på bygningens evne til at kunne nedbringe overtemperaturtimer. Ved et natluftskifte på 0 h^{-1} er der kun meget lille effekt at spore ved at øge den termiske masse, mens effekten naturligt bliver større ved øget luftskifte.

At holde maksimalt 25 timer over 27 °C i rummet viste sig at være det designgivende komfortkrav i alle tilfælde, frem for maksimalt 100 timer over 26 °C . Det er dog ikke muligt i alle de opstillede tilfælde at nedbringe antallet af overtemperaturtimer til et acceptabelt niveau med det valgte parameterinterval for luftskiftet og PCM og uden brug af solafskærmning (reduceret g-værdi). Ved alle simuleringer med den mindste vinduesstørrelse kunne det termiske indeklimate holdes under det beskrevne antal overtemperaturtimer for alle orienteringer og g-værdier. Problemet forekommer i rum med høje g-værdier for de største og mellemstore vinduer, og i høj grad hvor orienteringen er mod syd, sydøst og sydvest, men også for de øst- og vestorienterede rum. Det er dog muligt med en lav g-værdi at holde belastningen nede på niveau, således det termiske indeklimate blev acceptabelt.

Virksomheden af det indsatte PCM er forskellig for de forskellige orienteringer og vinduesstørrelser. Overordnet giver forskellen mellem at indsatte 0 % og 100 % PCM en evne til at holde det samme termiske indeklimate med yderligere intern belastning på ca. $1 - 1,5 \text{ W/m}^2$ i rummet.

Resultatet af undersøgelsen af energibesparelsespotentialet til mekanisk køling er, at besparelsen generelt ligger omkring 5 kWh/m^2 pr. år, med et acceptabelt termisk indeklimate. Skal det termiske indeklimate holdes på maksimalt 25 timer over 27 °C , må gennemsnitsbelastningen for rummet i bedste tilfælde være ca. 12 W/m^2 og i sådan en situation vil det være muligt at spare omkring 10 kWh/m^2 pr. år. Det er muligt at spare helt op til 40 kWh/m^2 pr. år ved at bruge de valgte passive løsninger. Dette er dog afspejlet af tilsvarende høje belastninger, som ikke kan fjernes udelukkende ved passive løsninger. Konsekvensen bliver således, at kravene til termisk komfort ikke kan overholdes.

For at få et mere detaljeret overblik over resultaterne, er der i nedenstående tabel listet kriterierne for at opfylde komfortkravene og dermed opnå et tilfredsstillende termisk indeklimate for alle kombinationer af rudestørrelse og orientering. For hver kombination er mindstekravet til mængden af PCM (% af indvendig overfladeareal), minimumsluftskiftet af natventilationen (h^{-1}), den maksimale g-værdi (-) samt besparelsen til mekanisk køling (kWh/m^2 pr.

år) angivet. Der er ikke foretaget interpolation, så der er således rundet af til nærmeste hele værdi af alle parametre (der er rundet op for PCM og natluftskifte og ned for g-værdi).

Fra tabellen kan det ses at det er muligt at sikre opfyldelse af det termiske indeklimate udelukkende ved brug af passiv køling for alle vinduesstørrelser. Det eneste tilfælde hvor kravene til termisk indeklimate kan opfyldes uden passiv køling er for en nordlig orientering og en rude størrelse på 2 m². For alle øvrige orienteringer og rude størrelser er der behov for passiv køling i større eller mindre omfang. Tilsvarende kan det ses at for 6 m² vindue er det kun den nordlige retning der ikke kræver solafskærmning (reduceret g-værdi), mens det for 4 m² vindue også gælder NV og NØ.

Der bør derfor som udgangspunkt være mulighed for solafskærmning og natventilation i alle kontorer.

		N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV
2 m ²	PCM						20		
	n nat g	0	2	2	2	2	2	2	2
	Bespar.	0,4	1,4	4,9	5,2	3,8	5,2	4,7	1,5
4 m ²	PCM		100	100	100	100	100	100	
	n nat g	2	4	8	8	8	8	8	4
	Bespar.	1,9	6,2	6,0	6,8	5,1	6,7	9,8	5,6
6 m ²	PCM	80	100	40	80	40	100	100	100
	n nat g	4	8	2	2	2	2	8	8
	Bespar.	4,1	3,8	1,6	2,1	1,7	2,3	5,3	6,6

Anvendelses- og videreudviklingspotentiale

Beregninger og målinger har vist at der kan opnås pæne energibesparelser til køling og opvarmning af bygninger ved anvendelse af byggematerialer indeholdende PCM. Men prisen på materialerne er stadig høj, hvilket i langt de fleste tilfælde medfører lange tilbagebetalingstider. I visse tilfælde kan anvendelsen af PCM medføre en så stor reduktion i kølebehovet at installation af køleanlæg helt kan undgås. Derved reduceres anlægsomkostningen betragtelig og så begynder det at hænge sammen økonomisk.

En barriere for større udbredelse af PCM-byggematerialer er besværlighederne og omkostningerne ved at dokumentere den energimæssige besparelse ved anvendelse af PCM i en konkret bygning. For at overkomme den barriere er det helt afgørende at funktionaliteten med kvantificering af PCM's energibesparelspotentiale bliver implementeret i værktøjer som Be10. I den seneste version af Be10 er der indført en simplificeret metode så PCM kan medtages i beregningerne. Dele af projektgruppen arbejder videre med at videreudvikle disse metoder under regi af EUDP projektet "Multifunction fabrics for new building and retrofitting".

Ud over de beregningstekniske barrierer har forsøg og beregninger også kortlagt mere teknisk prægede udfordringer. For at få den optimale energigevinst ud af PCM i byggematerialer kræver det helhedsorienterede løsninger hvor der tages hensyn til forhold som bygningens geometri og orientering, materialet hvori PCM indgår og er placeret samt samspillet med bygningens tekniske installationer (eksempelvis ventilationsanlæg) for at tilvejebringe den nødvendige temperaturmæssige konditionering af PCM'en. Dette område skal udforskes yderligere og også her arbejder dele af projektgruppen videre med mere detaljerede undersøgelser. Eksempelvis i forbindelse med Højteknologiprojektet "PCM concrete prepared for industrial production", hvor udviklingsarbejde pågår for at udvikle nye betonbaserede byggekomponenter med et større indhold af PCM, og mere optimale forhold for aktivering af PCM'en. Eksempelvis har betondækelementer den fordel at de kan indgå i en bygning med undersiden blotlagt og dermed give optimale betingelser for energitransport ind og ud af konstruktionen. Indledende undersøgelser indikerer tilmed at termoaktive betondæk med indstøbte pex-rør forbedrer mulighederne for at udnytte det indbyggede PCM mere optimalt, da man ved at cirkulere tempereret vand igennem dækket hurtigere kan bringe betonen og PCM til det mest optimale temperaturniveau. Forhold som konstruktionernes eksponeringsgrad i forhold til bygningens indre og muligheden for hurtig og pålidelig temperaturkonditionering af konstruktionerne er centrale i forhold til at udnytte det indbyggede PCM mest optimalt.

Formidling

Projektet er formidlet løbende gennem projektperioden. Der er blevet udarbejdet et internationalt konferencebidrag som beskriver hvorledes faseskiftende materialer håndteres beregningsmæssigt i forbindelse med bygnings-simulering. Herudover er der udarbejdet adskillige artikler til nationale tidskrifter, fagblade og aviser samt afholdt foredrag, oplæg og præsentationer i forskellige sammenhænge for at formidle projektets resultater. Projektets vigtigste analyse – ”Energi- og indeklimapotentiale” – er endvidere beskrevet i detaljer i en separat rapport. Sammen med nærværende rapport er der udarbejdet en pjece som har til formål at informere den danske byggebranche om muligheder og potentiale for anvendelsen af faseskiftende materialer i danske bygninger. Nedenfor er opstillet en liste over formidlingsaktiviteter gennem hele projektperioden:

1. "Betongens energi- och klimamässige fördelar", Bygg & teknik 8/08.
2. "Nyt fra Betoncentret", Beton, november 2008.
3. Foredrag "Faseskiftende materialer – Beregningsmetoder", IDA – Selskab for Bygningsfysik, Ingeniørhuset, december 2008.
4. "Betoncenter vil optimere betons energimæssige fordele", Beton, februar 2009.
5. "Afprøver ny varmeakkumulerende beton", Byg-Tek, Nr. 1 - 13. februar 2009.
6. "Køling på kontorer uden brug af el", ELFORSK Nyt, februar 2009.
7. "Beton tænker på temperaturen", Licitationen, 30. Juni 2009.
8. "Numerical method for calculating latent heat storage in constructions containing phase change material", 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Glasgow, Scotland, 2009.
9. BSIm-Nyhedsbrev 2009-1. (beskrivelse af det tilføjede PCM-modul).
10. "Smarte byggematerialer køler om dagen og varmer om natten", Dansk Beton, maj 2009.
11. Foredrag "Energibesparelser og forbedret indeklima med faseskiftende materialer", Indekli-maForum'09, Ingeniørhøjskolen i København, november 2009.
12. Planche "Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger", præsenteret i forbindelse med COP15, 4D Grunden, Ørestads Boulevard, 23. november – 18. december 2009.
13. Foredrag "Anvendelse af faseskiftende materiale i fremtidens bygninger", holdt i forbindelse med COP15, 4D Grunden Ørestads Boulevard, december 2009.
14. "Faseskift er fremtiden for energieffektivt byggeri", HVAC Magasinet Nr. 5, maj 2010.
15. "Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger", HVAC Magasinet Nr. 9, september 2010.

16. "Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger - Forbedring af energieffektivitet og indeklimate, Energibesparelses- og indeklimateforbedringspotentialer", DCE Technical Report No. 101, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet.
17. "Køl af og varm op med faseskiftende materialer. Sammenfatning af SBI 2011:11 Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger. Forbedring af energieffektivitet og indeklimate", Rose, J., Jensen, R. L., Heiselberg, P., Hansen, M., Kjeldsen, A. M., Dous, C. I. og Christensen, N. U., 2011, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI. (SBI 2011:12).
18. "Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger. Forbedring af energieffektivitet og indeklimate.", Slutrapport PSO 340-045 (denne rapport), Rose, J., Jensen, R. L., Heiselberg, P., Hansen, M., Kjeldsen, A. M., Dous, C. I. og Christensen, N. U., 2011, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI (SBI 2011:11).

Deltagerliste

Søren Aggerholm, Statens Byggeforskningsinstitut
Jørgen Rose, Statens Byggeforskningsinstitut
Per Heiselberg, Aalborg Universitet
Rasmus Lund Jensen, Aalborg Universitet
Niels Uhre Christensen, Ingeniørhøjskolen i Århus
Magne Hansen, Teknologisk Institut
Reto M. Hummelshøj, Cowi
Kasper Guldager Jørgensen, 3XN
Carsten Pedersen, Dansk Byggeri
Kristine van het Erve Grunnet, DI Byggematerialer
Jesper Bjerregaard, BASF A/S
Marco Schmidt, BASF SE
Henrik Christensen, Saint-Gobain Weber A/S
Jesper S. Damtoft, Aalborg Portland A/S
Carl Erik Bech, Knauf Danogips A/S
Stefan Völkner, Rockwool International A/S

Referencer

Aggerholm, S., Sørensen, K. G. & Wittchen, K. B. (2008). *Be06 - Beregningsvejledning*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Andersen, K. T., Heiselberg, P. & Aggerholm, S. (2002). *Naturlig ventilation i erhvervsbygninger*. (By og Byg Anvisning 202). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

European Standard (2005). *EN ISO 13786 - Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculations methods*. European Committee for standardization.

Heiselberg, P., Jensen, R. L., Nørgaard, J. & Justesen, R. O. (2010). *Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger - Forbedring af energieffektivitet og indeklima. Energibesparelser- og indeklimateforbedringspotentialer*. DCE Technical Report No. 101, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet.

Pedersen, S. (2008). *PCM, genvinding og fjernelse af varme via faseskiftende materialer*. Ikke publiceret afgangsprøve fra Ingeniørhøjskolen i Århus.

Rose, J., et al. (2011). *Køl af og varm op med faseskiftende materialer. Sammenfatning af SBI 2011:11 Anvendelse af faseskiftende materialer i fremtidens bygninger. Forbedring af energieffektivitet og indeklima*. (SBI 2011:12) Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.).

Rose, J., et al. (2009). Numerical method for calculating latent heat storage in constructions containing phase change material. In *Building Simulation 2009: Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow, July 27 – 30, 2009. Vol. 1* (pp. 400-407). Glasgow: University of Strathclyde.

Wittchen, K. B., Sørensen, K. G., Johnsen, K. & Rose, J. (2008). *BSim - Brugervejledning, 9. udgave*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

I rapporten belyses mulighederne for at forbedre indeklima og reducere energiforbrug til køling og opvarmning i fremtidens bygninger ved anvendelse af faseskiftende materialer. I forbindelse med skærpelserne i Bygningsreglementet 2010, og de kommende i 2015 og 2020, vil der være øget fokus på klimatisering og passiv køling af fremtidens kontorbygninger uden at øge elforbruget til ventilation og mekanisk køling.

1. udgave, 2011

ISBN 978-87-563-1528-9