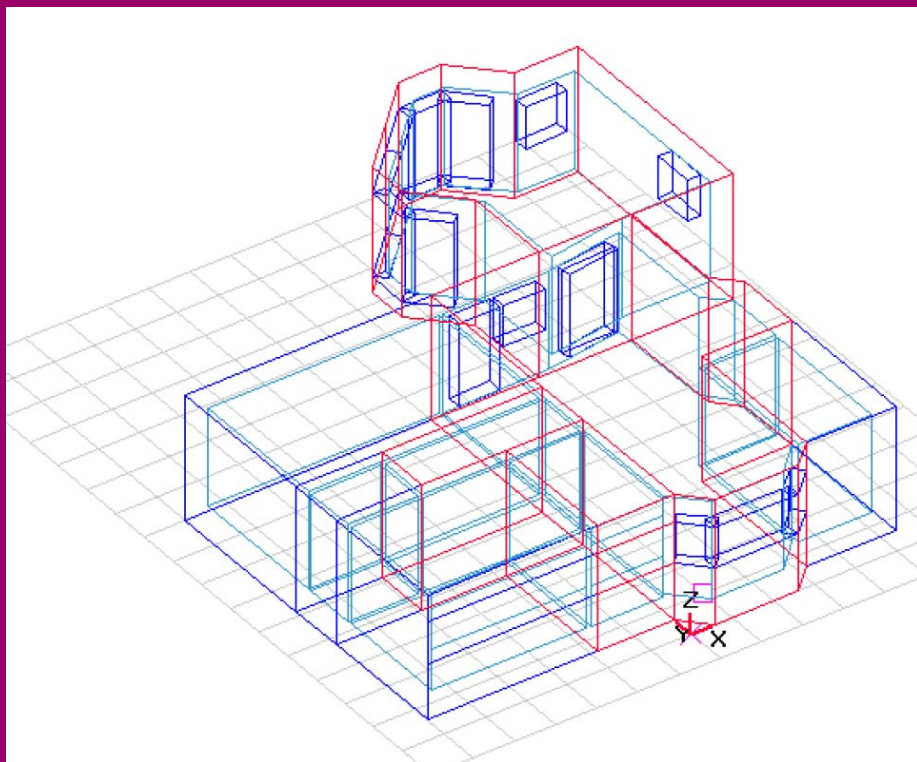


Carsten Rode

BSim simulering af hygrotermiske forhold i tre huse



Rapport
DTU Byg
Byg SR-08-02
2008
ISSN 1601-8605

BSim simulering af hygrotermiske forhold i tre huse

Carsten Rode
DTU Byg
September 2008

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
2	Simulering af feltforsøg.....	5
2.1	Det fuldmurede hus	5
	Konstruktioner	5
	Termiske forhold	6
	Simuleringer	6
2.2	Træhuset	10
	Konstruktioner	10
	Termiske forhold	10
	Fugttilskud	10
	Simuleringer	10
2.3	Det murede hus	14
	Konstruktioner	14
	Termiske forhold	14
	Fugttilskud	14
	Simuleringer	15
3	Helårssimuleringer.....	19
3.1	Helårssimuleringer af det fuldmurede hus, træhuset og det murede hus.....	19
	Temperaturforløb.....	19
	Relativ fugtigheds-forløb.....	21
	Dampkoncentrationsforløb	24
3.2	Helårssimuleringer med konstruktioner af fuldmur, træ og kombinationsmur	26
	Temperaturforløb.....	27
	Relativ fugtigheds-forløb.....	29
	Dampkoncentrationsforløb	31
3.3	Helårssimuleringer uden overfladebehandling	33
	Relativ fugtigheds-forløb.....	33
	Dampkoncentrationsforløb	36
4	Afrunding	39

Nærværende arbejde er udført som led i projektet *Teglvægges fugtoptag og –afgivelse i forbindelse med pludselige ændringer af den indvendige fugtbelastning*, der er en videreførelse af projektet *Muret byggeri og indeklima*. DTU Byg har udført arbejdet under en samarbejdsaftale med Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet (SBI). Projektets opdragsgiver har været Kalk- og Teglværksforeningen af 1893.

Nærværende rapport er udarbejdet i tilknytning til SBI's rapportering af projektet: "Muret byggeri og indeklima - Teglægges fugtoptag og afgivelse ved pludselige ændringer af den indvendige fugtbelastning". SBI's rapport vil i nærværende rapport blive benævnt "hovedrapporten".

1 Indledning

Programmet BSim¹ er benyttet til simulering af de varme- og fugttekniske forhold i de tre huse:

- Et fuldmuret hus med indfarvet kalkpuds. Huset vil i kort form blot blive benævnt "Fuldmuret hus". Huset er på 137 m² og er beliggende i Rødvig
- Et træhus med akrylmaledede gipsplader (sommerhus). Huset vil i kort form blive benævnt "Træhus". Huset er på 105,6 m² og er beliggende i Hørsholm
- Et muret hus med akrylmalet letbeton. Huset vil i kort form blive benævnt "Muret hus". Huset er på 142 m², og er beliggende i Hørsholm

BSim programmet beregner de termiske forhold på timebasis under hensyntagen til de ude- og indeklimatiske påvirkninger. Temperaturer og varmebalancer bestemmes for termiske zoner i bygningerne, idet de termiske zoner kan bestå af et eller flere fysiske rum. Tilsvarende bestemmes temperaturer og varmestrømme gennem hver bygningsdel i husene. De udeklimatiske påvirkninger af betydning for de termiske beregninger er især temperaturer, solindfald og vindpåvirkning. Indendørs betragtes varmetilskud fra aktiviteter i husene, varmeanlæg med et setpunkt for opvarmning, soltilskud fra vinduer og glaspartier i klimaskærmen samt ventilation. I beregningerne tages der hensyn til, hvordan varme udveksles mellem rum og konstruktioner, så fx bygningsdelenes termiske masse betragtes.

BSim udfører tilsvarende beregninger af de fugtmæssige balancer for rum og bygningsdele. Fugtigheden i de indendørs rum afhænger af luftskiftet, den udendørs fugtighed og indendørs fugttilskud pga. aktiviteter i husene. Der beregnes fugttilstand i bygningsdelene samt fugtudveksling mellem disse og de indendørs rum, samt mellem konstruktionerne og udeklimaet.

Redegørelsen for bygningernes forhold fremgår af:

- En summarisk redegørelse for husenes arealer og materialemæssige forhold
- En skitsetegning af de rum, hvori der for hvert hus en dag i foråret 2006 er udført målinger

Dette materiale fremgår som bilag 1 til hovedrapporten.

I forhold til redegørelsen for bygningernes udformning bemærkes følgende af relevans for beregningerne:

- Bygningernes orientering på grunden er skønnet ud fra kort trukket fra den Offentlige Informationsserver, www.ois.dk. Der er desuden aflagt et besøg ved husene i Hørsholm.
- Til beregningerne er væggene i det murede hus tolket som værende opbygget af letbeton, mineraluld og tegl.

Under besøgene har det til dels været muligt at få et indblik i bygningernes orientering og evt. skyggegivende forhold, som fx tagudhæng.

Forsøgene og bygningsbeskrivelsen har i visse tilfælde kun omfattet visse af bygningens rum, hvorfor der til simuleringerne er gjort fornødne simple antagelser om resten af husenes rum og udformning.

¹ Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Building Simulation. www.bsim.dk. 2008. Der er benyttet BSim Version 6, 7, 6, 26, dateret 30-07-2007.

Der er gennemført fire sæt simuleringer:

1. Simuleringer, der så vidt muligt søger at gengive forholdene, de enkeltdage i foråret 2006, hvor der har været målinger af fugttilstand og luftskifte medens og efter, der i intense forløb blev fordampet vand i husene. Til disse simuleringer er benyttet vejrdato fra en målestation på DTU for de aktuelle måleperioder.
2. Helårssimuleringer med referenceårsdata med udgangspunkt i en formodet belastning fra brugen af husene.
3. Helårssimuleringer af geometrien og beliggenheden af huset i Rødvig, idet der som konstruktioner på skift regnes med de fuldmurede konstruktioner; trækonstruktioner; eller murede kombinationsvægge, der forefindes i de studerede huse.
4. Helårssimuleringer af geometrien og beliggenheden af det fuldmurede hus, hvor der som vægge på skift er anvendt fuldmurs-, træ- og kombinationskonstruktioner uden overfladebehandling (de fuldmurede vægge dog stadig med kalkpuds).

2 Simulering af feltforsøg

Dette sæt simuleringer søger at efterligne målingerne foretaget i de enkelte bygninger på følgende enkeltdage:

- Fuldmuret hus. I denne bygning er der den 16. marts 2006 i tidsrummet 13:15 til 13:30 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1368 gram vand.
- Træhus. I denne bygning er der den 8. marts 2006 i tidsrummet 15:40 til 15:55 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1023 gram vand.
- Muret hus. I denne bygning er der den 22. maj 2006 i tidsrummet 16:14 til 16:29 tilført vanddamp til indeluften ved afdampning af 1602 gram vand.

Udeklimaet er ikke løbende blevet målt på de respektive lokaliteter efter de første par dage. Det har derfor været forsøgt at få vejrdata fra DMI, men dette blev fravalgt, da DMI nok kunne levere data fra nogenlunde nærliggende målestationer, men ingen af disse indeholdt solstrålingsdata. Solstråling og skyggeforhold betragtes som vigtige parametre for simuleringerne, idet disse forhold i høj grad betinger de termiske forhold i bygningernes rum.

Da der viste sig mulighed for at få vejrdata med solstråling fra en målestation på DTU i Kgs. Lyngby ca. 10 km syd for hørsholmhusene, blev det valgt at benytte disse. Målingerne fra DTU indeholder til gengæld ikke registreringer af de udendørs fugtforhold. Det er valgt at sætte den til en hver tid værende dugpunktstemperatur lig med den koldeste temperatur den foregående nat – dette vil i almindelighed give en god tilnærmelse til de udendørs fugtforhold.

I de tre perioder, der har fundet målinger sted i husene, har der af SBI været målt udendørs temperatur og relative fugtighed – typisk i forløb af få dages varighed. For disse perioder, er de af SBI målte data blevet omsat til timemiddelværdier og anvendt i stedet for DTU-oplysningerne.

2.1 Det fuldmurede hus

Figur 1 viser BSim modellen af huset i Rødvig, og Tabel 2 viser en summarisk dokumentation af modellen. Forsøgene, og derfor også modellen, omfattede kun et køkken/alrum i boligen.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 15 mm kalkpuds, 108 mm hultegl med densitet 1200 kg/m^3 , 125 mineraluld, og 108 mm (beregningsmæssigt dog kun 93 mm) massiv tegl med densitet på 1850 kg/m^3 .

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har "super-lavenergiruder" med center U-værdi på $1,1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, og vinduerne er udført med 50 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er regnet som 25 mm fliser af marmor udlagt på 100 mm beton, hvorunder der er 150 mm EPS isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Gulvet er regnet uden overfladebehandling.

Det vandrette loft består af $2 \times 12,5 \text{ mm}$ gips, derover en dampspærre med Z-værdi på 250 $\text{GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ og 250 mm mineraluldisolering. Den udvendige tagbeklædning er ikke beskrevet. Loftet er på undersiden regnet malerbehandlet (Z-værdi $2,5 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$).

Termiske forhold

Rummet regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på 22,0°C, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden (22,2°C). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på 0,42 h⁻¹, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Rummet påregnes at have et normalt dagligt fugttilskud på 2 kg fordelt jævnt før Tabel 1.

Tabel 1 Fugttilskud for køkken/alrummet i det fuldmurede hus

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Fuldmuret hus	205 g/h	103 g/h	51 g/h	2000 g/døgn

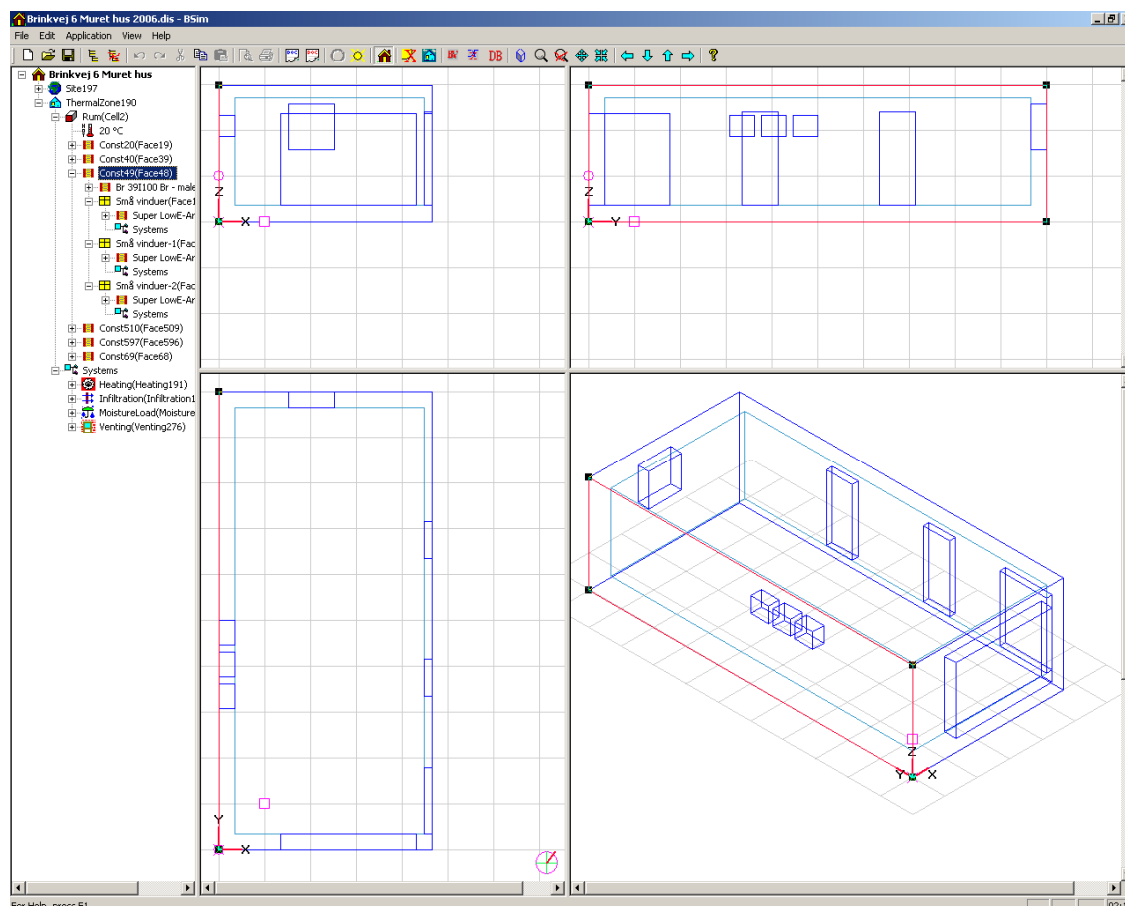
Den 16. marts kl. 13 -14 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1368 gram vanddamp som i eksperimentet. BSim kan ikke regne med fugtpåvirkninger af kortere varighed end 1 time, hvorfor lasten bliver mindre intens end i forsøget, hvor samme fugtmængde blev frigivet på 15 min.

BSim regner på de termiske forhold i bygningen. BSim kan desuden regne på fugtbalancen, idet programmet tager hensyn til fugtudveksling mellem bygningens konstruktioner og den indendørs luft, når det i øvrigt opregner balancen mellem den tilførte vanddamp og opblandingen med ventilationsluften udefra.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringsparametre: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time)², og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.

² I nogle af simuleringerne af dette og de andre huse, der vises i denne rapport, er det ikke altid lykkedes at få BSim til at regne med 60 tidsstep pr. time uden at programmet af numeriske årsager har ramt en singularitet, så beregningen har fejlet. I disse tilfælde er beregningerne gentaget ved successiv forøgelse af tidssteppene ved brug af 50, 40 eller 30 tidsstep pr. time indtil beregningen lykkes. Det vil ikke blive yderligere dokumenteret, i hvilke beregninger, sådanne hændelser er opstået, idet det ikke forventes at have influeret på de sluttelige resultater i nævneværdigt omfang.



Figur 1 BSim model af det fuldmurede hus i Rødvig. Modellen viser kun det rum, målingerne fandt sted i. Huset har tilstødende rum mod nordøst (se den lille røde nordpil på kompasset nederst til højre i plantegningen).

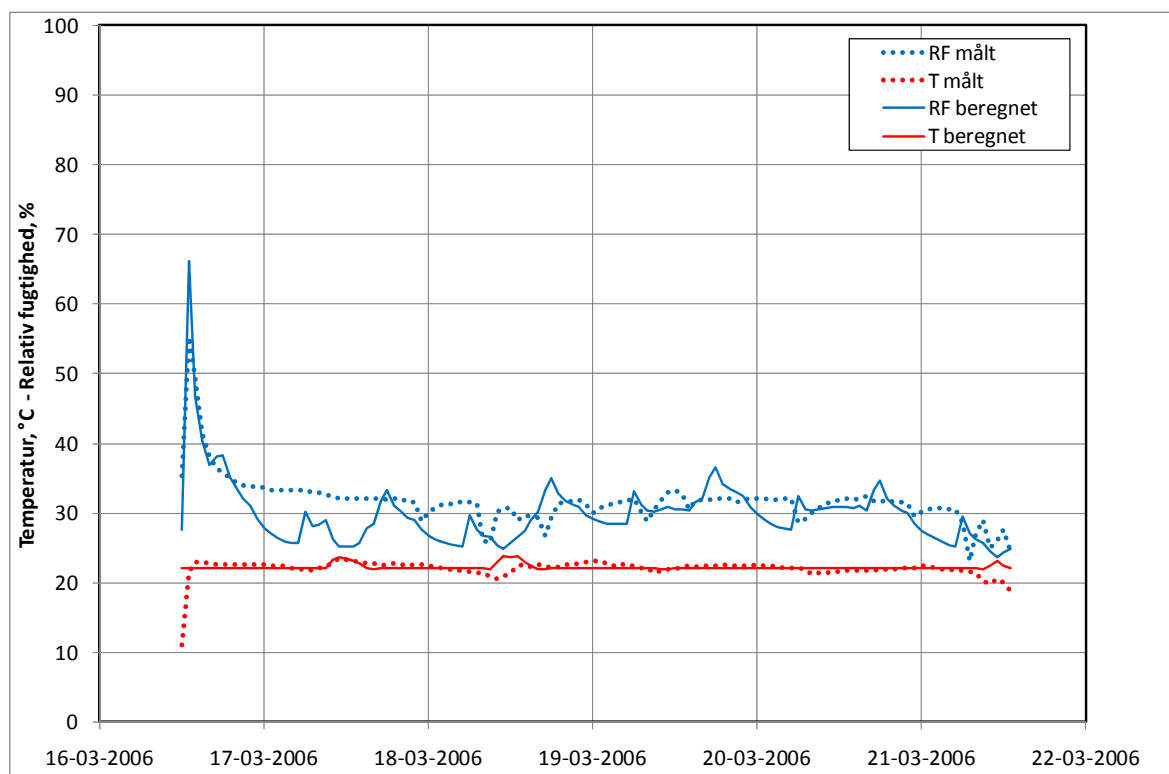
Figur 2 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 16. marts. I henhold til målingerne stiger den relative fugtighed med ca. 20 %-RF, medens stigningen i henhold til beregningerne er ca. 38 %-RF. Muligheden for at simulere det målte RF-forløb under den korte, intense påvirkning er altså ikke meget overbevisende.

Dette kan dog hænge sammen med, at selv små variationer i lufttemperaturen kan betyde ganske markante udsving i RF. Dette vil blive udlignet, hvis resultaterne vises som dampkoncentration, hvilket er gjort i Figur 3. I henhold til målingerne fås en tilvækst i vanddampkoncentration på ca. $7,0 \text{ g/m}^3$, når der afdampes vand under forsøget, medens denne tilvækst i henhold til beregningerne er på $7,5 \text{ g/m}^3$.

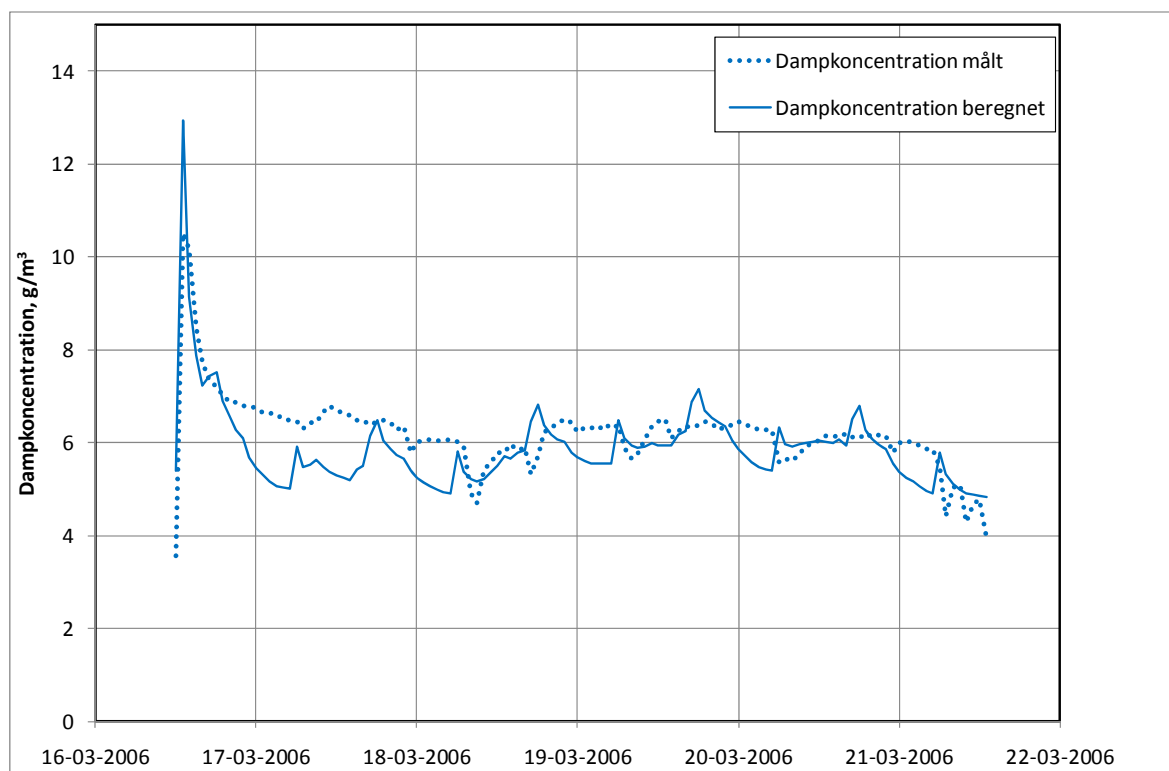
I de efterfølgende dage er der nogen variation mellem dampkoncentrationens udsving i løbet af døgnene, og dette må tillægges at beregningens antagelse om døgnvariationen af rummets belastning ikke helt passer med den faktiske anvendelse. Der er fx noget der tyder på, at man har foretaget en god udluftning af rummet sidst på formiddagen den 18. marts, som beregningen ikke helt har kunnet eftergøre.

Tabel 2 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for det fuldmurede hus i Rødvig.

Fuldmuret hus 2006					
Building	Design Heat Loss, W	Rotation, deg		Volume, m ³	
Fuldmuret hus		325		90.2993	139.123
Site	Weather File	Ground		Terrain Type	
Site197	2006data.dry	Ground200		Urban	
Thermal Zone	Design Heat Loss, W	Floor Area, m ²		Volume, m ³	
ThermalZone190		38.5895	46.5293	90.2993	139.123
Rum		38.5895	46.5293	90.2993	139.123
Enclosing Elements	Building Element	Thick, m - U, W/m ² K		Net Area, m ²	
Constructions	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.192206	38.5895	
	Br 39I100 Br - kalkpudset	0.341	0.257796	49.1819	
	Gy 39I250 vent - malet	0.275	0.149807	38.5895	
Windoors	Interior door, glazed		4.83516	2.88	
	Interior door, wood		1.50734	3.248	
	Door with glazing		1.9996	5.94	
	Super LowE-Ar in wood frame		1.354	1	
	Super LowE-Ar in wood frame		1.55894	0.7452	
Systems	Component	Control		Time	
Heating	Heating191	HeatCoolCtrl192		Always	
Infiltration	Infiltration193	FullLoad		Always	
MoistureLoad	MoistureLoad194	KI14 Døgnprofil		ThWeek11 Always	



Figur 2 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det fuldmurede hus.



Figur 3 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til det fuldmurede hus.

2.2 Træhuset

Figur 4 viser BSim modellen af træhuset i Hørsholm, og Tabel 4 viser en summarisk dokumentation af modellen.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 13 mm gipsplade, dampspærre med Z-værdi på $250 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$, 200 mm mineraluld og udvendig bræddebeklædning ligeledes af 25 mm gran. Væggenes indvendige overflade regnes behandlet med en maling med Z-værdi på $2,5 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$.

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har energiruder med center U-værdi på $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, og vinduerne er udført med 100 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er regnet som et lakeret parketgulv af 25 mm bøgetræ, hvorunder kommer 75 mm mineraluld, 100 mm klaplag af beton, 100 mm polystyren isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Gulvets lakering regnes af have en Z-værdi på $10 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$.

Den skrå loftkonstruktion består af et listeloft af 25 mm granbrædder, fulgt af dampspærre med Z-værdi på $250 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$, og 250 mm mineraluldisolering. Loftet er ubehandlet på indersiden.

Termiske forhold

Bygningen regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden ($20,3^\circ\text{C}$). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på $0,25 \text{ h}^{-1}$, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Huset påregnes at have et normalt dagligt fugttilskud på 3 kg fordelt jævnt før Tabel 3.

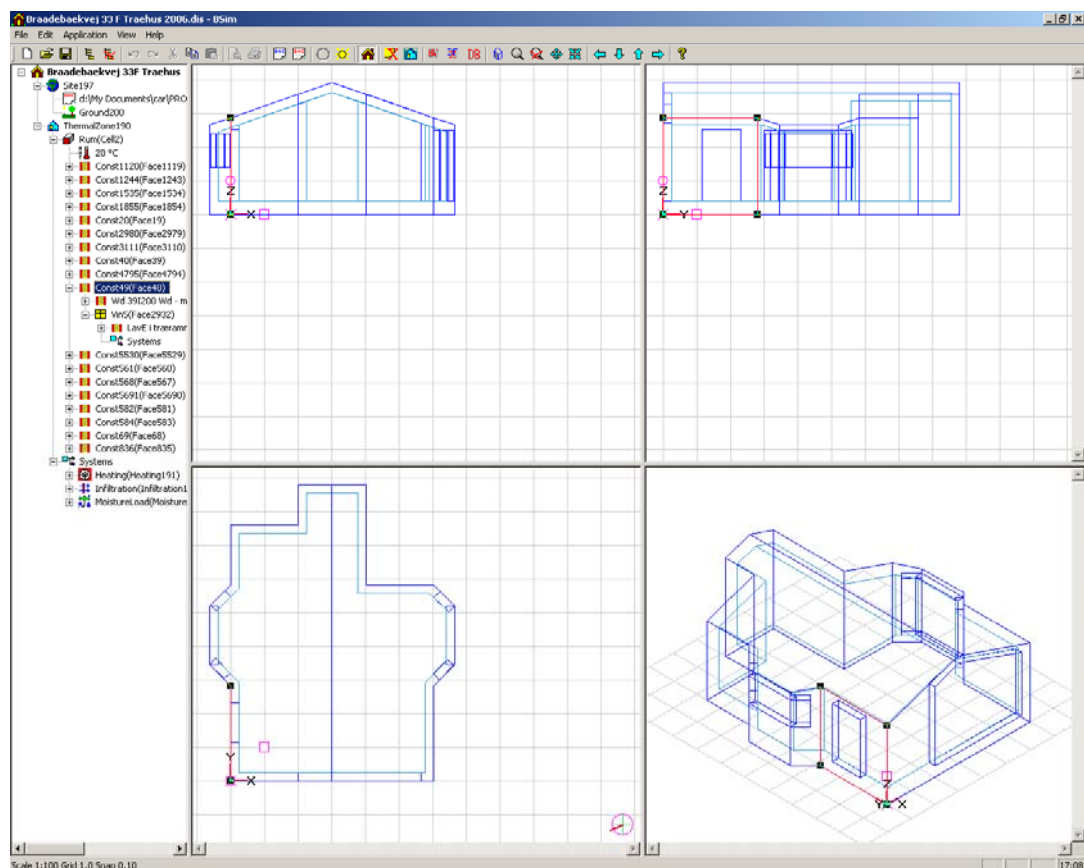
Tabel 3 Fugttilskud for træhuset

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Træhus	308 g/h	154 g/h	77 g/h	3000 g/døgn

Den 8. marts kl. 15-16 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1023 gram vanddamp som i eksperimentet.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringssparametre: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time), og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.



Figur 4 BSim model af træhuset i Hørsholm.

Figur 5 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 8. marts. I henhold til målingerne stiger den relative fugtighed med mindre end 10 %-RF, medens stigningen i henhold til beregningerne er ca. 21 %-RF. Forøgelsen af relativ fugtighed i luften har således været målt til at være meget mindre end simuleringen forudsiger.

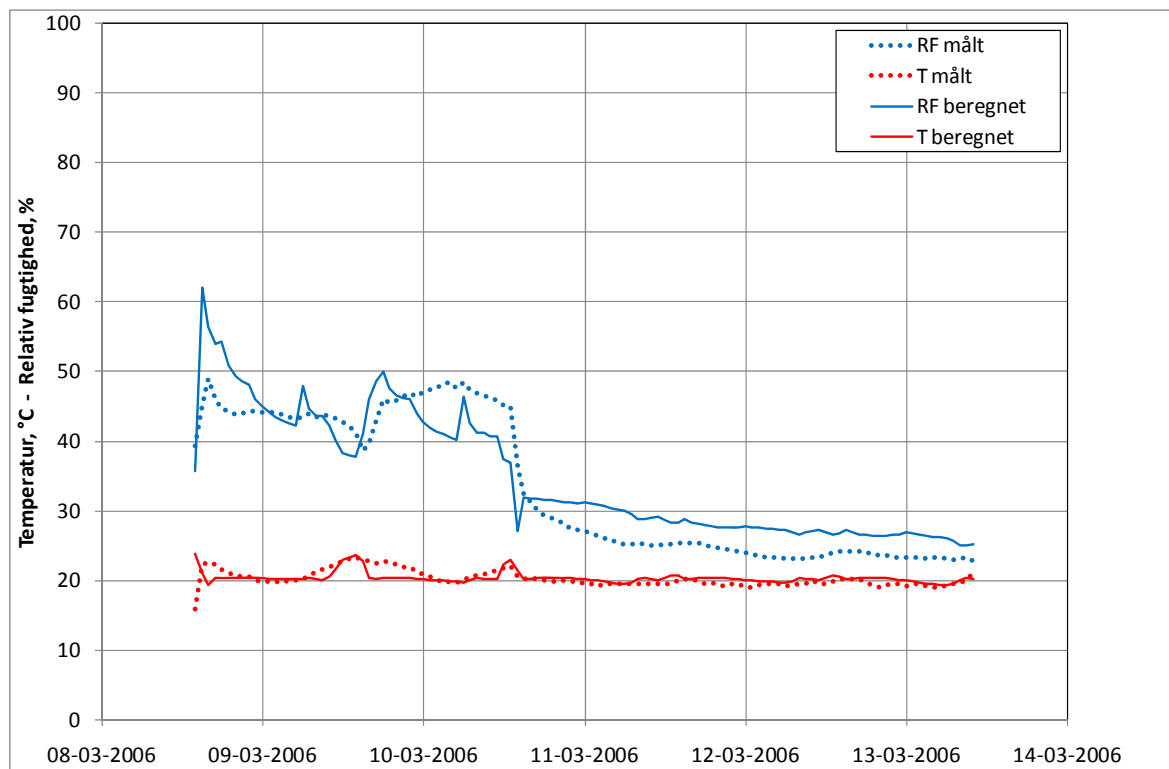
Omvendt ser det ud til, at det målte henfald i relativ fugtighed efter fugttilførslen har været meget lille i de første 1½ døgn, hvorefter henfaldet pludseligt kommer. Det formodes, at der lidt over middag den 10. marts er sket en kraftig udluftning af huset, og at der ikke de efterfølgende tre dage har været noget nævneværdigt fugttilskud i boligen. I beregningerne er dette simuleret som en udluftning på 5 h^{-1} den 10. marts kl. 14-15, hvorefter der ikke regnes med fugttilskud i boligen frem til og med den 13. marts.

Figur 6 viser de målte og simulerede forløb af indendørs vanddampkoncentration. Dampkoncentrationsforøgelsen i forbindelse med forsøget var på $3,5 \text{ g/m}^3$, hvilket stemmer godt overens med beregningernes $3,7 \text{ g/m}^3$.

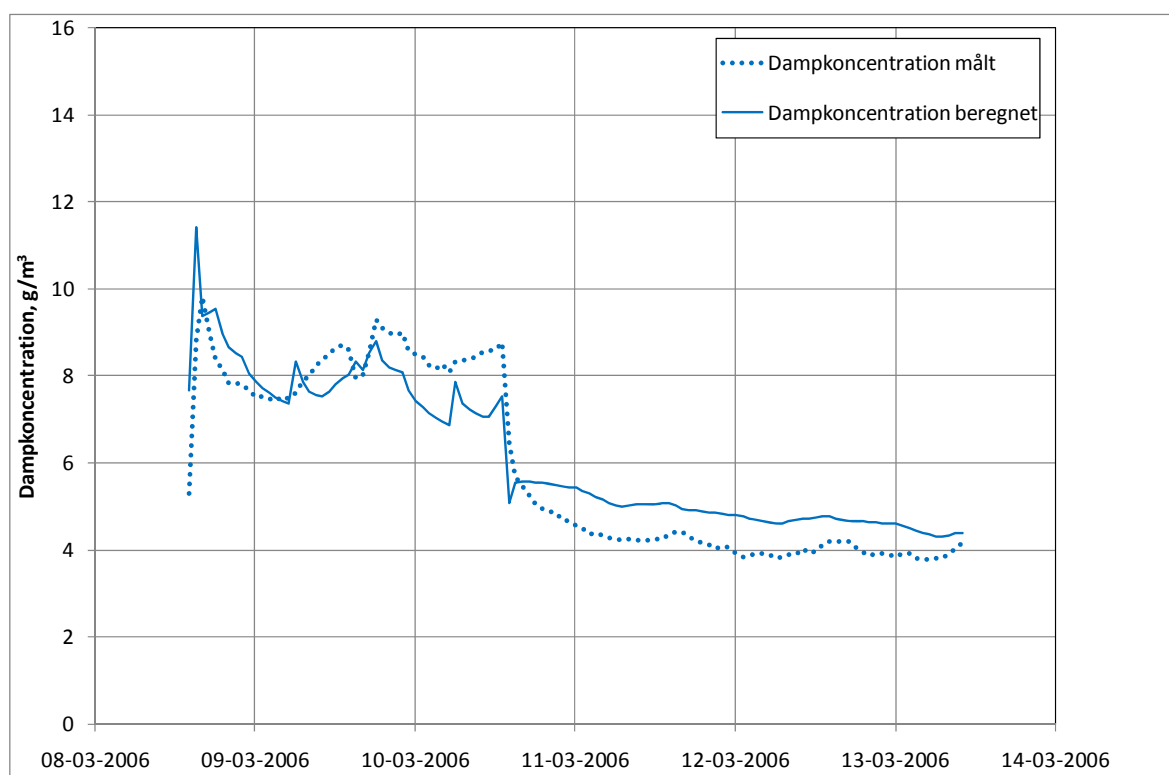
Alt i alt må det betragtes at mulighederne for at simulere de målte forløb af temperaturer og fugtforhold i træhuset er rimelige, givet det manglende kendskab til de virkelige forhold i huset.

Tabel 4 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for træhuset i Hørsholm.

Traehus 2006					
Building	Design Heat Loss, W	Rotation, deg	Volume, m ³		
Traehus	2766.61	116	110.627	160.849	
Site	Weather File	Ground	Terrain Type		
Site197	2006data.dry	Ground200	Urban		
Thermal Zone	Design Heat Loss, W	Floor Area, m ²		Volume, m ³	
ThermalZone190	2766.61	40.0399	47.462	110.627	160.849
Rum	2766.61	40.0399	47.462	110.627	160.849
Enclosing Elements	Building Element	Thick, m - U, W/m ² K		Net Area, m ²	
Constructions	Gy 39I200 Wd	0.25	0.179484	51.0395	
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796	42.4011	
	Wd I75 C100 I50	0.375	0.178658	40.0399	
Windows	LavE i træramme	1.95714		22.0305	
Systems	Component	Control		Time	
Heating	Heating191	HeatCoolCtrl192		Always	
Infiltration	Infiltration193	FullLoad		Always	
MoistureLoad	MoistureLoad194	FullLoadAt16 No load No load No load Dagprofil		WeWeek10 10-03-08 RestOfWeek10 Week11 Always	
Venting	Venting657	VentingCtrl659		10-03-06 kl 14	



Figur 5 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til træhuset.



Figur 6 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til træhuset.

2.3 Det murede hus

Figur 7 viser BSim modellen af det murede hus i Hørsholm, og Tabel 6 viser en summarisk dokumentation af modellen. Den "termiske zone", som simuleringen udføres for består af husets køkken/alrum sammen med havestuen. Det er disse to rum, der er samlet oplysninger om ved udførelse af eksperimenterne i huset, og det er derfor disse oplysninger, der bruges i simuleringerne. De tilgrænsende rum i huset er der kun gisninger om, og oplysningerne om disse rum påvirker ikke direkte beregningerne. Gisningerne passer dog udmærket med de oplysninger, der kan fås fra den Offentlige Informationsserver.

Konstruktioner

Indefra regnet er vægkonstruktionerne modelleret som 100 mm letbetonelementer, med densitet 500 kg/m^3 , 125 mm mineraluldsisolering, og formur af 108 mm murværk. Væggenes indvendige overflade regnes behandlet med en maling med Z-værdi på $2,5 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Der er indsat vinduer og døre som vist på Figur 1. Udvendige vinduer har energiruder med center U-værdi på $2,0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, og vinduerne er udført med 100 mm ramme/karm af træ.

Gulvet er i havestuen regnet som et olieret trægulv af 25 mm bøgetræ, 100 mm klaplag af beton, 150 mm polystyren isolering og 100 mm kapillarbrydende stenlag. Trægulvets oliebehandling regnes at have en Z-værdi på $0,5 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Køkken/alrummets gulv består af 25 mm glaserede tegl, der ligeledes er lagt på 100 mm beton, 150 mm polystyren isolering og 10 mm kapillarbrydende stenlag. Glaserings Z-værdi er regnet til $10 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$.

Den vandrette loftkonstruktion består af et listeloft af 25 mm granbrædder, fulgt af dampspærre (Z-værdi $250 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$) og 250 mm mineraluldsisolering. Loftet er ubehandlet på indersiden.

Termiske forhold

Rummene regnes med et opvarmningssystem med et setpunkt på $22,20^\circ\text{C}$, hvilket sammen med de periodiske stigninger i lufttemperaturen på grund af andre varmetilskud gør, at den beregnede gennemsnitstemperatur svarer til den målte i måleperioden ($22,4^\circ\text{C}$). Der regnes med en konstant infiltration, der giver et luftskifte på $0,48 \text{ h}^{-1}$, sådan som det blev målt i huset, da forsøget fandt sted.

Fugttilskud

Rummene påregnes at have et normalt fugttilskud på $3,0 \text{ kg/døgn}$ fordelt jævnt før Tabel 5.

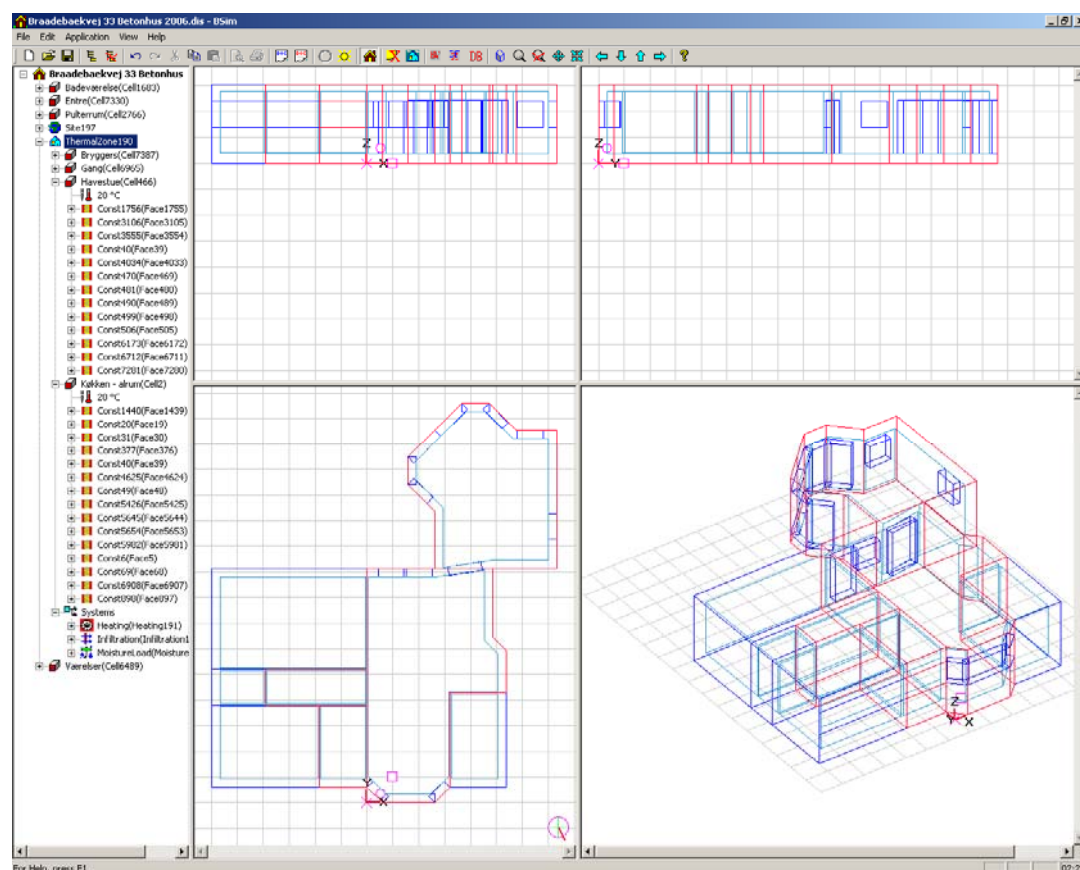
Tabel 5 Fugttilskud for køkken/alrum og havestue i det murede hus

Fugttilskud	kl. 6-7 kl. 17-19	kl. 15-17 kl. 19-23	Øvrige timer	Samlet fugttilskud
Træhus	308 g/h	154 g/h	77 g/h	3000 g/døgn

Den 22. maj kl. 16-17 regnes med en fugtbelastning af en times varighed, der frigiver 1602 gram vanddamp som i eksperimentet.

Simuleringer

Simuleringerne er kørt fra den 1. januar 2006. Der er benyttet følgende simuleringsskema: "Optimized Simulation", "Moisture Transport", "Glazing Temperature", "Longwave Radiation to Sky", og "Latent Heat". Der er regnet med interne tidsstep på 1 min (60 step pr. time), og en maksimal tykkelse af de kontrolvolumener, materialerne opdeles i, på 1 cm.



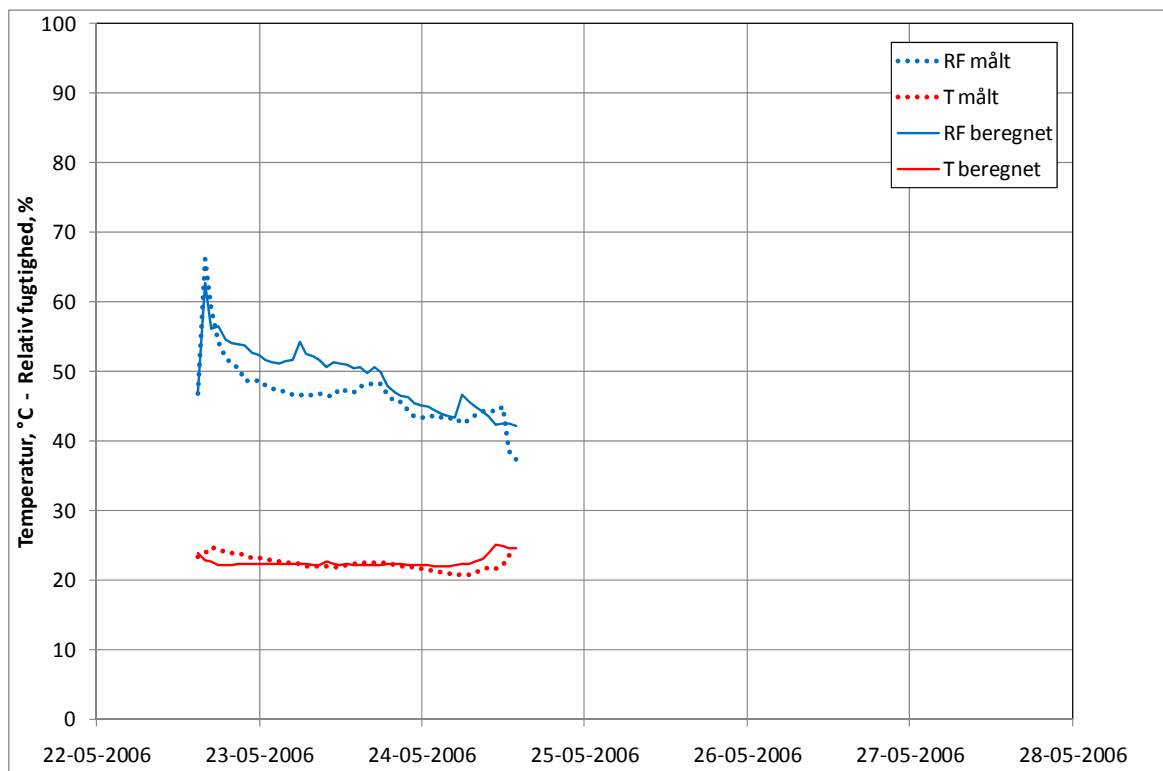
Figur 7 BSim model af det murede hus i Hørsholm. Modellen omfatter kun husets køkken/alrum, havestue, bryggers og gang.

Figur 8 viser sammenligningen mellem de målte og beregnede forløb af temperatur og relative fugtighed i dagene efter fugttilførslen den 22. maj 2006. Det bemærkes her, at måleperioden for det murede hus er 2 døgn modsat måleperioderne for det fuldmurede hus og træhuset, der er henholdsvis 5 døgn, og 4 døgn og 20 timer.

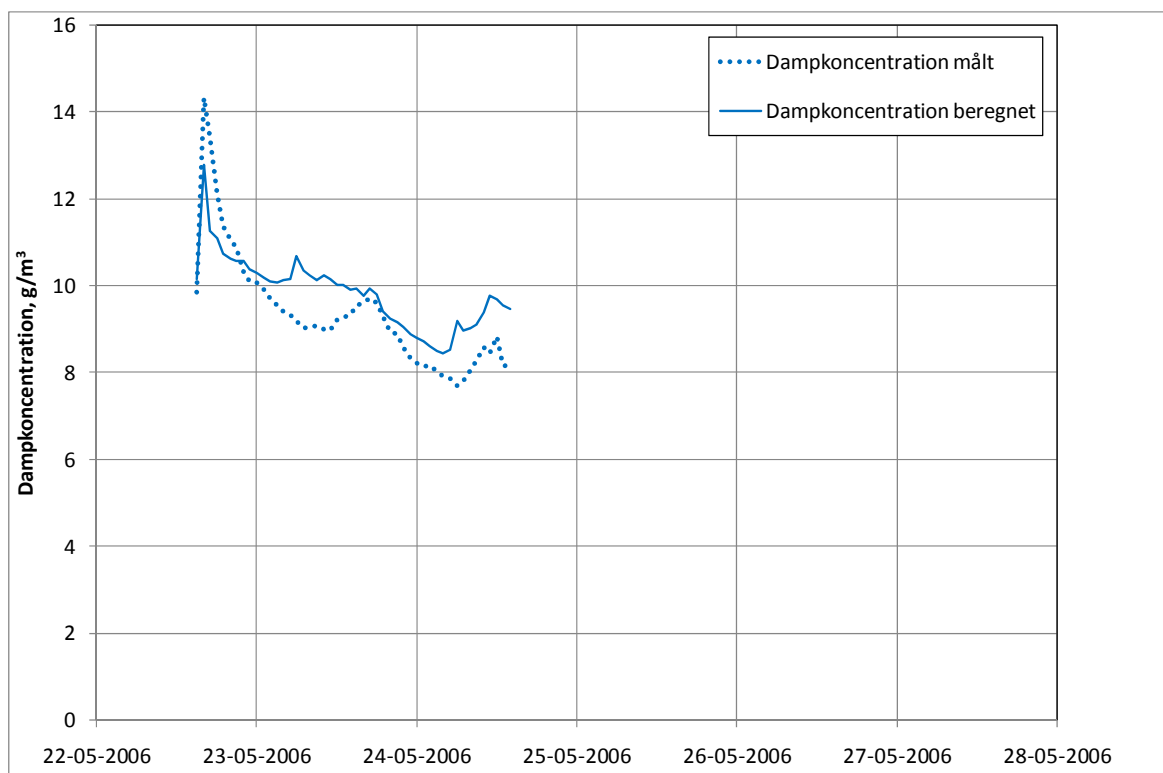
Den relative fugtighed stiger med ca. 19 %-RF i henhold til målingerne, men kun med 16 %-RF i henhold til beregningerne, når forsøget afvikles. Der er en vis overensstemmelse mellem de målte og beregnede forløb af fugtniveauets henfald efter fugttilskuddets ophør, når det påtænkes at de aktuelle aktiviteter i bygningen ikke har været kendte.

Figur 9 viser forløbet af den målte og beregnede indendørs vanddampkoncentration. De to forløb følger nogenlunde pænt hinanden. Den målte stigning i dampkoncentration ved afvikling af forsøget har været på $4,5 \text{ g/m}^3$, medens den simulerede dog kun har været på $2,6 \text{ g/m}^3$.

Beregningen af fugtudsvingene vurderes overordnet set at give god overensstemmelse med feltforsøgets målinger.



Figur 8 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs lufttemperatur og relativ fugtighed efter fugttilførsel til det murede hus.



Figur 9 Sammenligning mellem målte og beregnede forløb af indendørs vanddampkoncentration efter fugttilførsel til det murede hus.

Tabel 6 Summarisk dokumentation af BSim-modellen for det murede hus i Hørsholm.

Muret hus 2006					
Building		Design Heat Loss, W	Rotation, deg	Volume, m³	
Muret hus			206	248.131	383.302
Site		Weather File	Ground	Terrain Type	
Site197		2006data.dry	Ground200	Urban	
Thermal Zone	Design Heat Loss, W		Floor Area, m²		Volume, m³
ThermalZone190			65.4365	78.5304	157.048
Køkken - alrum			32.6854	37.552	78.445
Havestue			22.9662	29.7092	55.119
Bryggers			4.8545	5.8389	11.6508
Gang			4.93038	5.43035	11.8329
Enclosing Elements	Building Element	Thick, m - U, W/m² K		Net Area, m²	
Constructions	Pls 45I70 Pls				
	AEC100 39I125 Br100 - malet	0.096	0.513992		76.6353
	Wd 39I250 vent	0.341	0.254197		50.0522
	Klinkegulv i det murede hus - glaseret	0.275	0.14796		32.6854
	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.191184		32.6854
	Wd 39I250 vent	0.375	0.192206		22.9662
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796		22.9662
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796		4.8545
	Klinkegulv i det murede hus - glaseret	0.375	0.191184		4.8545
	Wd 39I250 vent	0.275	0.14796		4.93038
	Marmorgulv I75 C100 I50	0.375	0.192206		4.93038
	Windows	LavE i træramme		1.93238	
Interior door, glazed			4.78619		5.33
LavE i træramme			1.96191		12.6492
LavE i træramme			1.94		1
LavE i træramme			1.97022		3.04656
Systems	Component	Control		Time	
Heating	Heating191	HeatCoolCtrl192		Always	
Infiltration	Infiltration193	FullLoad		Always	
MoistureLoad	MoistureLoad194	kl17 Døgnprofil		MoWeek21 Always	

3 Helårssimuleringer

3.1 Helårssimuleringer af det fuldmurede hus, træhuset og det murede hus

Der er gennemført helårssimuleringer af alle tre huse ved benyttelse af normale danske referenceårs vejrdata (Design Reference Year, DRY).

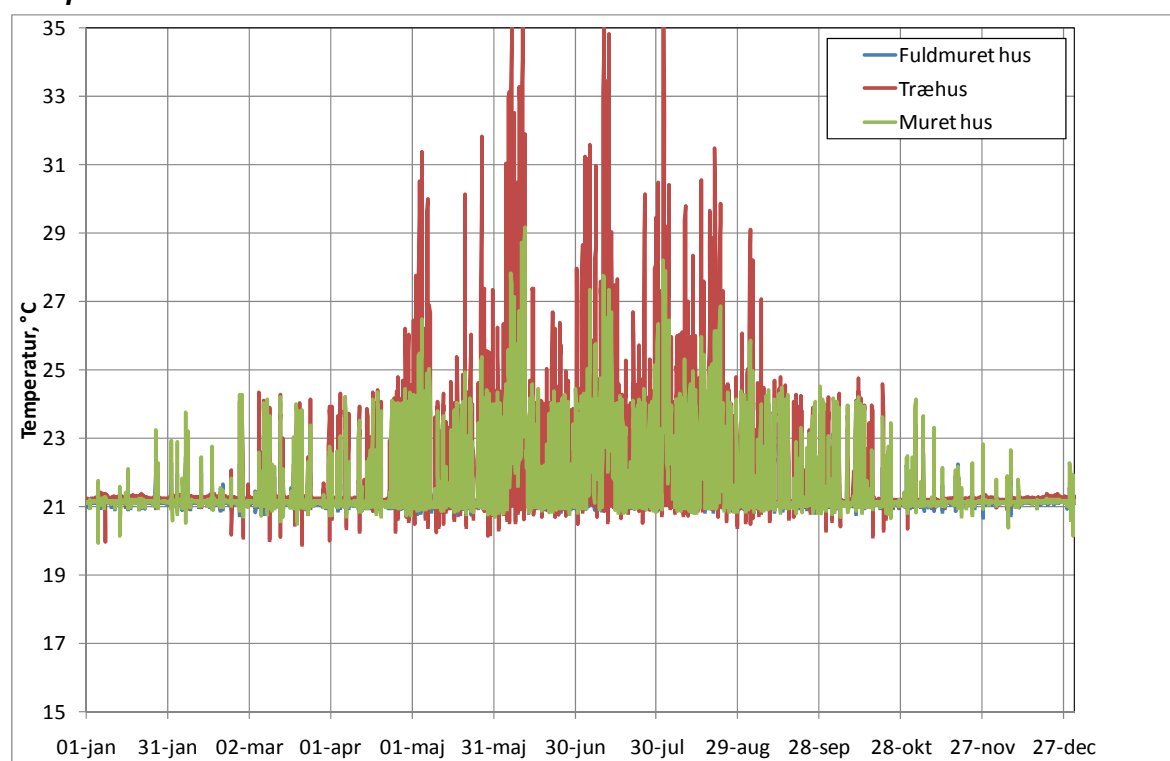
- Der er regnet med indendørs temperatursetpunkt på 21°C.
- Der er regnet med et fast luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der er regnet med udluftning på 3 h⁻¹, hvis den indendørs temperatur overstiger 24°C.

Der er regnet med fugttilskud på 2 kg/døgn for rummet i det fuldmurede hus og 3 kg/døgn for træhuset og det murede hus. Fugtlasten er fordelt over døgnet som i Tabel 7:

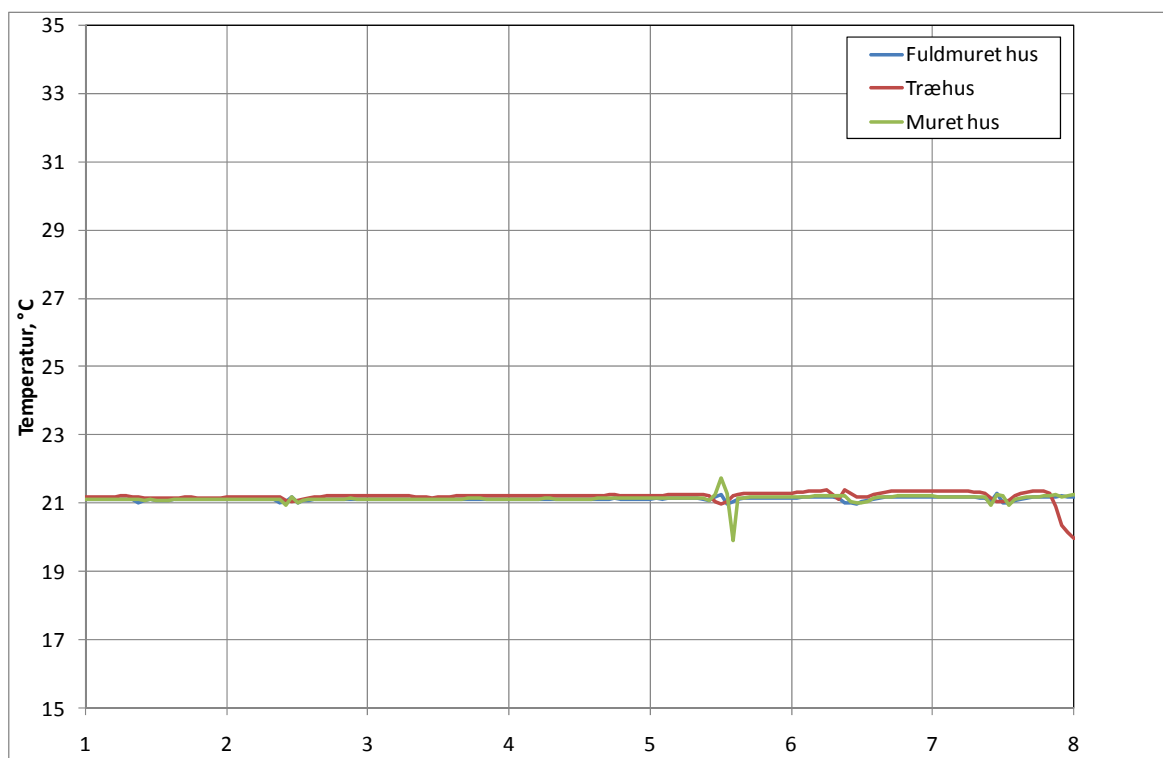
Tabel 7 Daglig fordeling af fugtlasten som anvendt i helårssimuleringer

Fugttilskud, g/h	kl. 6-7	kl. 15-17	Øvrige timer
	kl. 17-19	kl. 19-23	
Fuldmuret hus	205	103	51
Træhus	308	154	77
Muret hus	308	154	77

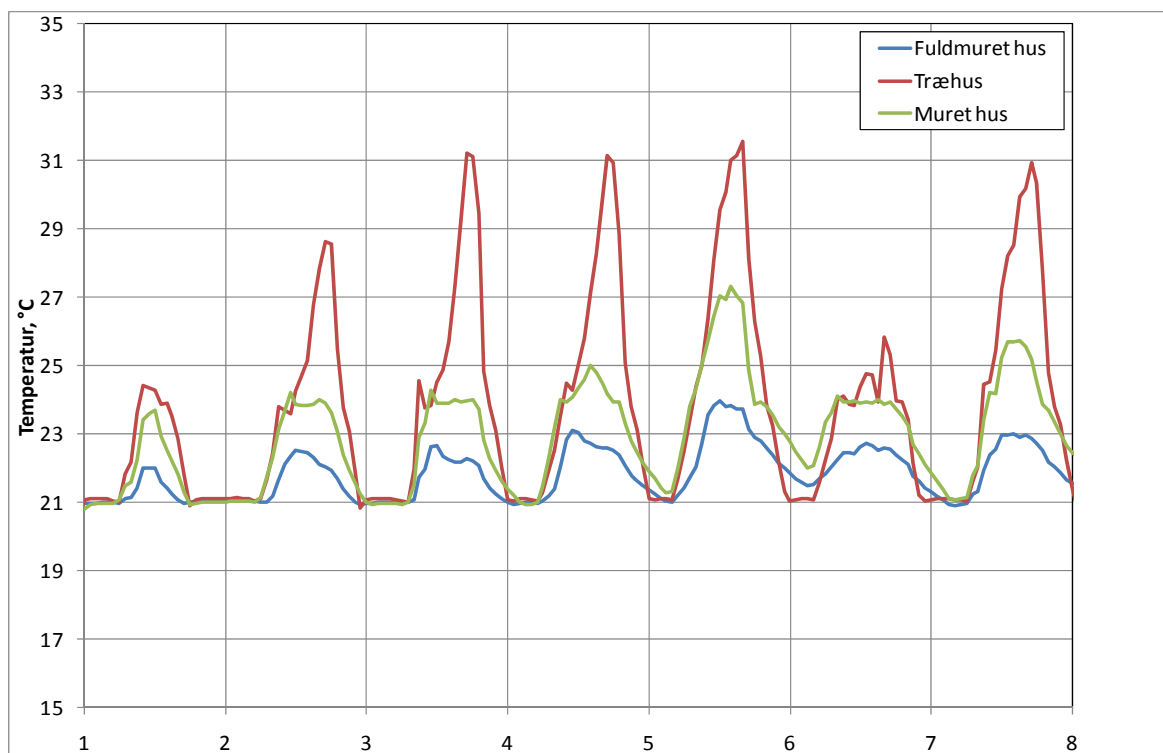
Temperaturforløb



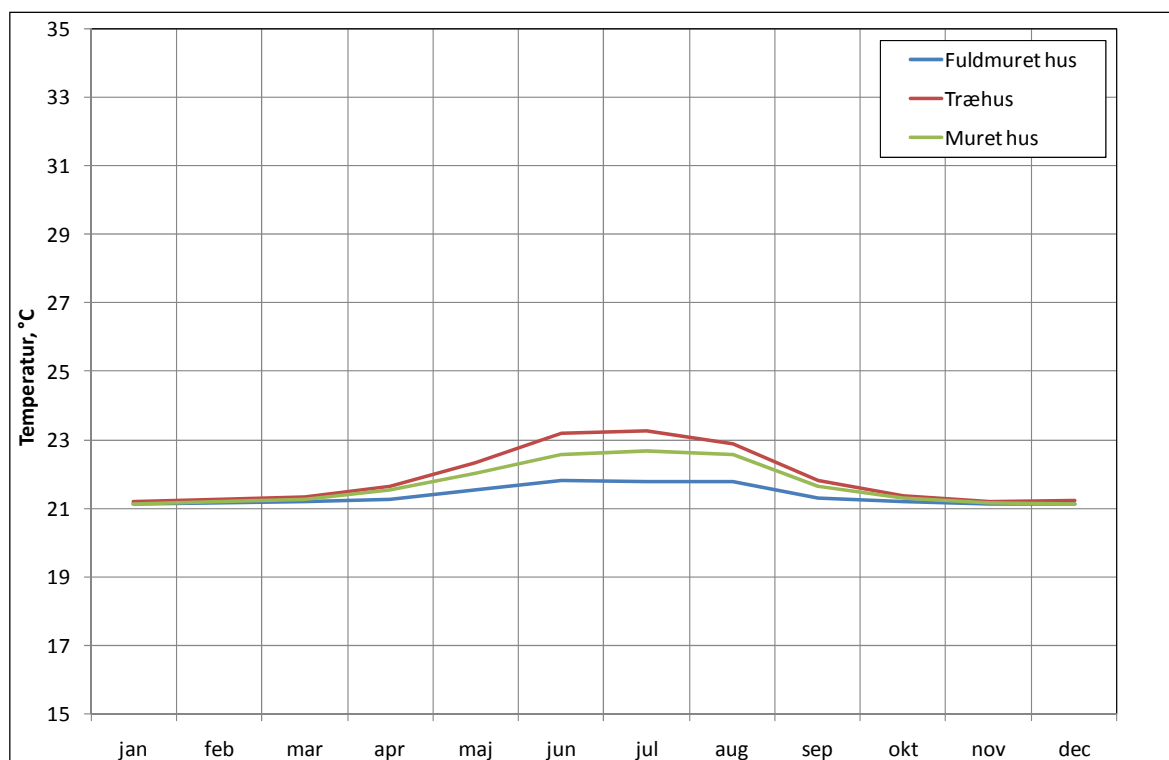
Figur 10 Timeværdier for den indendørs lufttemperatur gennem hele året.



Figur 11 Indendørs lufttemperatur i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



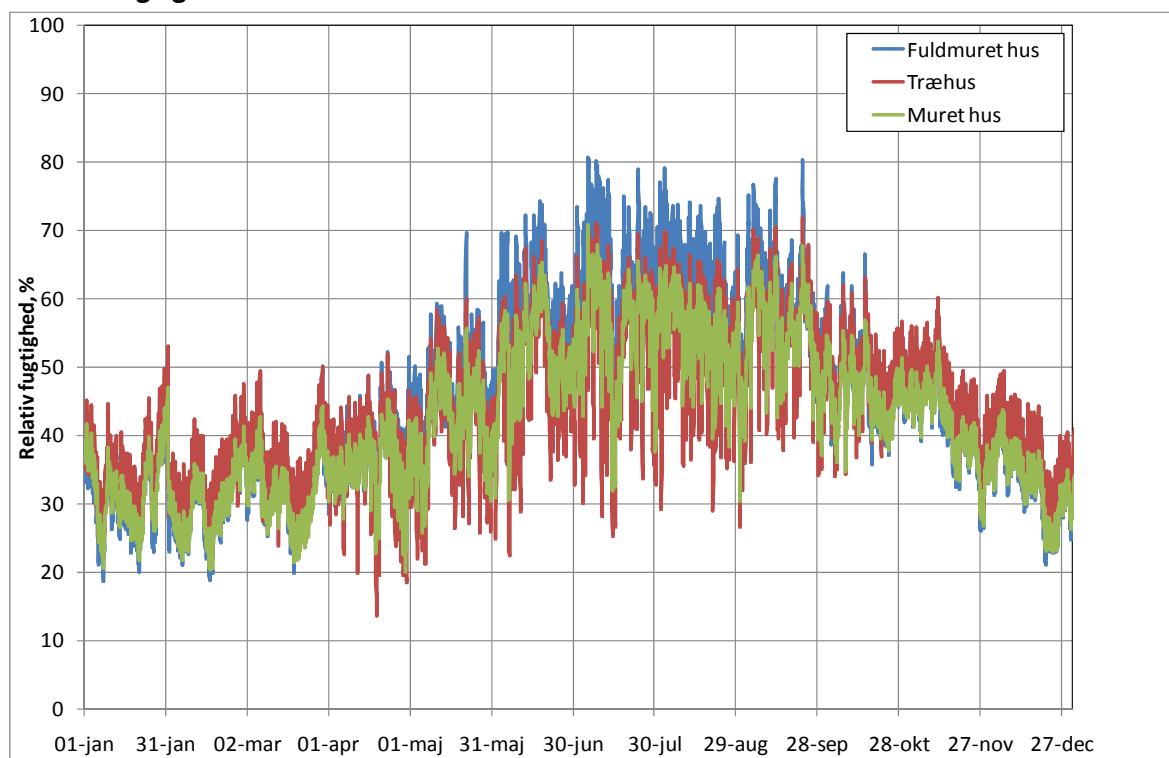
Figur 12 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



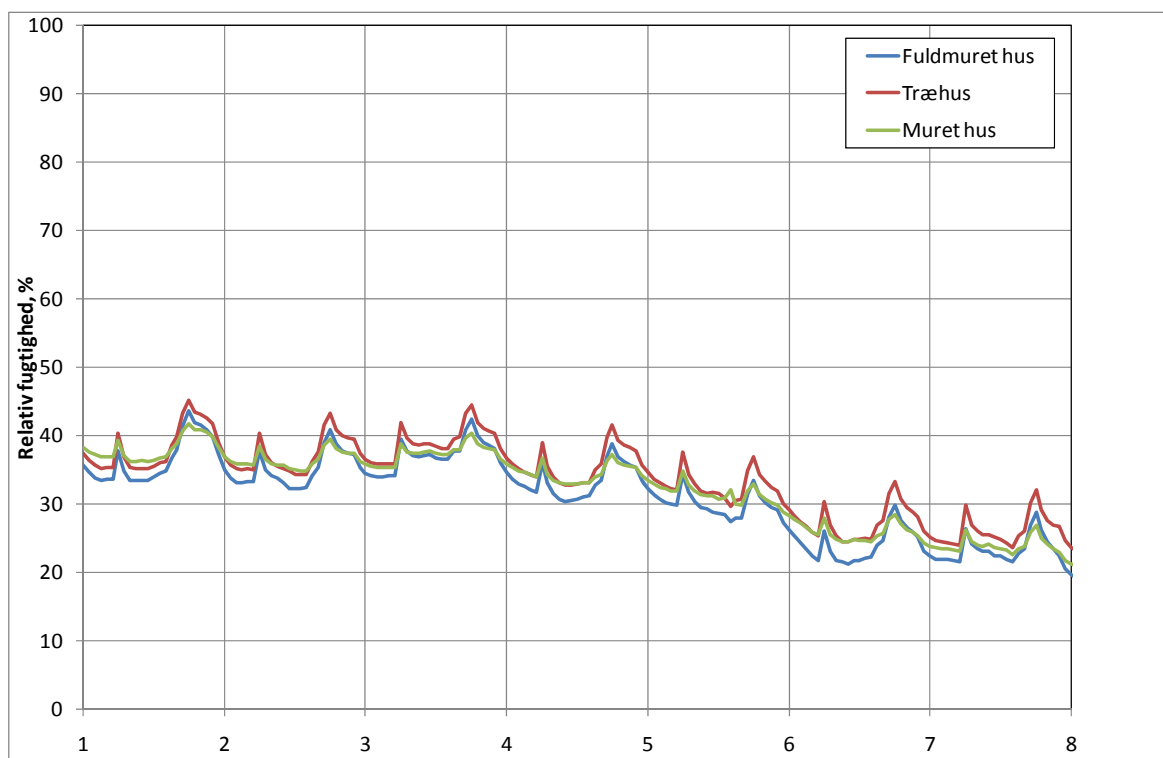
Figur 13 Månedsmidler af den indendørs lufttemperatur i løbet af året.

Der ses størst daglige og sæsonmæssige temperaturvariationer i træhuset, dernæst i det murede hus, og endelig er det fuldmurede hus det mest temperaturstabile.

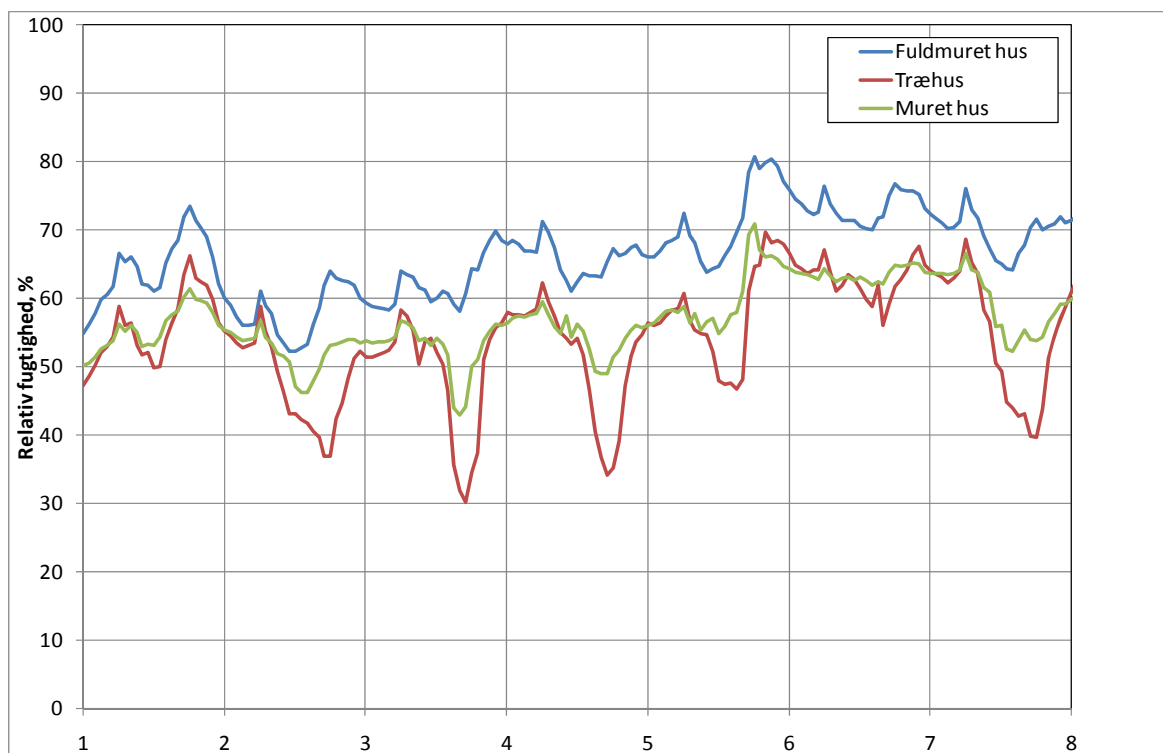
Relativ fugtigheds-forløb



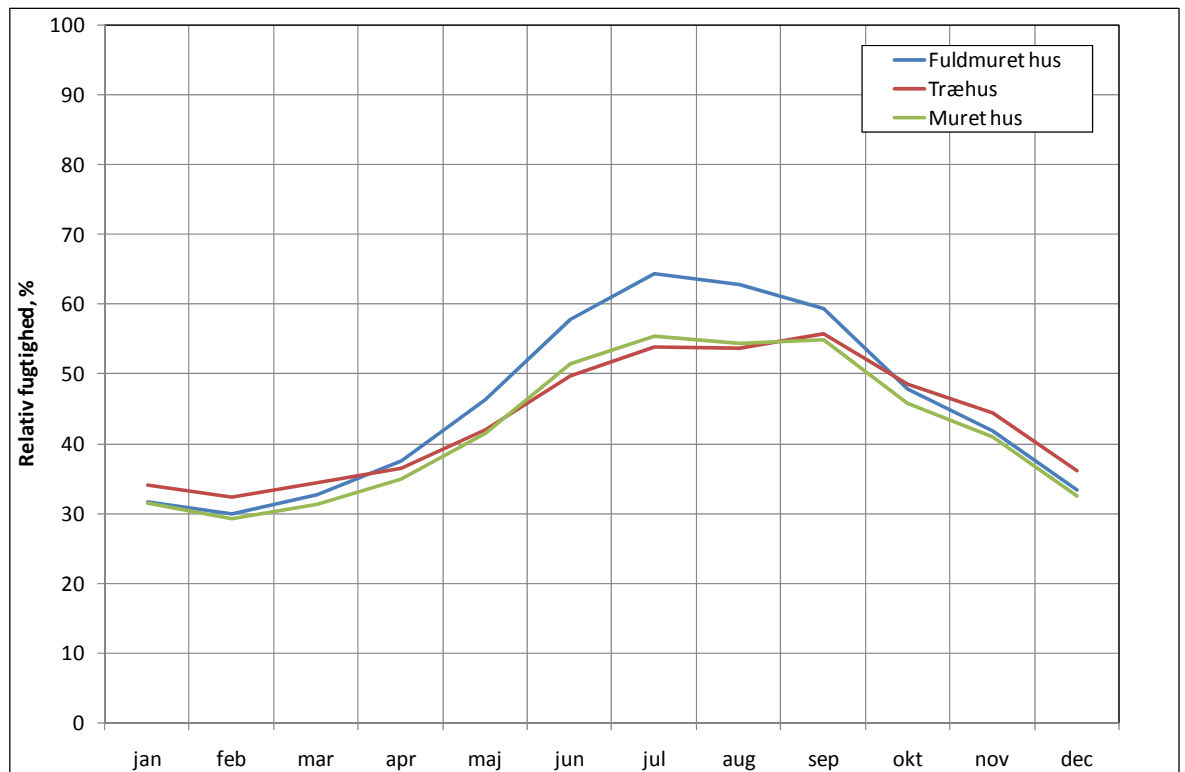
Figur 14 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 15 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 16 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.

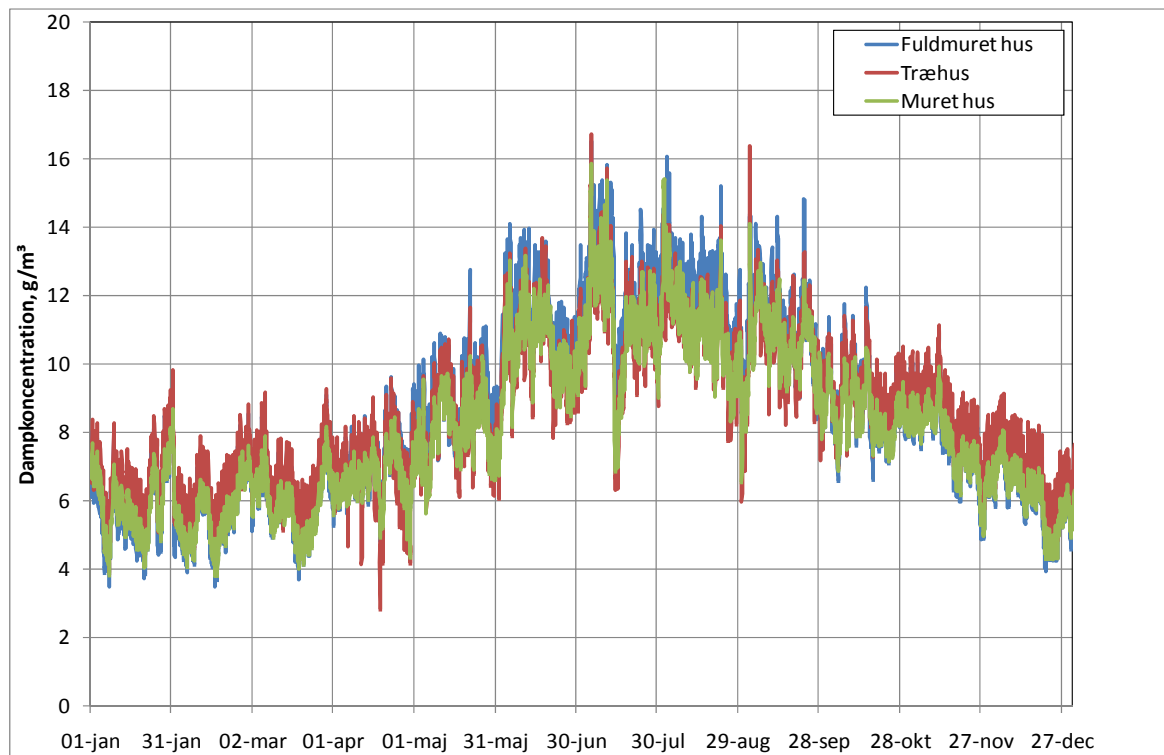


Figur 17 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

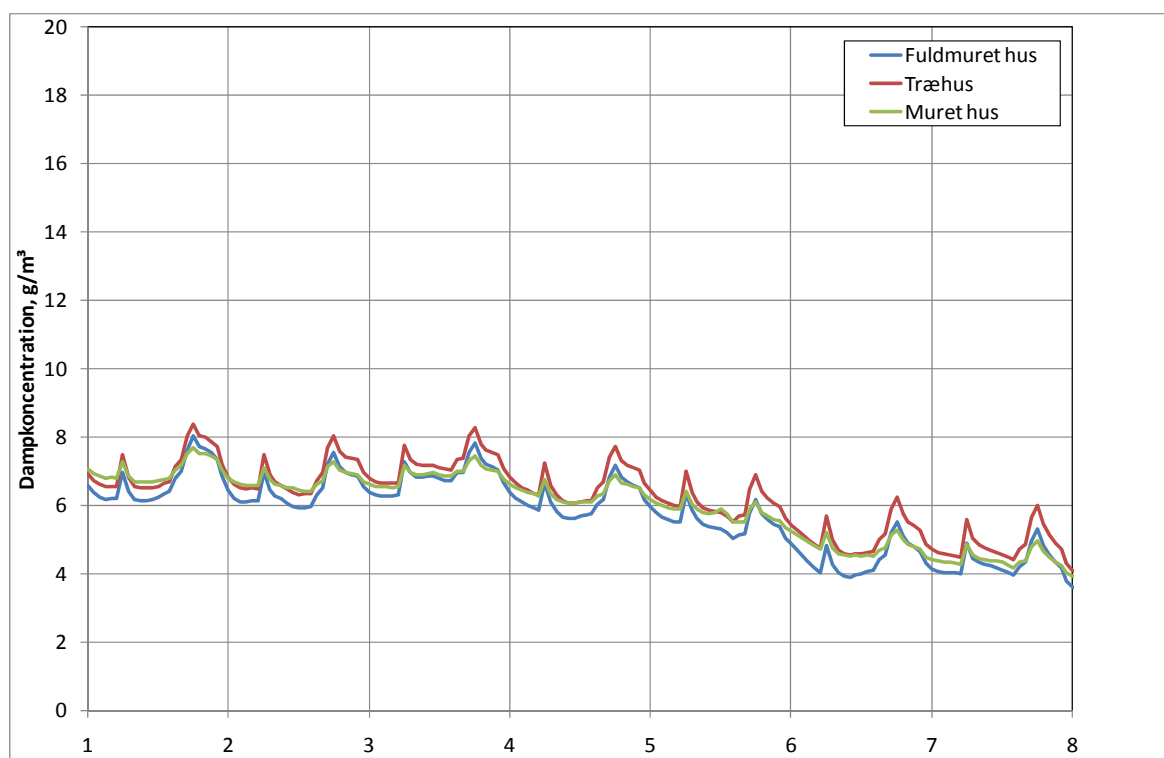
Forskelle i niveauerne og udsvingene i relativ fugtighed kan skyldes husenes forskellige geometri og de antagne fugtproduktionsrater i bygningerne, hvilket formentlig er mere betydende end selve materialevalget. Desuden spiller forskellene i indendørs lufttemperaturer (navnlig i sommerhalvåret) en rolle for den relative fugtighed. Den tilsyneladende mindre variation i månedsmidler af relativ fugtighed for træhuset i forhold til det fuldmurede hus og det murede hus, skyldes at i sommerhalvåret, hvor fugtigheden er høj, er temperaturen også højest i træhuset, hvilket alt andet lige giver en lavere RF.

Derfor ses der i de næste grafer på den indendørs vanddampkoncentration.

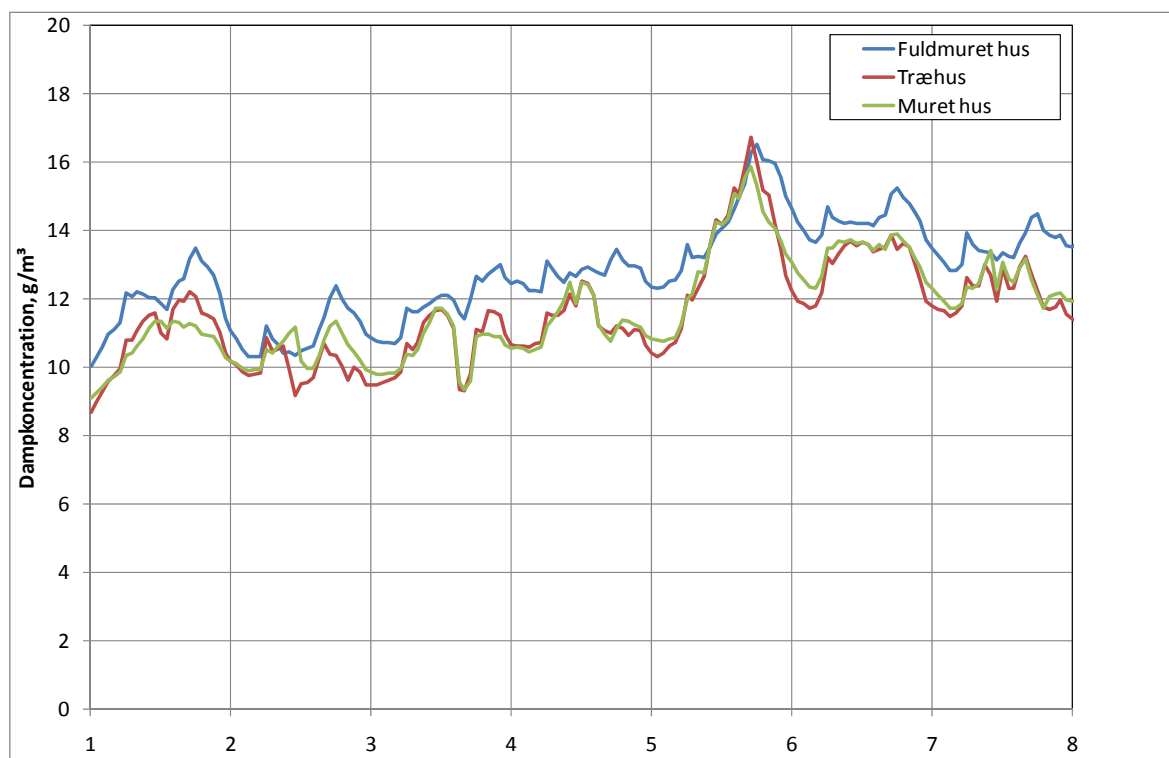
Dampkoncentrationsforløb



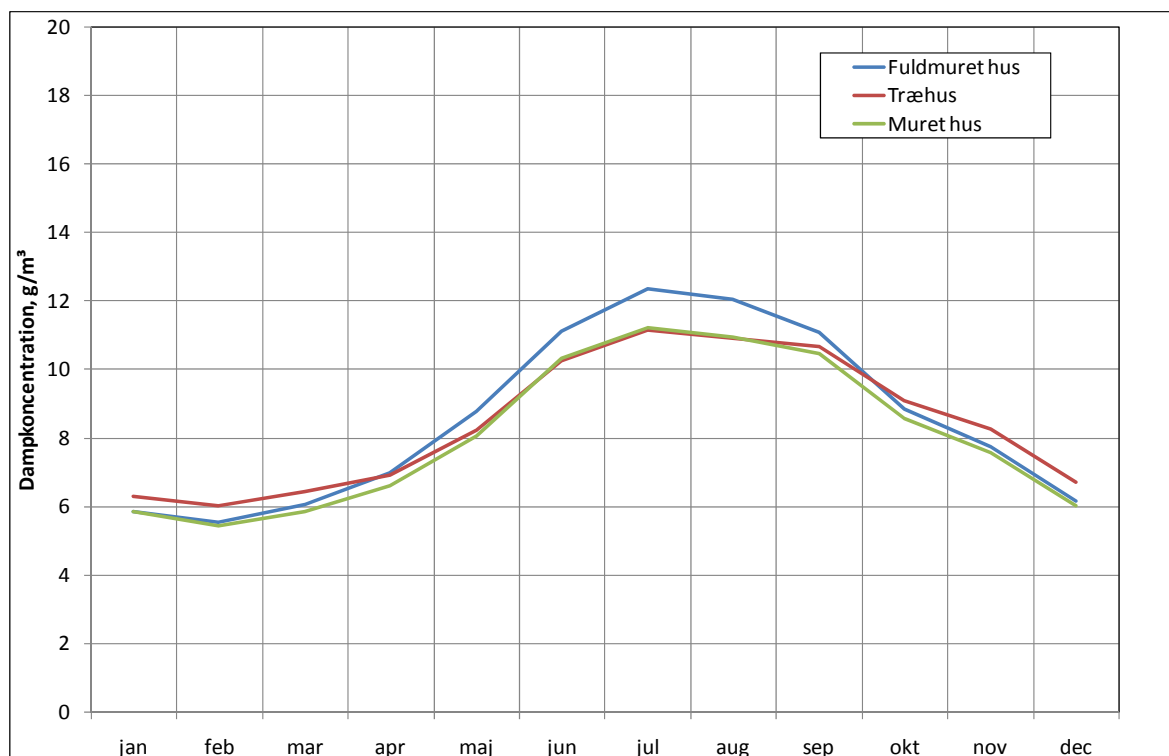
Figur 18 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 19 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 20 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 21 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Forskellene i dampkoncentration mellem de forskellige huse er ikke særlig markant. Månedsmiddelværdierne har en mindre sæsonmæssig variation i træhuset og er størst i det fuldmurede hus. Da træhuset har de højeste sommertemperaturer, er udluftningen

større i dette hus end i de andre, og det vil bevirke, at dampkoncentrationen nærmer sig den udendørs – altså bliver lavere. Til sammenligning er der i det fuldmurede hus beregningsmæssigt kun ganske få timer om året, hvor der bliver behov for udluftning på grund af høje indendørs temperaturer.

3.2 Helårssimuleringer med konstruktioner af fuldmur, træ og kombinationsmur

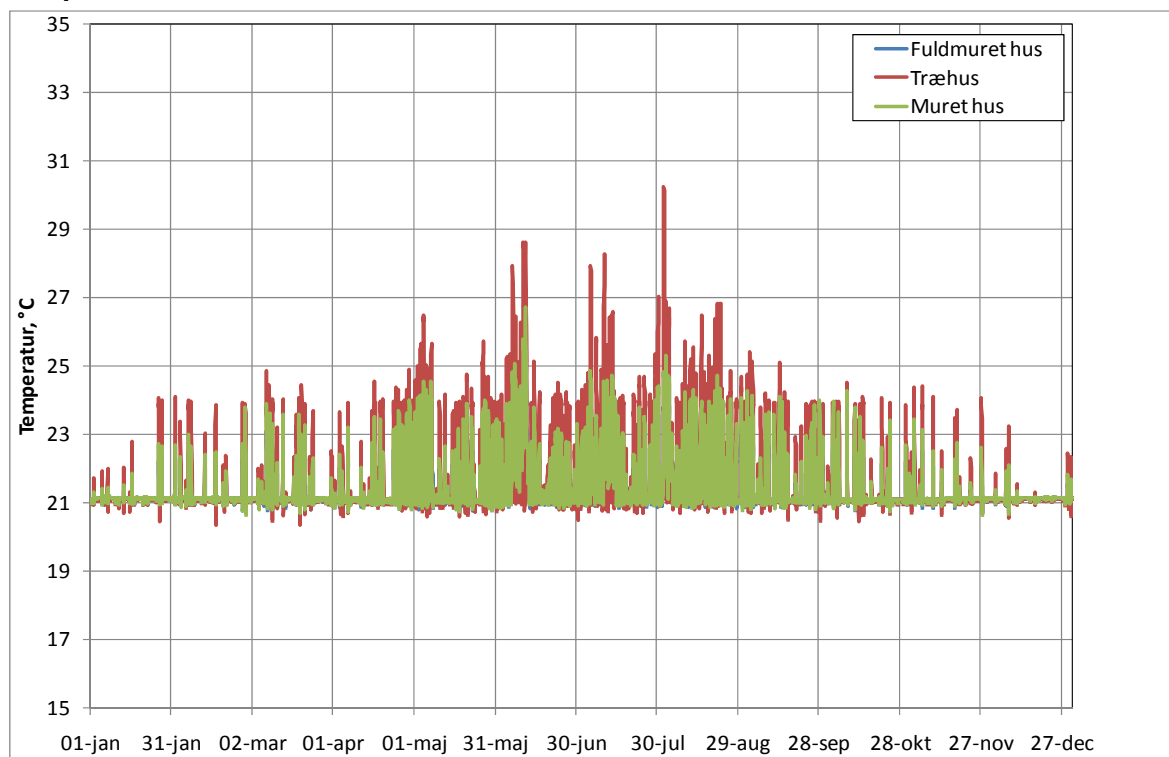
Der er gennemført tre simuleringer hvor geometri og beliggenhed fra huset i Rødvig er benyttet. Dette hus er oprindeligt med fuldmurede konstruktioner, men de tre simuleringer er gennemført således, at der på skift har været regnet med konstruktioner som i de øvrige huse. Husene har været ens i udformning og påvirkning, og kun materialevalget har varieret mellem husene jf. Tabel 8.. Konstruktionerne har ikke samme tykkelse, men dette er tilpasset i simuleringerne således, at det indendørs rumvolumen og arealerne af de indvendige konstruktionsoverflader bliver de samme husene imellem.

Tabel 8 Oversigt over konstruktioner anvendt i de tre simuleringer

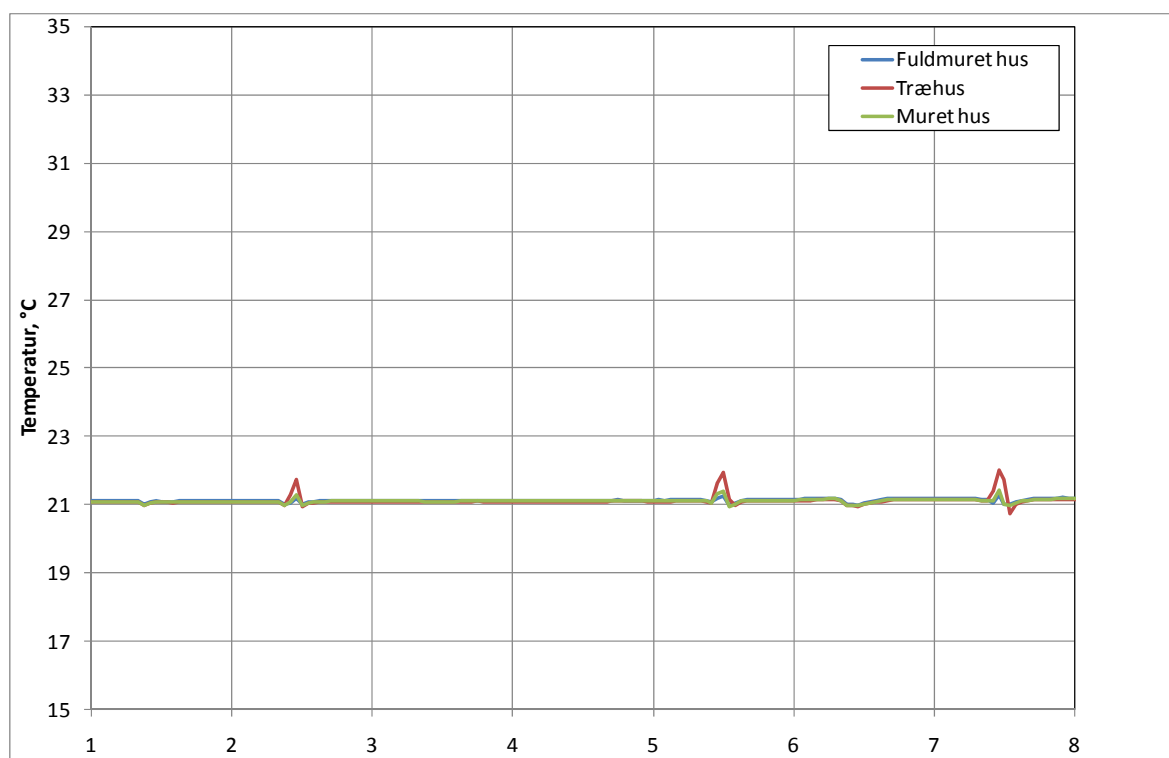
Simulering	Ydervæg	Gulv	Loft
Fuldmuret hus	Kalkpudset hulmursvæg af tegl	Marmorgulv på klaplag af beton	Malet gipsloft
Træhus	Malet gipsplade på træskeletvæg	Lakeret parketgulv på strøer/isolering, klappag og isolering	Ubehandlet loft af trælist
Muret hus	Malede letbetonelementer, isolering og muret formur	Olieret trægulv på klappag af beton samt glaserede fliser af tegl på klappag af beton	Ubehandlet loft af trælist

- Der benyttes normale danske referenceårs vejrdato (Design Reference Year, DRY).
- Der regnes med temperatursetpunkt på 21°C.
- Der regnes med et luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der regnes med udluftning på 3 h⁻¹ ved temperaturer over 24°C.

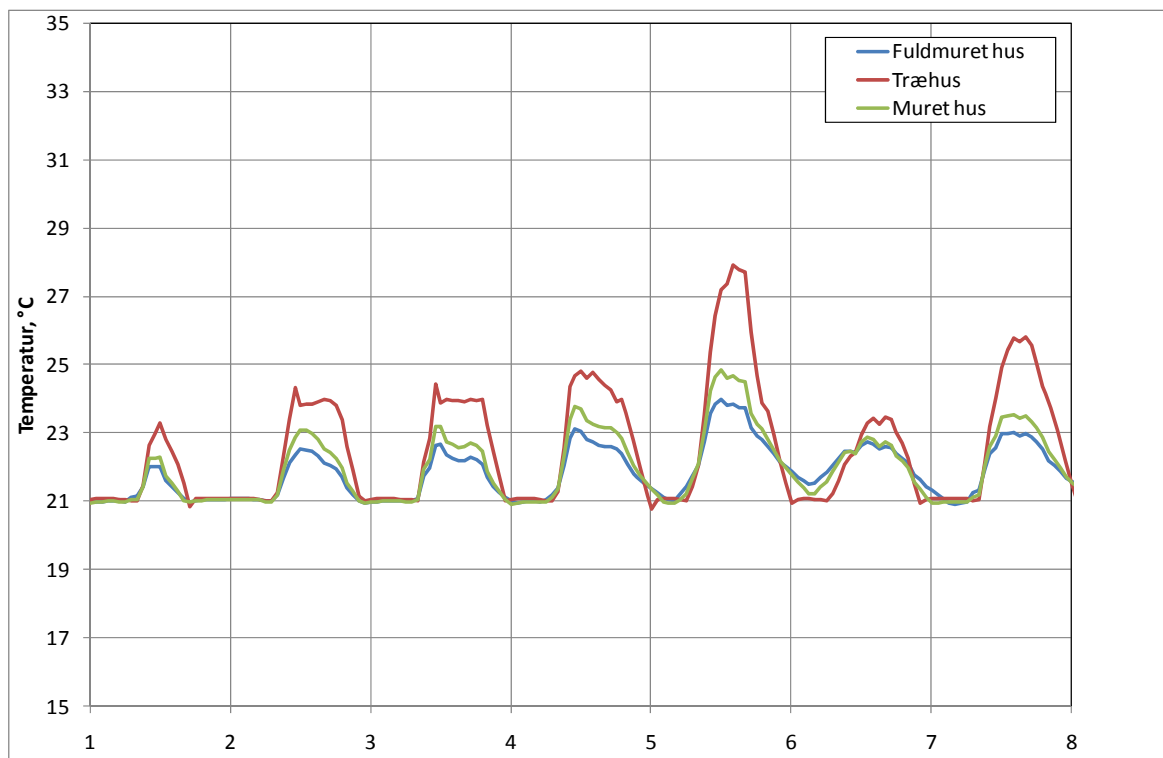
Temperaturforløb



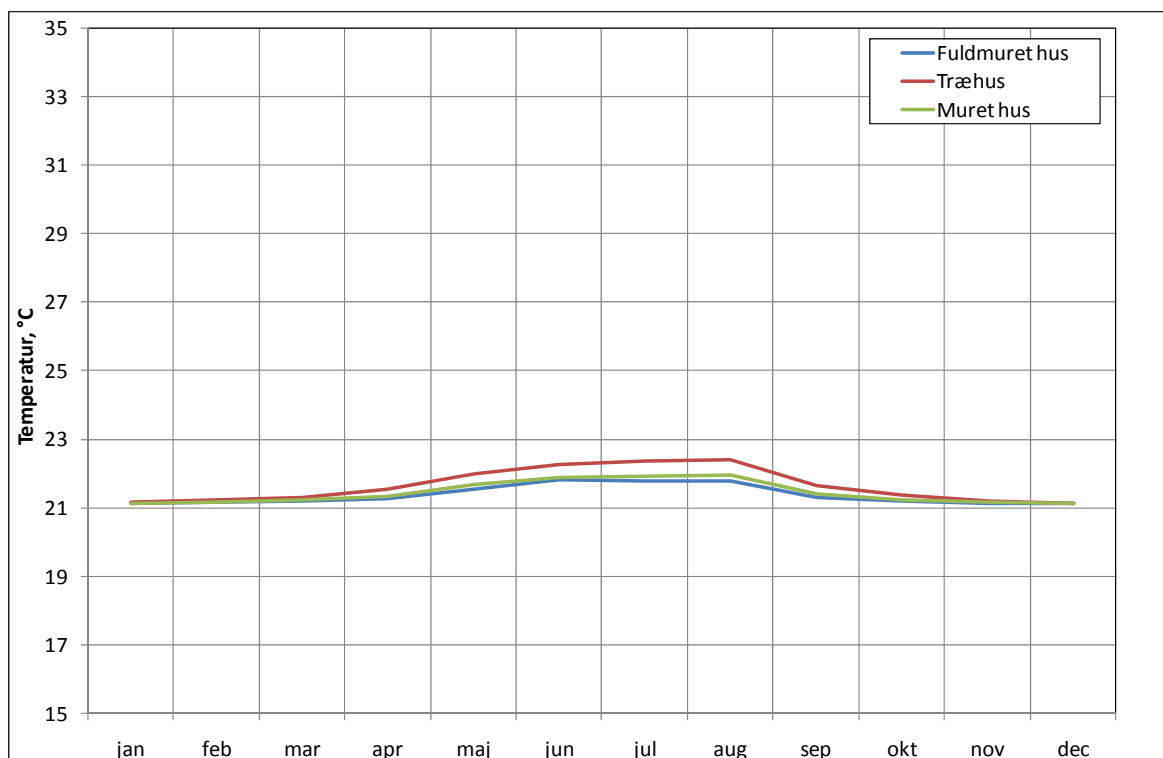
Figur 22 Timeværdier for den indendørs lufttemperatur gennem hele året.



Figur 23 Indendørs lufttemperatur i Uge 1 (primogenit). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



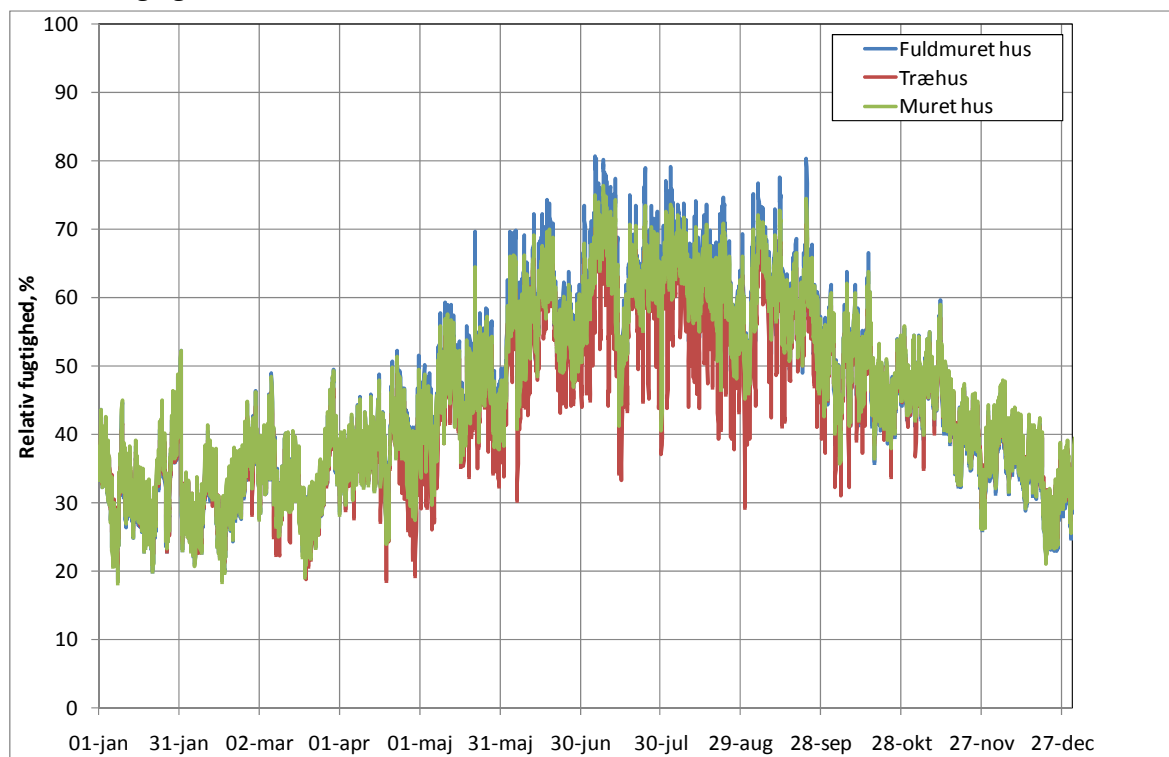
Figur 24 Indendørs lufttemperatur i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



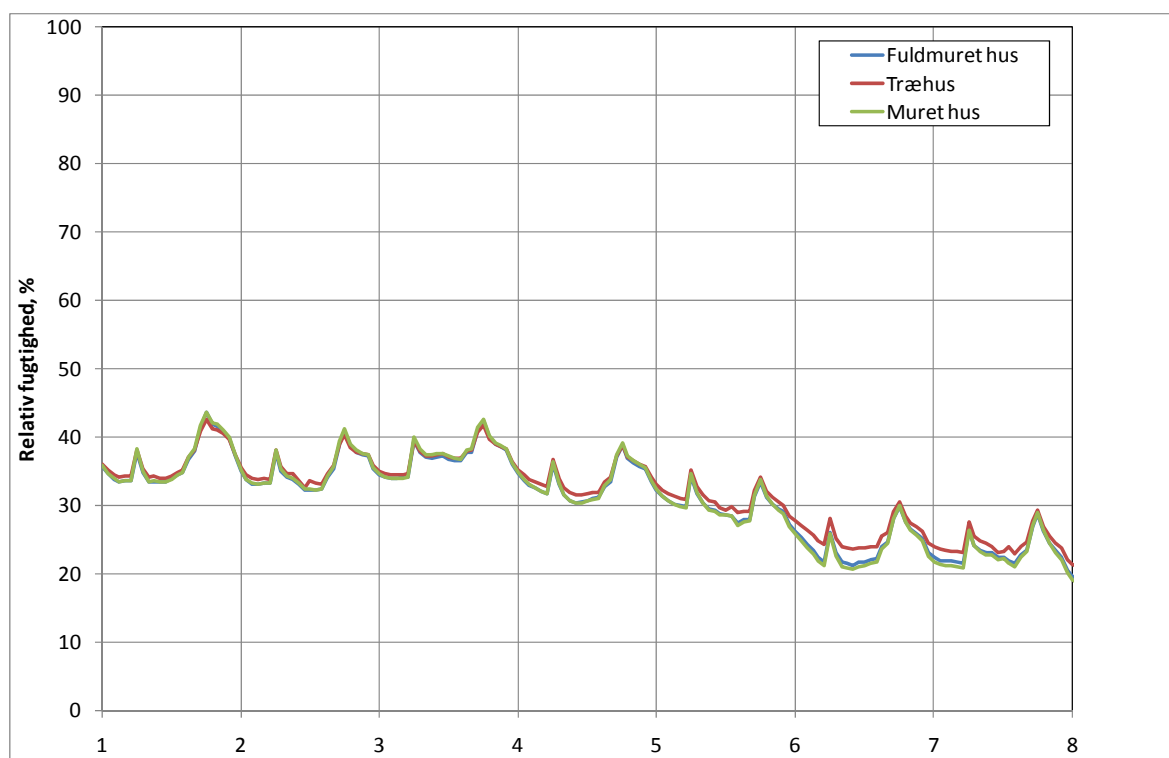
Figur 25 Månedsmidler af den indendørs lufttemperatur i løbet af året.

Beregningerne bekræfter, at det fuldmurede hus har det mest temperaturstabile indeklima, medens temperaturvariationerne er størst for træhuset.

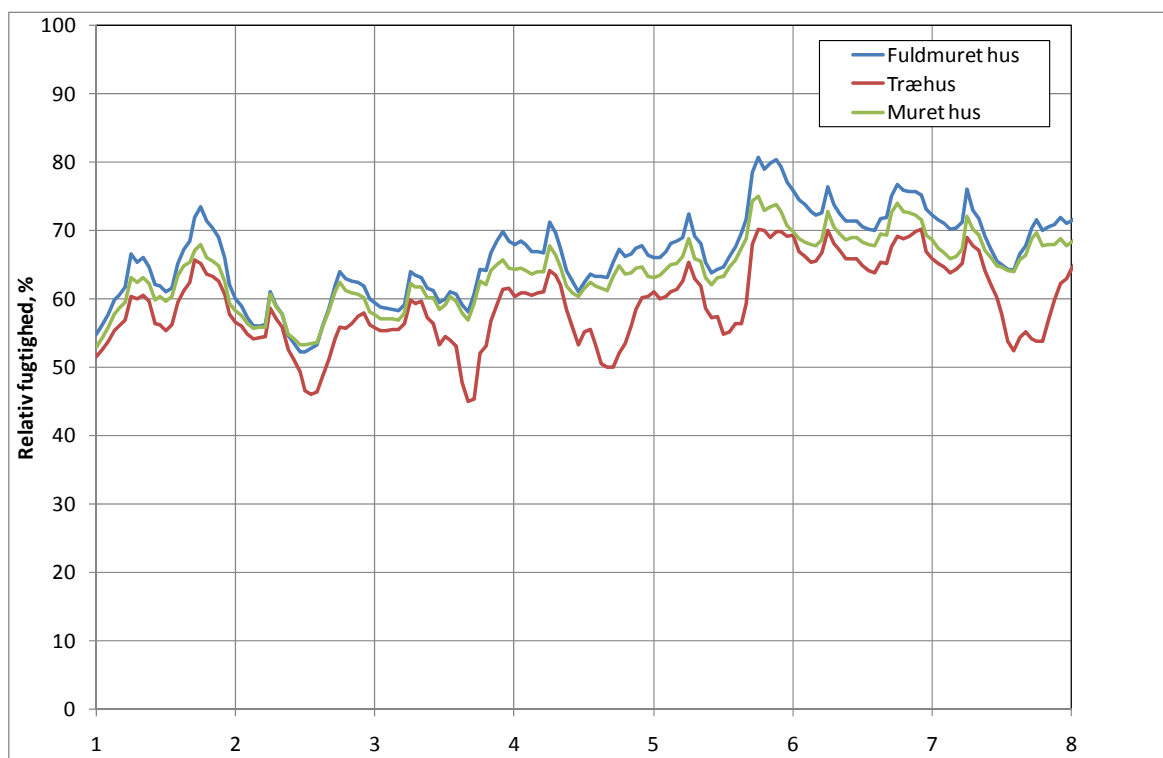
Relativ fugtigheds-forløb



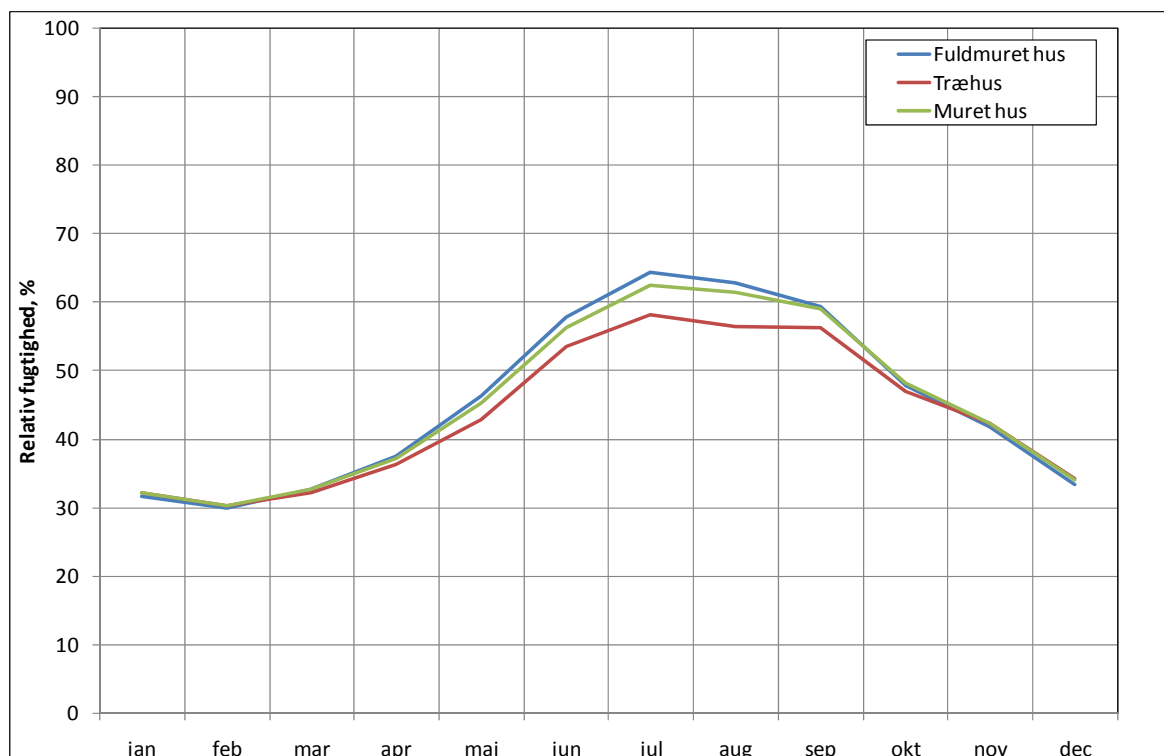
Figur 26 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 27 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



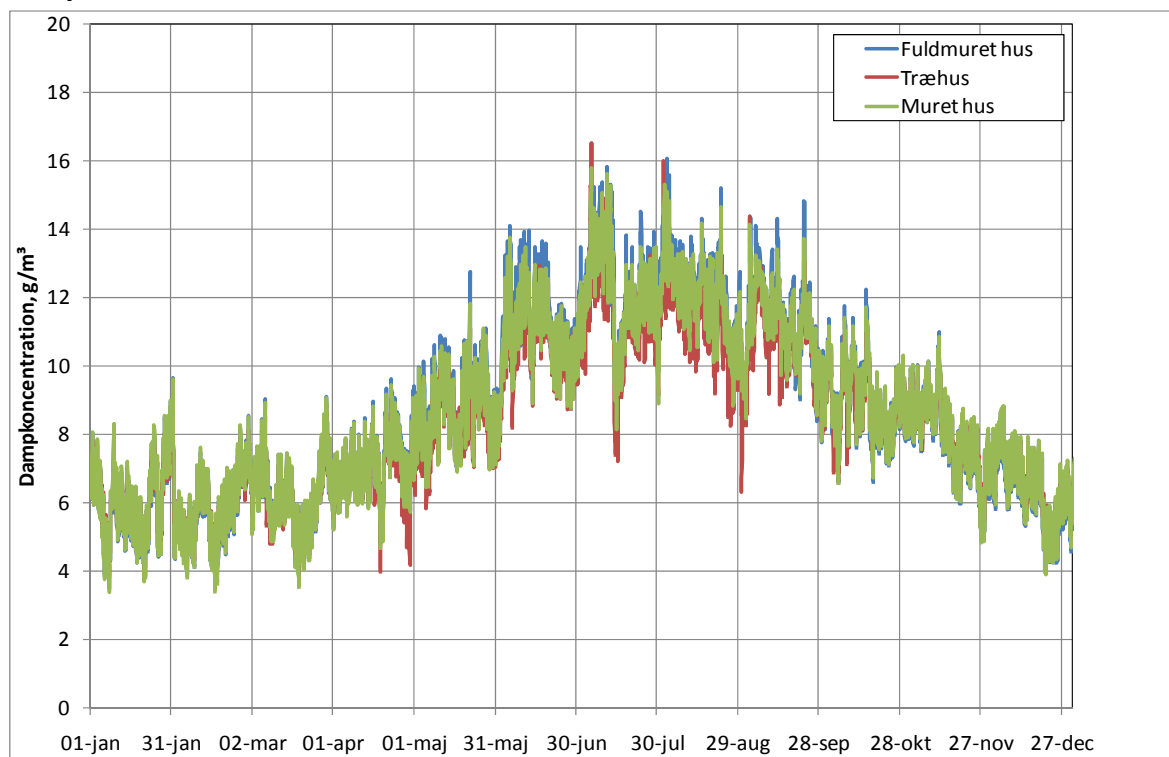
Figur 28 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



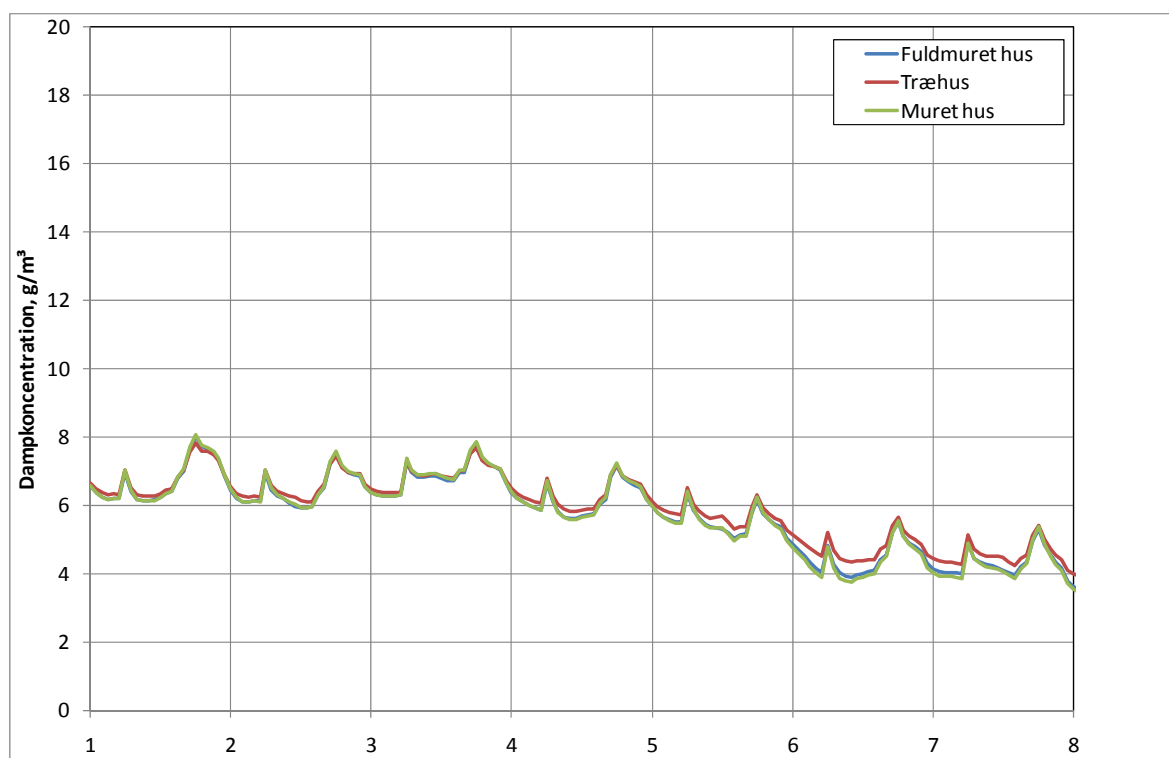
Figur 29 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

I perioder, hvor temperaturerne er ens, forløber den indendørs relative fugtighed også på samme måde i de forskellige huse.

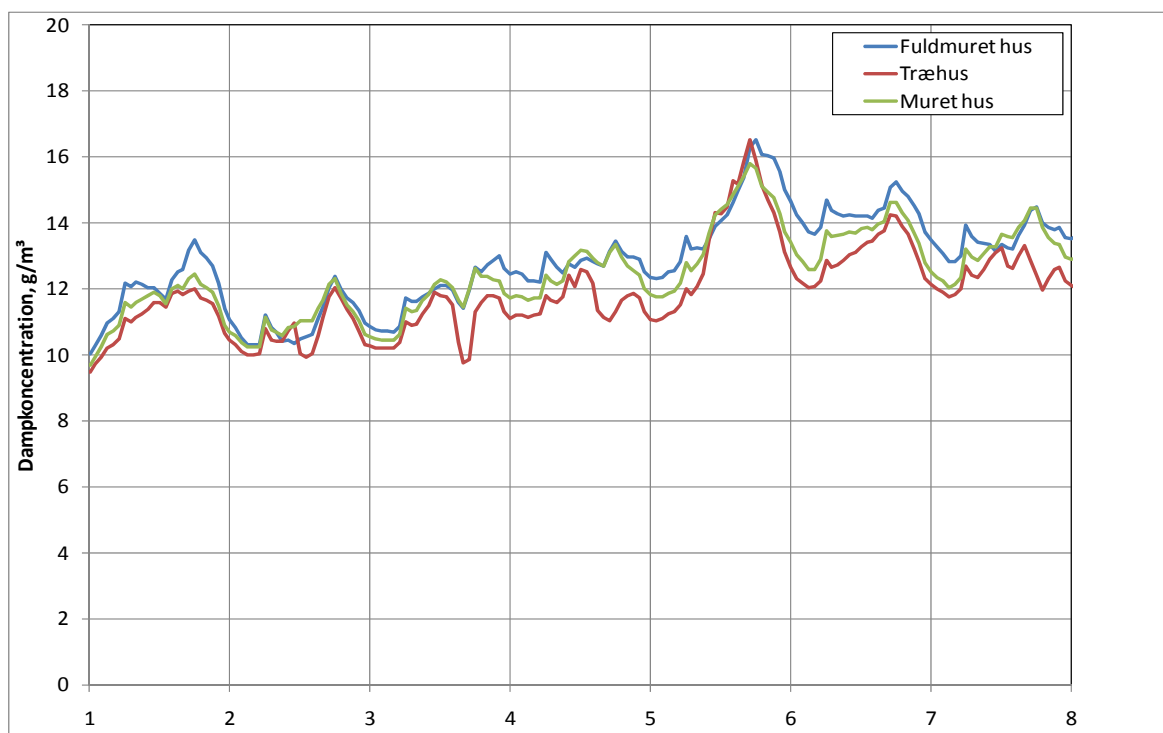
Dampkoncentrationsforløb



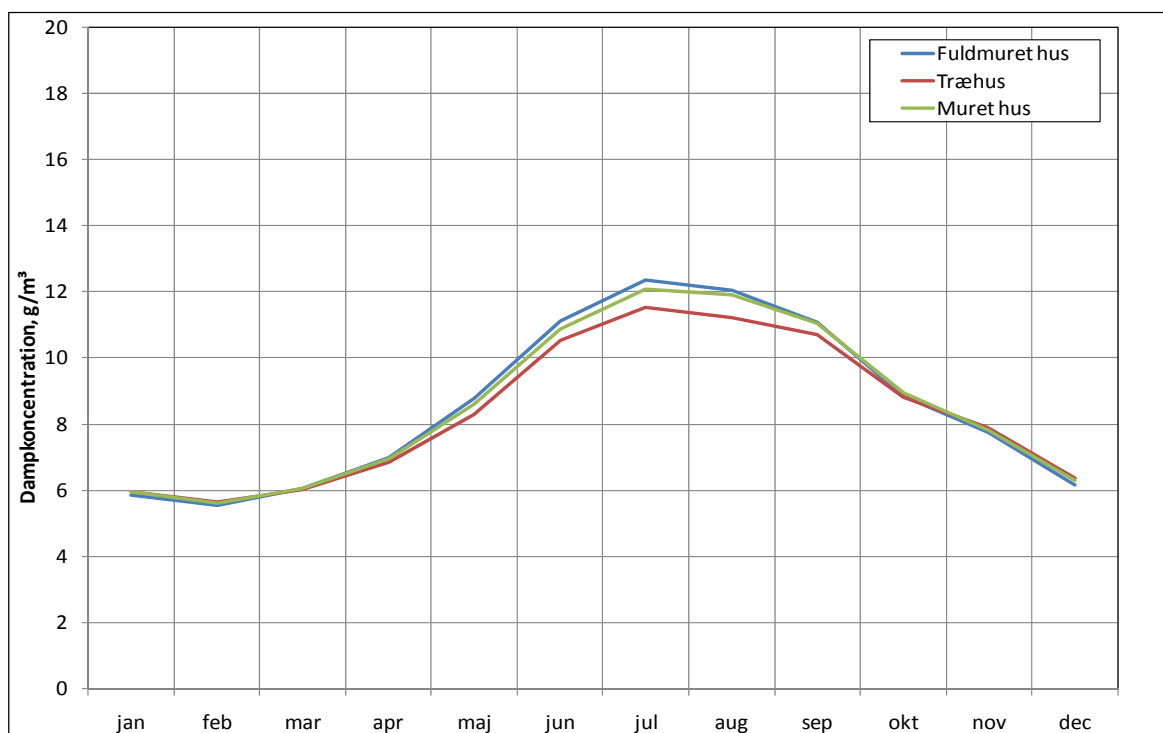
Figur 30 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 31 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



Figur 32 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dages nummer i måneden.



Figur 33 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Den indendørs dampkoncentration forløber stort set ens i alle varianter af huset, idet koncentrationen dog er lavest om sommeren i træhuset. I træhuset er der betydeligt større udluftning (på grund af temperaturer over 24°C) end i det murede hus, som igen har mere udluftning end det fuldmurede hus.

3.3 Helårssimuleringer uden overfladebehandling

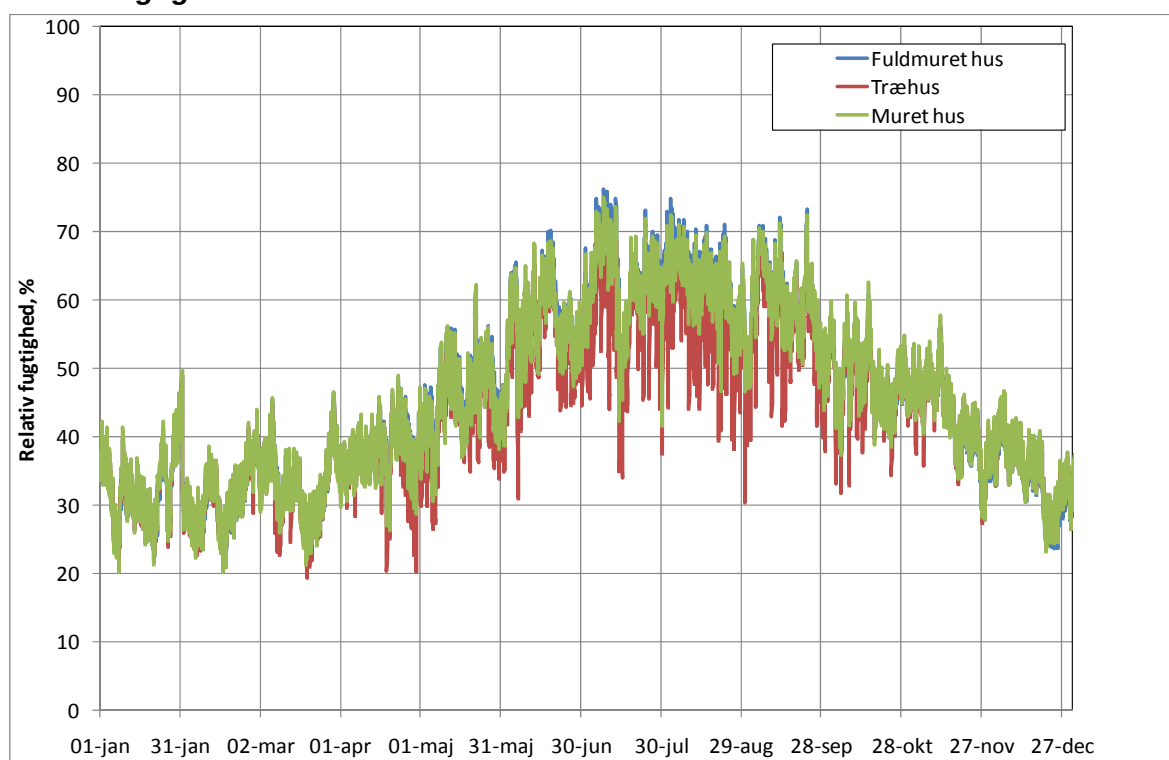
Der er gennemført helårssimuleringer af alle tre huse ved benyttelse af normale danske referenceårs vejrdata (Design Reference Year, DRY).

- Der regnes med temperatursetpunkt på 21°C.
- Der regnes med et luftskifte på 0,5h⁻¹.
- Der regnes med udluftning på 3 h⁻¹ ved temperaturer over 24°C.

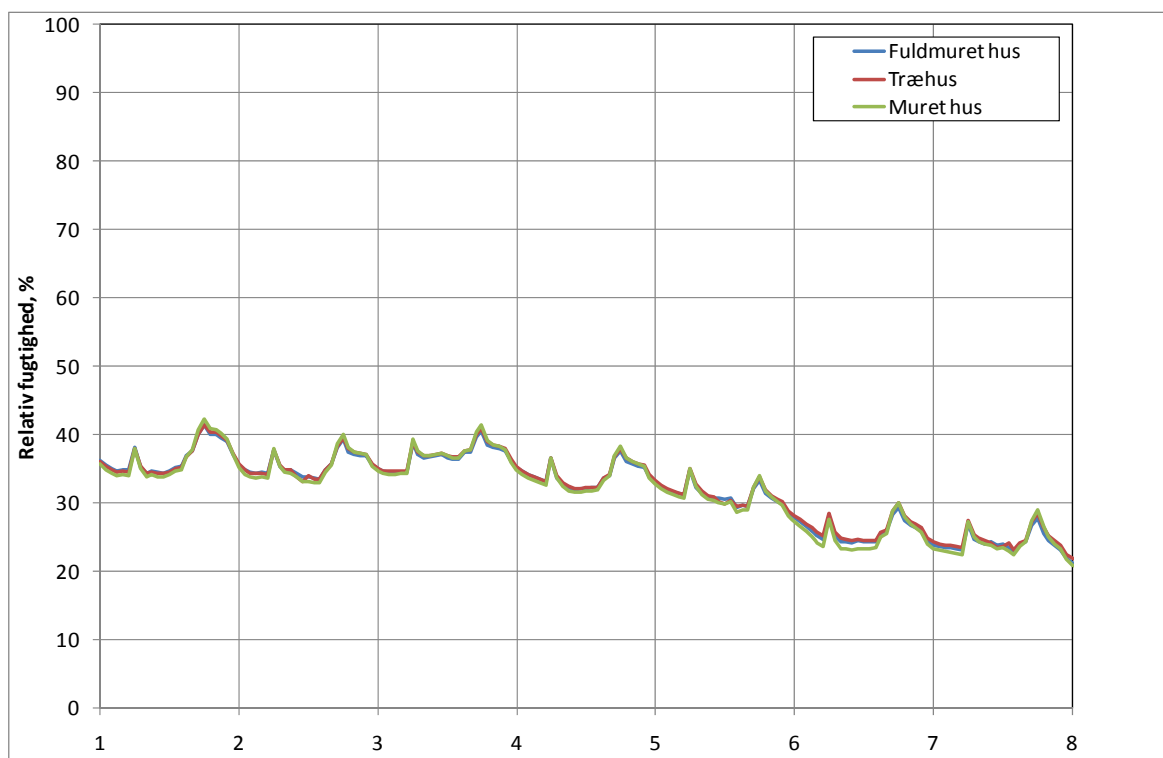
Her benyttes geometrien fra det fuldmurede hus, idet væg-, gulv og loftkonstruktioner fra de øvrige huse på skift er indsat, denne gang dog uden overfladebehandling.

Temperaturforløbene vises ikke igen, da de stort set er sammenfaldende med temperaturerne fra den forrige gruppe beregninger.

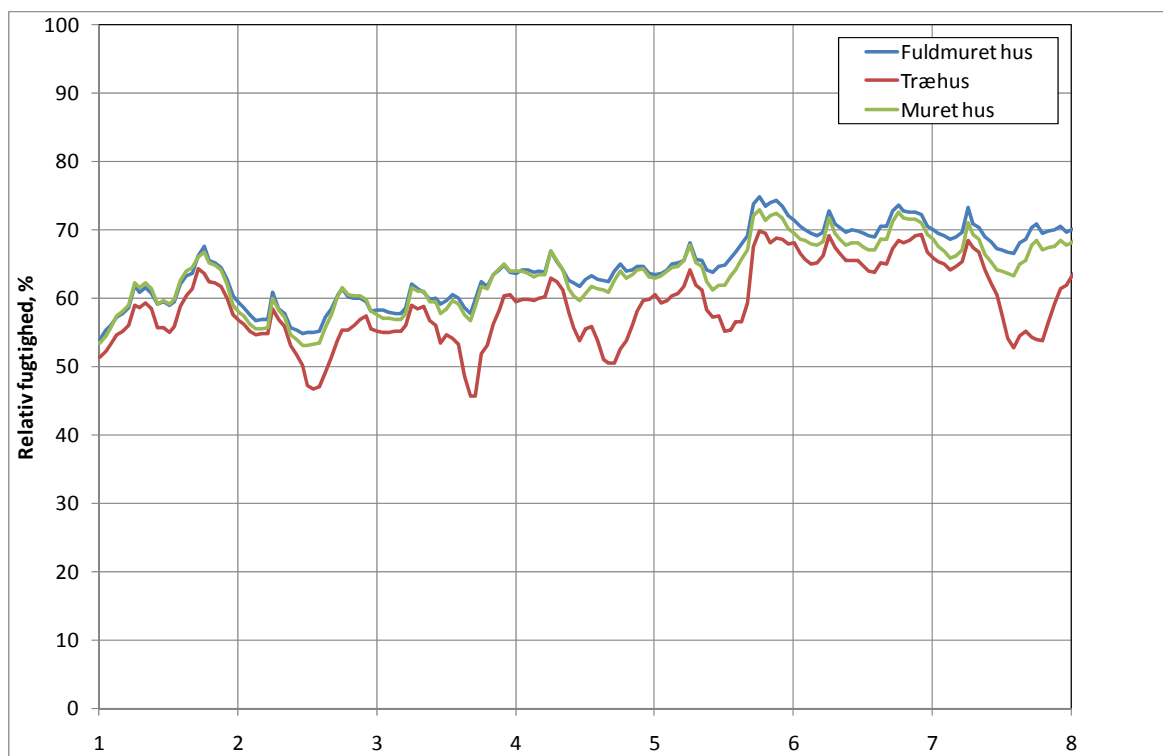
Relativ fugtigheds-forløb



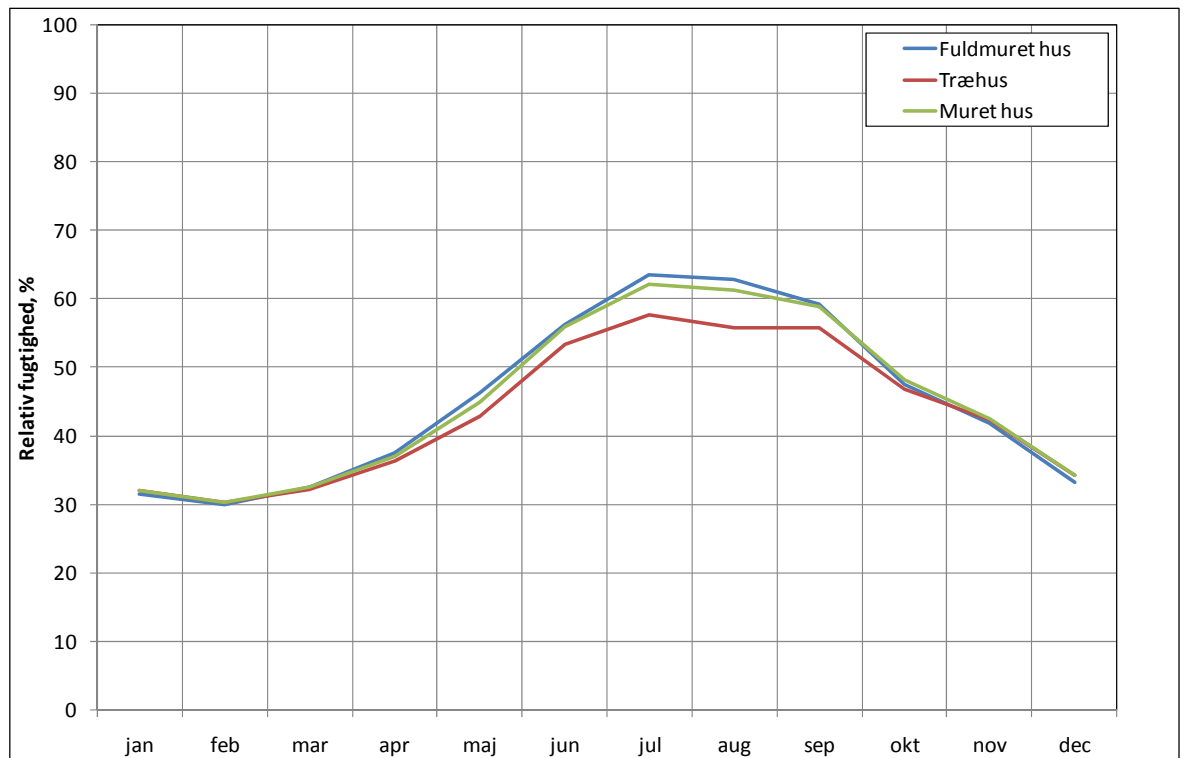
Figur 34 Timeværdier for den indendørs relative fugtighed gennem hele året.



Figur 35 Indendørs relativ fugtighed i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



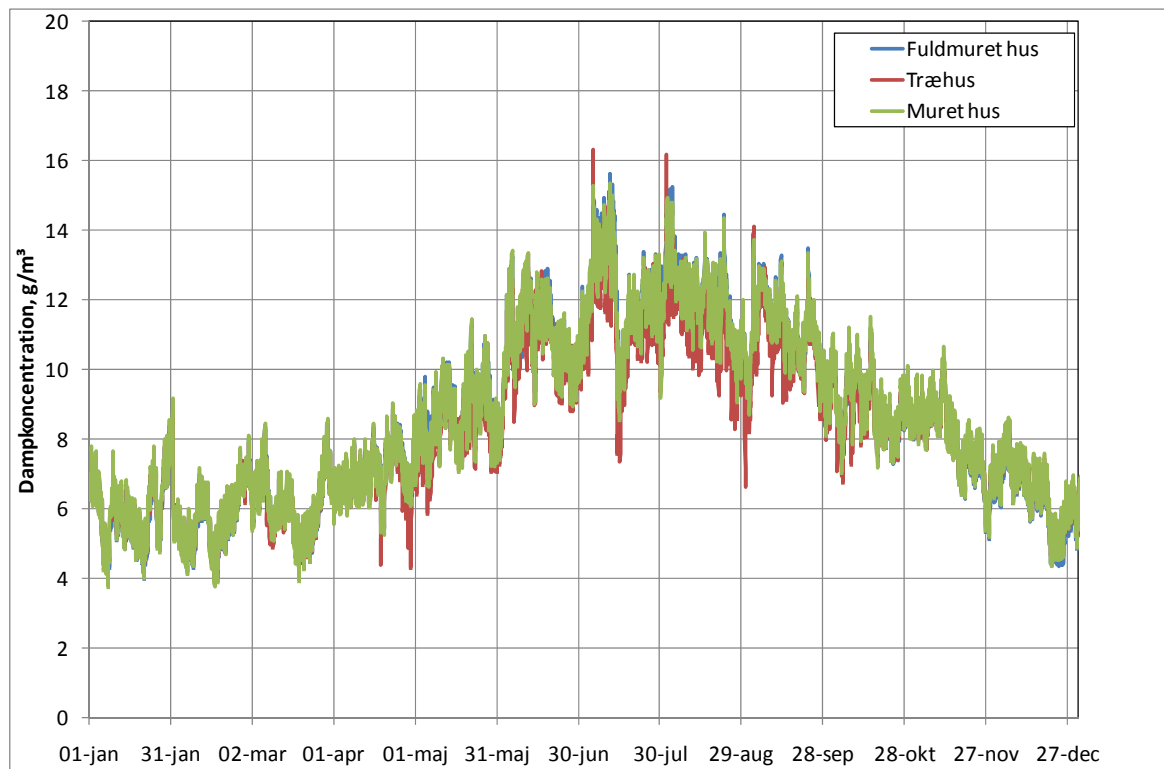
Figur 36 Indendørs relativ fugtighed i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



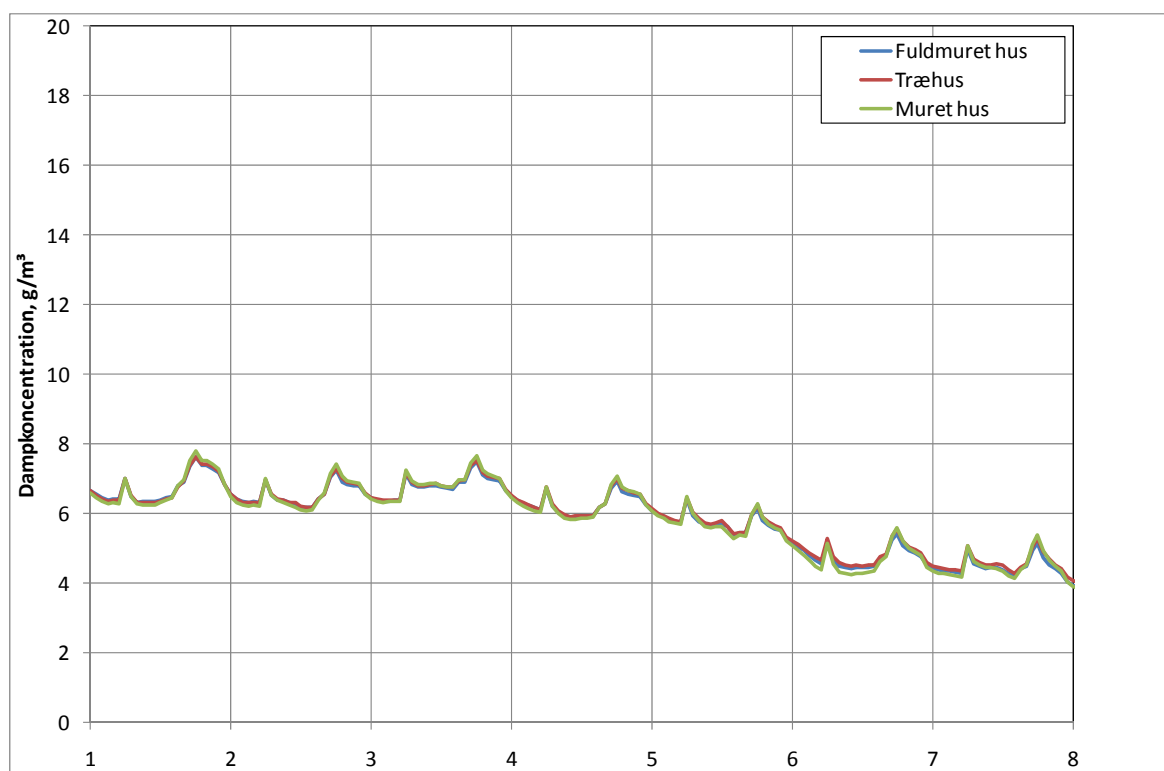
Figur 37 Månedsmidler af den indendørs relative fugtighed i løbet af året.

RF-forløbene er ikke markant anderledes end for beregningerne af de tilsvarende bygninger i tilfælde hvor mange af konstruktionerne havde overfladebehandling. Igen tyder det altså på, at det i højere grad er forskelle i temperaturvariationer i husene, der spiller en rolle for hvilke RF-variationer, man ser, end det direkte er materialernes fugtegenskaber, der spiller en rolle.

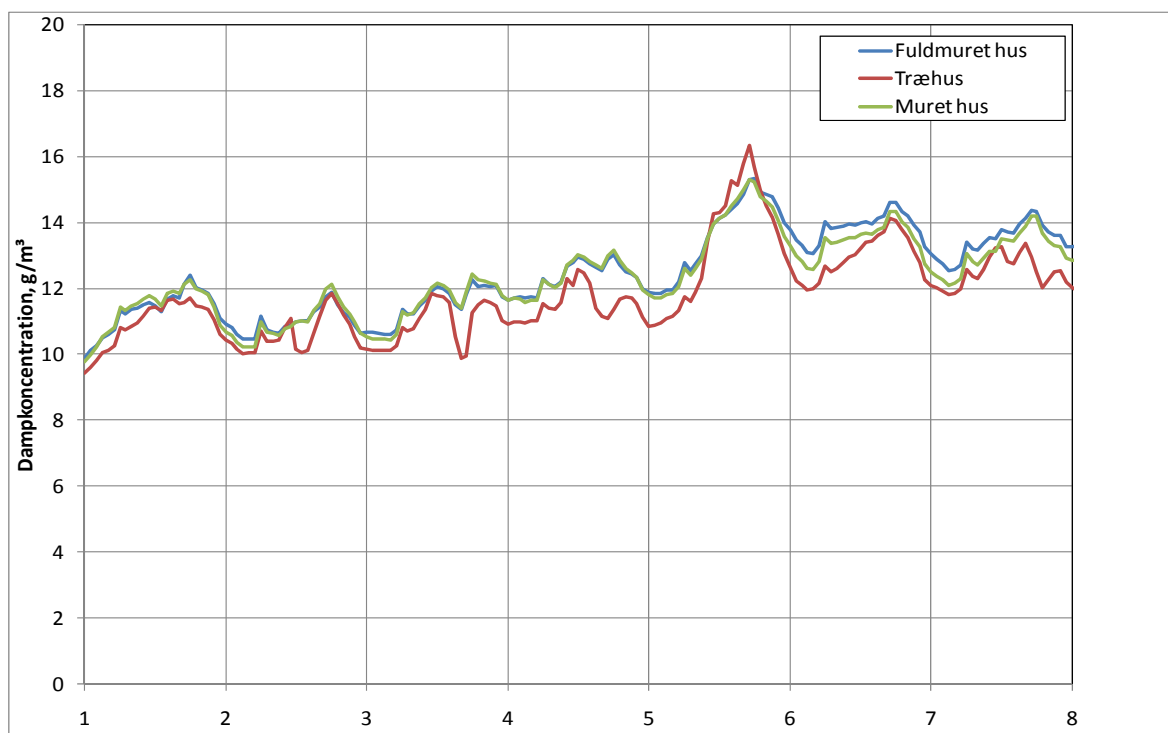
Dampkoncentrationsforløb



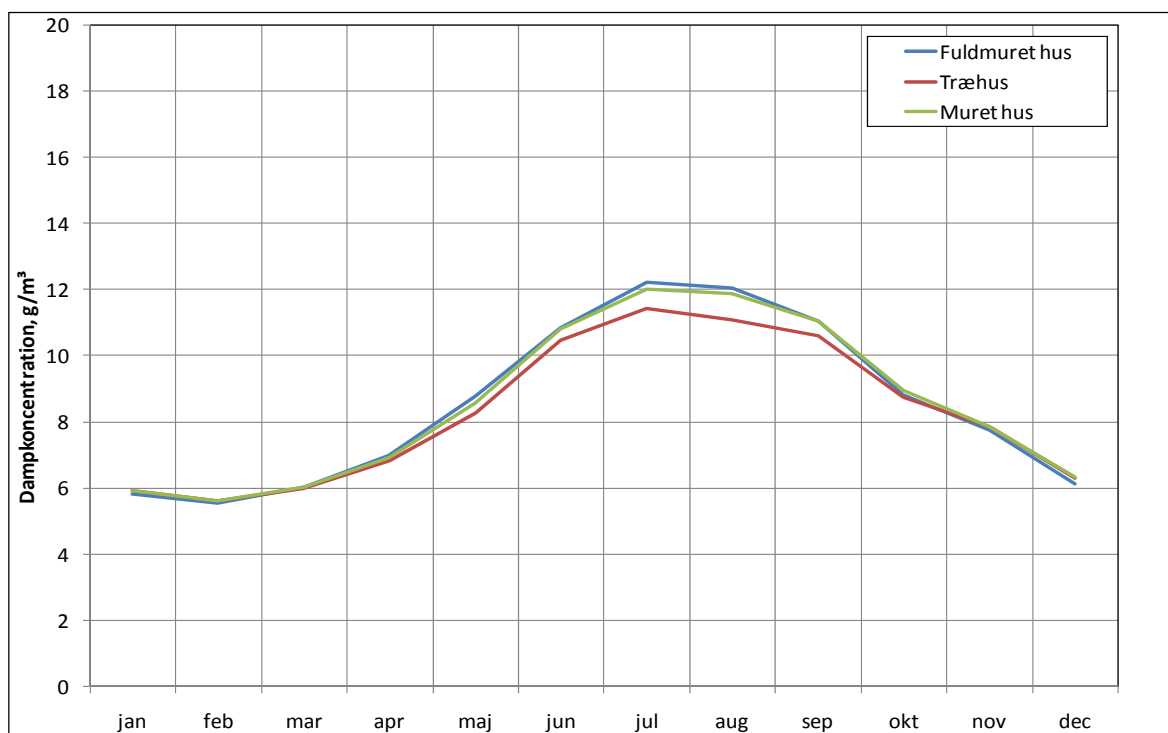
Figur 38 Timeværdier for den indendørs vanddampkoncentration gennem hele året.



Figur 39 Indendørs vanddampkoncentration i Uge 1 (primo januar). X-aksen angiver dages nummer i måneden.



Figur 40 Indendørs vanddampkoncentration i første uge af juli. X-aksen angiver dagens nummer i måneden.



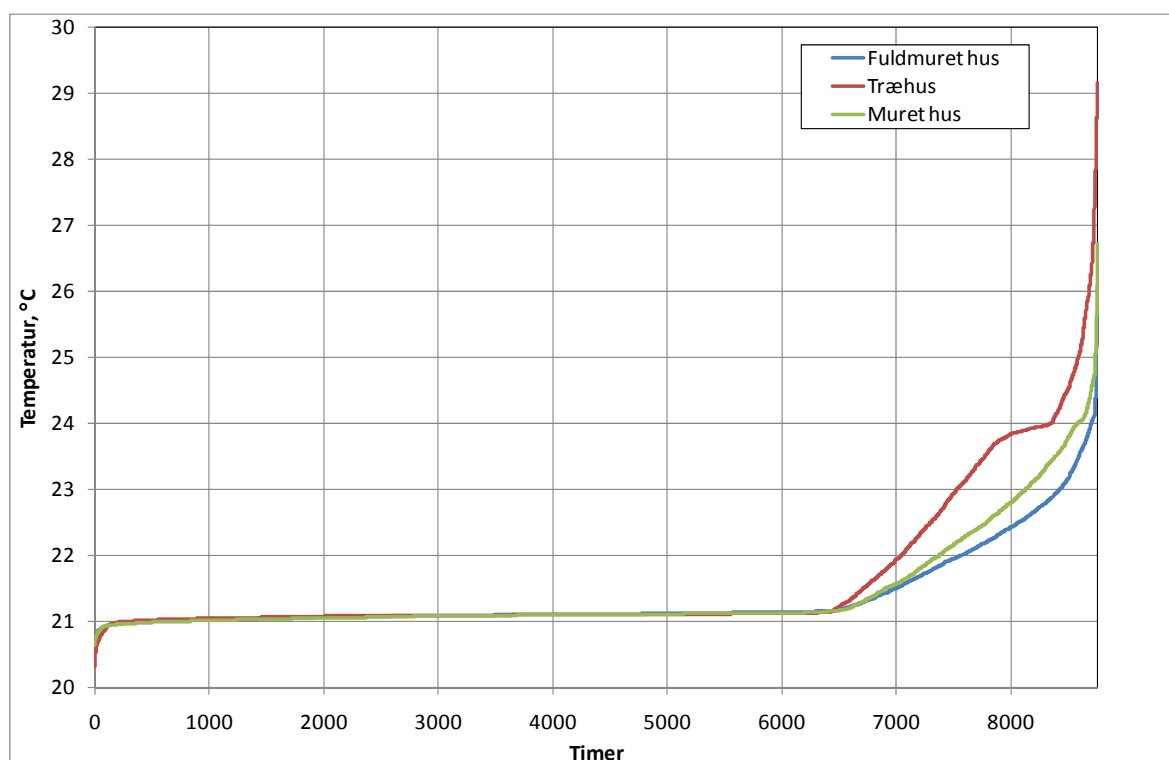
Figur 41 Månedsmidler af den indendørs vanddampkoncentration i løbet af året.

Sammenligningen af vanddampkoncentrationer giver ikke anledning til nye bemærkninger. Forløbene er ret ens, og forskelle, der optræder, er nok især betinget af forskellige niveauer af udluftning i husene, hvilket er en følge af husenes forskelle i temperaturvariationer.

4 Afrunding

Simuleringerne viser, at forskellene i fugtegenskaber for de valgte materialer ikke har en særlig markant indflydelse på det fugtmæssige indeklima i husene set over en længere periode. Der kan dog påvises en betydning af materialer i forbindelse med afdampningen af vand.

Der er derimod store forskelle i materialernes evne til at moderere indendørs temperaturudsving som følge af solindfald og høje udendørstemperaturer. Det fuldmurede hus har et mere temperaturstabilt indeklima end træhuset, mens det murede hus med kombinationsmur placerer sig imellem de to. Dette fremgår også af varighedskurven for den indendørs temperatur, Figur 42. Temperaturstabiliteten kan være en kvalitet i sig selv.



Figur 42 Varighedskurver for indendørs temperaturer i Rødvig-huset med forskellige konstruktionsvalg.

Denne egenskab til at regulere de termiske forhold har en indflydelse på (1) behovet for udluftning for at holde overtemperaturer nede, samt (2) hvilken relativ fugtighed, der opnås indendørs. Dette indikerer, at det er disse to forhold, der er mest afgørende for, hvordan byggematerialerne påvirker de fugtmæssige indeklimaparametre.