

Jesper Kragh
Peter Weitzmann
Svend Svendsen

Udformning og styring af energirigtige gulvvarmeanlæg

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Rapport
BYG·DTU R-063
2003

ISBN 87-7877-125-0

Forord

I denne rapport beskrives en detaljeret beregningsmæssig analyse af gulvvarmeanlægs funktion med hensyn til varmekonsum og indeklima i bygninger med et ca. 33% mindre energiforbrug end energirammen i Bygningsreglement 95. Resultaterne af analyserne er sammenfattet i en vejledning i udformning og styring af energirigtig gulvvarmeanlæg.

Rapporten udgør slutrapporten for projektet 'Energirigtig gulvvarme i BR2005 bygninger' med journal nr. 1213/01-0022 under Energistyrelsens energiforskningsprogram (EFP). Projektet er desuden støttet af Thermisol A/S.

Projektet er koordineret med projektet 'Byg Boliger Bedre – energimæssig optimering af nye boliger med gulvvarme' med EFP journal nr. 1213/01-0023 og er gennemført med deltagelse af en følgegruppe bestående af:

Lars Olsen, Teknologisk Institut, Byggeri
Niels Radisch, Teknologisk Institut, Energi
Nick Bjørn Andersen, Teknologisk Institut, Energi
Søren Aggerholm, Byg og Byg
Bjørn Møller Laursen, Thermisol A/S
Lars Rieck, Wirsbo
Søren Rasmussen, Danrad

Indholdsfortegnelse

1	Resumé.....	4
2	Summary	5
3	Nuværende gulvvarmesystemer og styringer.....	6
3.1	Opbygning af et gulvvarmesystem.....	6
3.2	Konstruktionstyper	6
3.3	Tung gulvvarme.....	6
3.4	Let gulvvarme	7
3.5	Styringsstrategi.....	8
3.6	Shunt/blandesløjfe.....	8
3.7	Styring On/off.....	9
4	Simuleringsprogrammet FHSim.....	10
4.1	Gulvvarmemodellerne	11
5	Sammenligning af tung og let gulvvarme.....	14
6	Beskrivelse af referencemodel	18
6.1	Simuleringsrutine.....	19
6.2	Tidsskridt.....	20
6.3	Ventilation	20
6.4	Klimaskærmskonstruktioner.....	20
6.5	Generelle inputdata.....	21
6.6	Simulering med referencemodel.....	22
7	Isoleringsniveau	24
7.1	Isoleringstykkelser.....	24
8	Linietab ved fundamentet	24
9	Styring af gulvvarmetemperaturen.....	25
9.1	Konstant fremløbstemperatur.....	26
9.2	Udetemperaturstyring.....	29
9.3	Start/stop differens.....	31
9.4	Natsækning	32
10	Gulvbelægnings.....	32
11	Rumtemperaturen og varmekonsumet	33
12	Sammenligning med ideel opvarmning.....	34
13	Badeværelser.....	36
14	Konklusion	37
	Appendiks 1 Fiktiv jordtemperatur	39
	Appendiks 2 Plot af resultater fra FHSim	42

1 Resumé

Formålet med arbejdet har været at opstille en vejledning til projektering/dimensionering og drift af energirigtige gulvvarmesystemer i BR2005 bygninger.

Følgende områder er undersøgt mht. varmekonsum og indeklima:

- Let og tung gulvvarme
- Isoleringstykkelsen i terrændækket
- Linietab ved fundament/terrændæk
- Styring af gulvvarmetemperaturen
 - Fremløbstemperatur
 - Fremløbstemperatur styret efter udetemperatur
 - Natsenkning
 - Start/stop differens (Dead band)
- Rumtemperatur og varmekonsum
- Gulvbelægninger
- Badeværelser med gulvvarme

Undersøgelserne er foretaget med simuleringssværktøjet FHSim /1/ (Floor Heating Simulation).

I forbindelse med projektet er der opbygget en gulvvarmemodel til FHSim i /2/, som del af et igangværende ph.d.-projekt, således at det er muligt med FHSim, at simulere de 2-dimensionelle varmestrømme ved fundamentsamlingen. Programmet beskrives nærmere i kapitel 4.

2 Summary

The purpose of this project has been to create a guide for projecting/dimensioning and controlling floor heating system in BR2005 houses with low energy consumption.

Focusing on energy consumption and indoor thermal climate the following topics have been investigated:

- Light and Heavy floor heating system
- Insulation thickness in the floor construction
- Linear thermal transmittance at foundation/floor construction
- Control of the floor heating system
 - Supply temperature
 - Supply temperature controlled by the outdoor temperature
 - Night lowering of the room temperature
 - Start/stop difference (Dead band)
- Room temperature and energy consumption
- Floor coverings
- Bath rooms with floor heating

The work have been done using the simulation tool FHSim /1/.

In this project a new model of a floor heating construction was built in FHSim /2/, as a part of a PhD.-project. With this model it is possible with FHSim to simulate the 2-dimensional heat flux at the connection between the foundation and floor construction. The programme FHSim is describe in chapter 4.

3 Nuværende gulvvarmesystemer og styringer

I dette afsnit gives en kort beskrivelse af de forskellige typer gulvvarmeanlæg, der findes på det danske gulvvarmemarkedet. Først beskrives opbygningen af et gulvvarmesystem, dernæst konstruktionstyperne, og til sidst den styring der benyttes i gulvvarmesystemer.

3.1 Opbygning af et gulvvarmesystem

Et gulvvarmesystem består grundlæggende af en gulvvarmeslange, hvorigennem der sendes varmt vand, der opvarmer gulvkonstruktionen/gulvoverfladen. I hvert enkelt rum er der en eller flere slanger, der forsynes fra et fordelerrør, der er placeret centralt i huset. Afhængig af om det anlæg der leverer varmen til systemet, kan levere væske ved en passende temperatur på omkring 35 °C til 45 °C, benyttes der enten en direkte forsyning fra fordelerrøret, eller der benyttes en shunt (blandesløjfe), der forhindrer en for høj fremløbstemperatur.

3.2 Konstruktionstyper

Der findes principielt to hovedtyper af gulvvarmeanlæg: tunge og lette. I det tunge gulvvarmesystem indstøbes gulvvarmerørene typisk i et 100 mm betonlag. De lette gulvvarmesystemer opbygges ved at gulvvarmeslangerne lægges i en varmekonfigurationsplade, der anbringes ovenpå et trykfast isoleringsmateriale.

I begge anlægstyper benyttes der som standard en centerafstand på 300 mm mellem gulvvarmeslangerne.

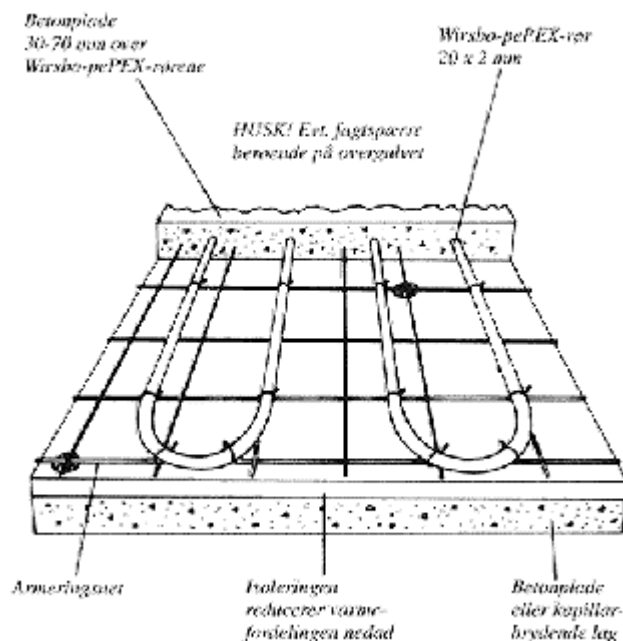
3.3 Tung gulvvarme

Det tunge gulvvarmesystem består som ovenfor beskrevet af en gulvvarmeslange indstøbt i et betondæk. Under betondækket er der isolering og kapillarbrydende lag. Ovenpå betondækket anbringes en gulvbelægning af fx.:

- Klinker
- Svømmende trægulv lagt på filtunderlag
- Linoleum eller anden tynd gulvbelægning
- Tæpper

De indstøbte gulvvarmeslanger fastgøres inden støbning til et armeringsnet for at sikre, at slangen placeres korrekt i betondækket. Som gulvvarmeslange benyttes oftest en 20 x 2 mm PEX gulvvarmeslange, som har en indvendig diameter på 16 mm.

På figur 1 er vist hvorledes et snit i et gulv med tung gulvvarme, er opbygget.

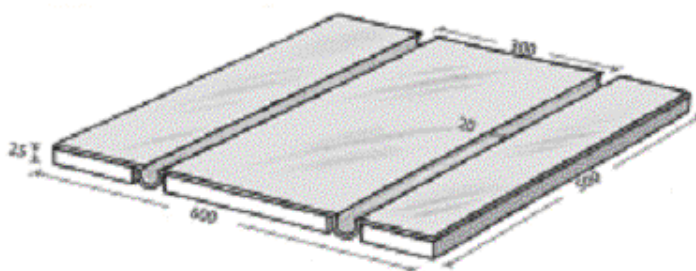


Figur 1 Tungt gulvvarmesystem. Tegning hentet fra www.wirsbo.dk

Som det ses på figur 1, er gulvvarmeslangen indstøbt i betondækket og fastgjort til et armeringsnet. Denne type gulvvarmeanlæg benyttes oftest i nybyggeri.

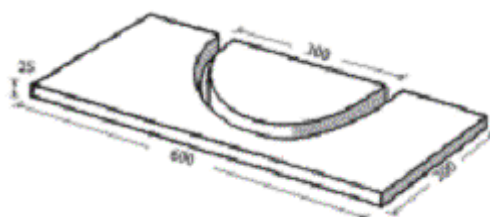
3.4 Let gulvvarme

Det lette gulvvarmesystem er baseret på en varmfordelingsplade, der typisk er af aluminium grundet materialets høje varmeledningsevne. Gulvvarmeslangen anbringes i et spor i varmfordelingspladen, der sikrer en jævn temperaturfordeling. Ligesom den tunge løsning benyttes typisk en 20 x 2 mm PEX gulvvarmeslange. På nedenstående figur 2 er vist et eksempel på en varmfordelingsplade.



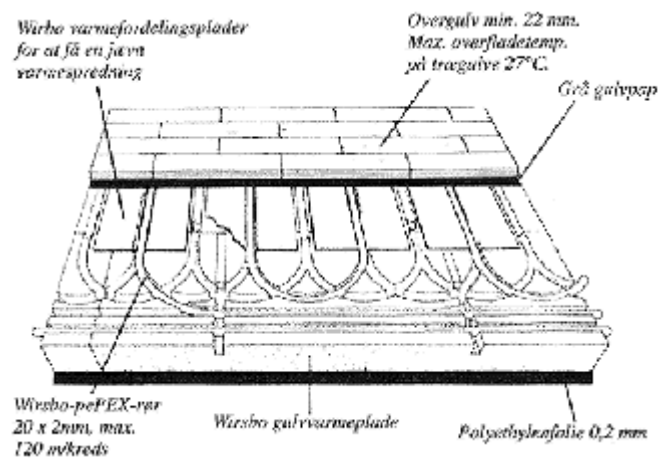
Figur 2 Varmefordelingsplade fra firmaet ThermiSol

I bøjningerne benyttes der ikke en varmfordelingsplade, men blot isoleringsmateriale hvor der er et spor til gulvvarmeslangen. Se figur 3.



Figur 3 Udfyldningssæt til bøjning af gulvvarmeslange fra firmaet ThermiSol

Gulvet afsluttes med et trinlydsdæmpende lag og typisk en gulvbelægning af træ. Samlet set vil et gulv udført med let gulvvarme se ud som angivet på figur 4, hvor det dog er produkter fra firmaet Wirsbo, der benyttes.



Figur 4 Let gulvvarmesystem fra Wirsbo

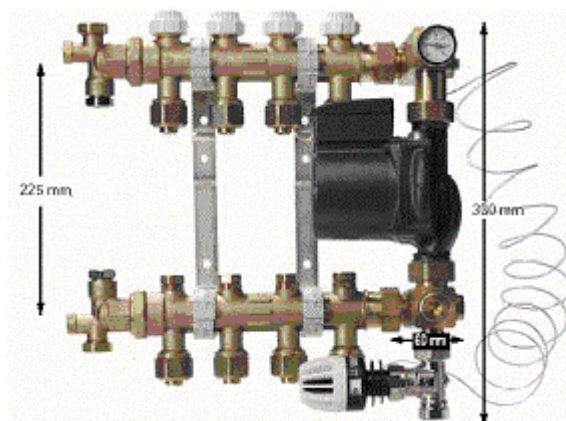
Anvendelsen af lette gulvvarmesystemer er ikke mulig, hvis der som gulvbelægning ønskes klinker, hvorved badeværelser som oftest kan udelukkes.

3.5 Styringsstrategi

En anden vigtig del af et gulvvarmeanlæg er den styringsstrategi, der benyttes til at opnå det ønskede termiske indeklima i rummet. I Danmark benyttes der næsten udelukkende en on/off styring af flowet i gulvvarmeslangen og en fast fremløbstemperatur.

3.6 Shunt/blandesløjfe

Til fordeling af varmt vand til de enkelte gulvvarmekredse, der forsyner rummene med varme, benyttes en shunt/blandesløjfe bestående af fordelerrør, ventiler og pumpeunit. På figur 5 ses et billede af en typisk shunt unit og på figur 6 er vist en principskitse af et shuntsystem (fra firmaet Wirsbo). Samme generelle princip anvendes af andre fabrikanter.

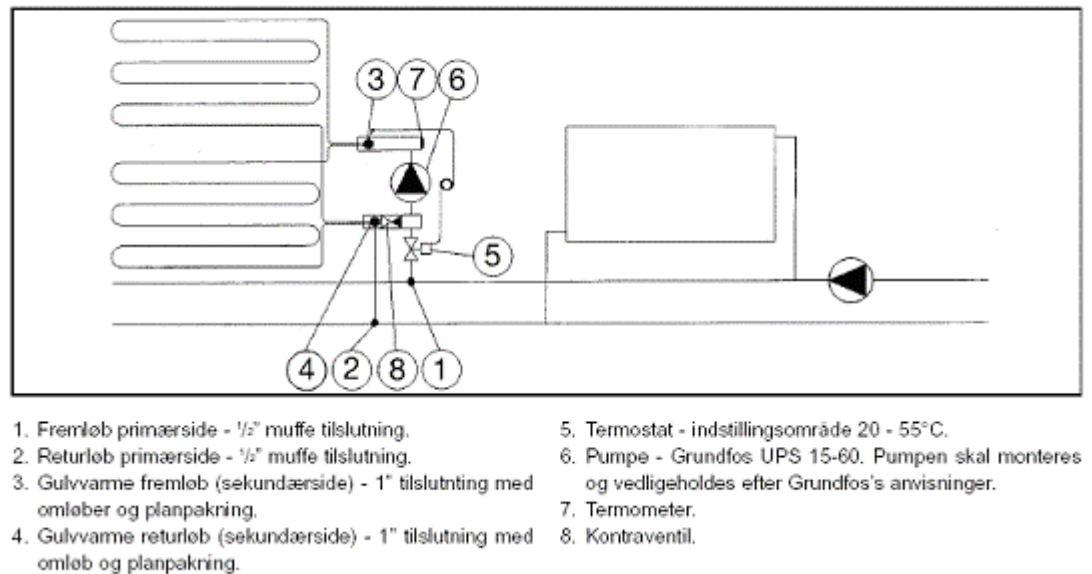


Figur 5 Typisk shunt unit med fordelerrør, ventiler og pumpeunit

Blandesløjffens funktion er at forsyne alle husets varmekredse med kun én pumpe. På fremløbsfordelerrøret til gulvvarmekredsene (det øverste på figur 5) er monteret on/off telestater, der styres (enten trådløst eller via ledning) af rumtermostater i de enkelte rum. Telestatens reaktionstid er typisk 3 til 5 minutter.

Fra fremløbsfordelerrøret ledes gulvvarmevandet gennem de enkelte gulvvarmekredse, hvorefter det returnerer i det nederste fordelerrør på figur 5. Termostatventilen (nederst til højre på figur 5) blander efterfølgende det afkølede returvand fra gulvvarmen med varmt vand fra varmeanlægget til den indstillede fremløbstemperatur, hvorefter vandet atter returnerer til fremløbsfordelerrøret.

Principskema for tilslutning af Wirsbo kompaktshunt.



Figur 6 Shunt/blandesløjfe til gulvvarmekredse (fra Wirsbo)

Denne opbygningen af gulvvarmesystemet giver således kun mulighed for en fast fremløbstemperatur til alle rum.

3.7 Styring On/off

On/Off styringen af gulvvarmeanlægget foregår ved, at der angives en setpunkttemperatur for rummet der opvarmes. Setpunkttemperaturen kan være en lufttemperatur, en operativ temperatur eller en gulvoverfladetemperatur. Der vælges typisk en setpunkttemperatur for luften på 21 °C i rum, der benyttes til ophold, og som oftest lidt varmere i badeværelser, hvor der ønskes varme klinkegulve.

Gulvvarmestyringen giver som oftest mulighed for natsænkning af rumtemperaturen (fx. til 17°C), i et af brugeren indstillet tidsrum.

4 Simuleringsprogrammet FHSim

Med simuleringsprogrammet FHSim (Floor Heating Simulation) er det muligt detaljeret at beregne varmekonsum og termisk indeklima i ét rum opvarmet med et gulvvarmesystem. Programmet benytter input fra det danske vejrdatabasis (DRY). Modellen inkluderer solindfald gennem vinduer og internt varmetilskud. I de forskellige klimaskærmskonstruktioner beregnes varmestrøm, temperaturfordeling samt overfladetemperatur. Klimaskærmskonstruktionerne er modelleret ved hjælp af en Finite Control Volume metode.

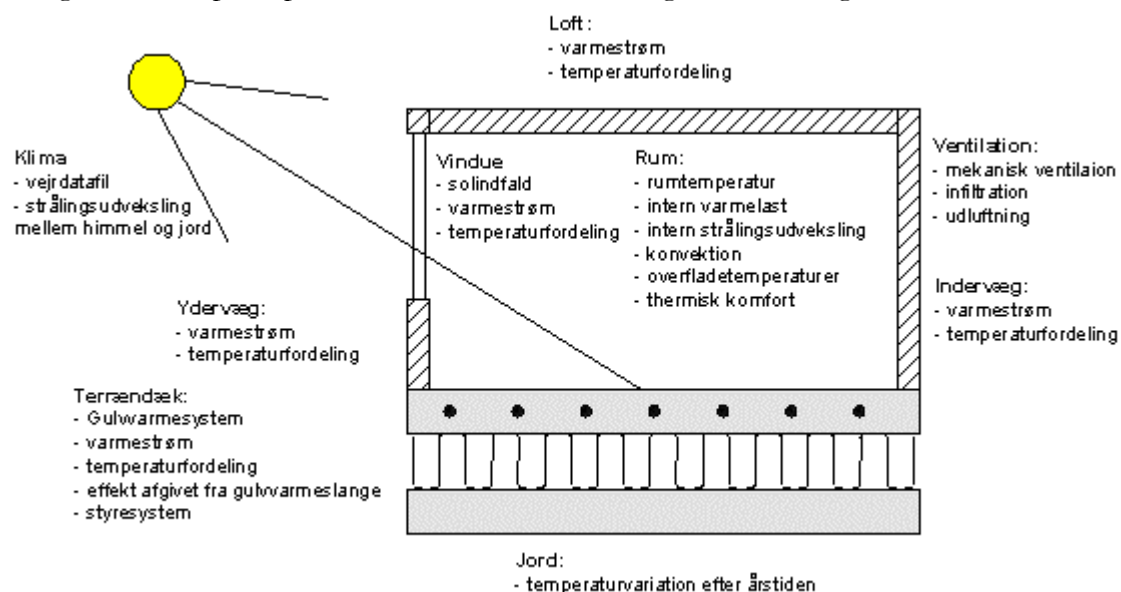
Der regnes desuden detaljeret på strålingsudveksling mellem indvendige overflader i rummet ved brug af vinkelfaktorer. Den indvendige konvektive overgangssolans bestemmes på baggrund af overfladetemperaturen, rumtemperaturen og rumhøjden.

I modellen er der også defineret et ventilationsanlæg evt. med varmegenvinding. Yderligere er der defineret et fast (uønsket) luftskifte ved infiltration.

Det beregnede varmekonsum bestemmes udfra den varmestrøm der afgives fra gulvvarmeslangen gennem hele året og medregner således ikke tab i selve varmeanlægget eller rørtab fra varmeanlægget til selve gulvvarmekredsen.

Der tages i modellen ikke højde for om et givet gulvareal skal dækkes af flere gulvvarmekredse grundet fx. for stort tryktab eller en for stor temperaturforskel mellem ind og udløb. Metoden antager således samme væsketemperatur over hele gulvet.

På figur 7 ses en principskitse af de elementer der indgår i simuleringsmodellen.



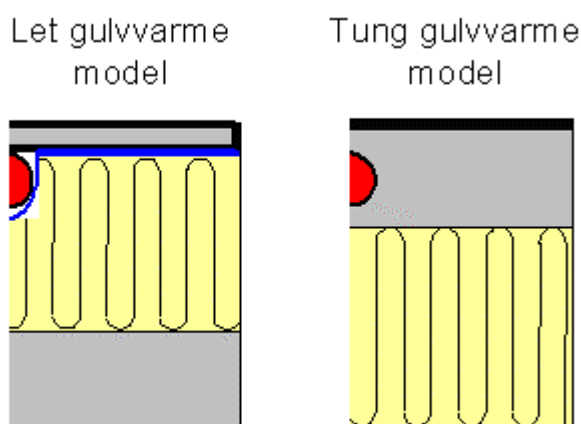
Figur 7 Principskitse af elementerne i simuleringsmodellen

4.1 Gulvvarmemodellerne

Der er i FHSim opbygget tre gulvvarmemodeller:

1. Let gulvvarmemodel (udsnit af gulvkonstruktion)
2. Tung gulvvarmemodel (udsnit af gulvkonstruktion)
3. En tung gulvvarmemodel med fundamentløsning

Gulvvarmemodel 1 og 2 regner detaljeret på varmestrømmene i et lille udsnit af gulvvarmekonstruktionen. De to modeller medregner ikke det ekstra varmetab der haves ved fundamentet (Linietabet). En principskitse af de to modeller ses på figur 8. Model 1 og 2 er brugt til at belyse og sammenligne den termiske dynamik i de to konstruktionstyper (let og tung).

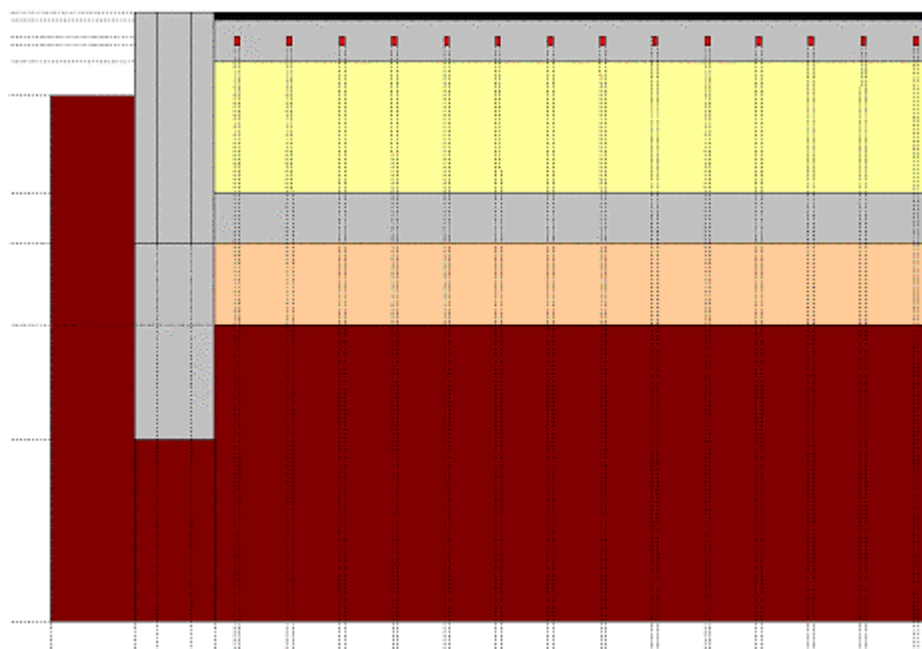


Figur 8 Simuleringsmodel af let og tung gulvvarme

Det antages, at der ikke haves nogen horisontal varmestrøm (adiabat) i et snit vinkelret ned gennem halvdelen af gulvvarmeslangen og midt mellem to gulvvarmeslanger.

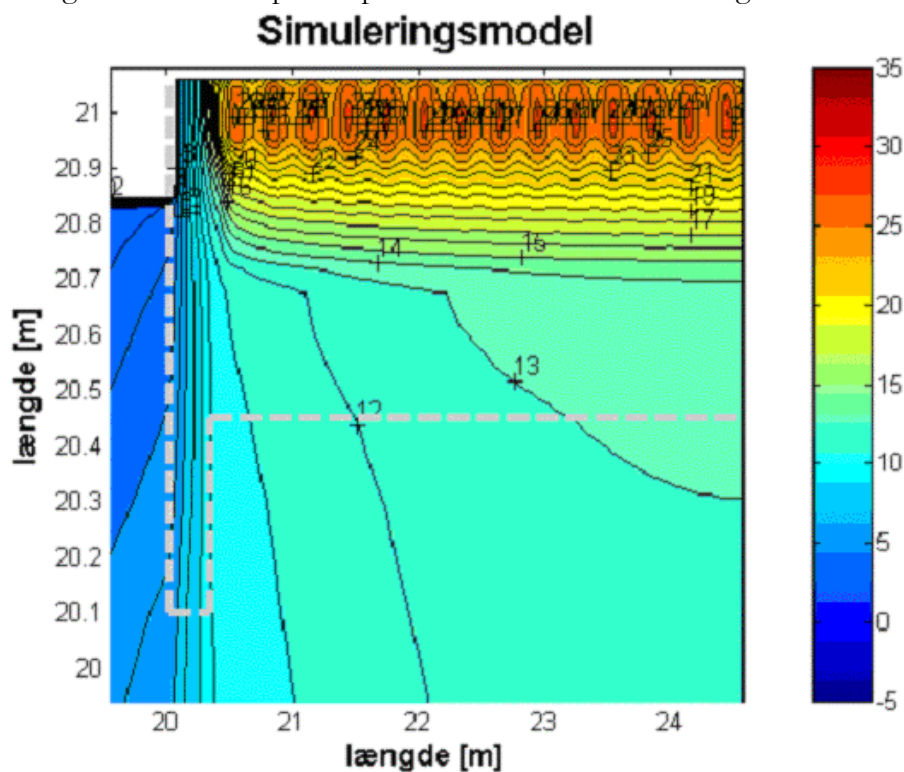
Til opbygningen af gulvvarmemodel 1 kræves kendskab til kontaktresistanserne mellem gulvvarmeslangen og varmfordelingspladen. Ifølge projektansøgningen skulle der i dette projekt, foretages målinger af disse kontaktresistanser, men da disse allerede er blevet målt i /6/, er det valgt i stedet at benytte midlerne til at videreudvikle FHSim med en større model af et tungt gulvvarmesystem.

Model 3 regner på et større udsnit af gulvkonstruktionen med fundamentløsningen, hvorved linietabet inkluderes i det beregnede varmekonsum. Et udklip af model 3 ses på figur 9. Model 3 er opbygget jf. regnereglerne angivet i /3/, hvilket vil sige at modellen inkluderer jordvolumenet 20 m under jordoverfladen og 20 meter udenfor fundamentet samt 4 meter af gulvkonstruktionen. Det er i denne model kun muligt at simulere tunge gulvvarmesystemer. I programmet indtastes de enkelte lags dimensioner og materialeegenskaber. Modellen giver således mulighed for at simulere de fleste terrændækskonstruktioner.



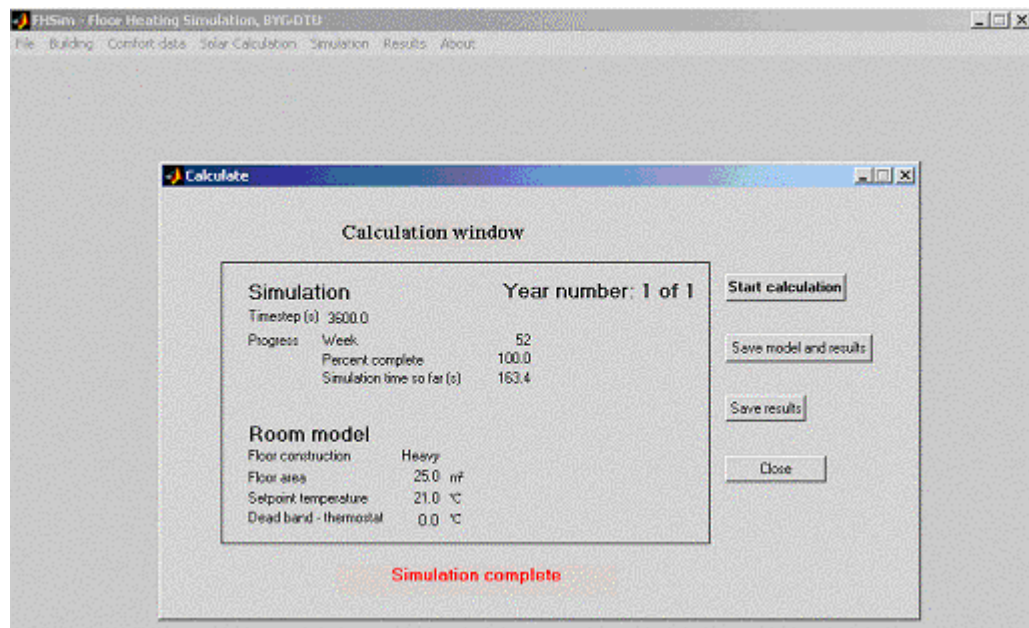
Figur 9 Den opbyggede gulvvarmemodel (model 3) i FHSim (Hele jordvolumenet er ikke medtaget på figuren). Det er i programmet muligt at indtaste dimensioner og materialeegenskaber for de forskellige kontrolvolumener. (Ikke målfast)

Det ses på figur 9 at modellen indeholder 14 gulvvarmeslanger. Ved en typisk centerafstand på 30 cm mellem gulvvarmeslangerne fås en rumdybde på 4,20 meter. På figur 10 ses et temperaturplot fra FHSim af et udsnit af gulvvarmemodellen.



Figur 10 Temperaturplot fra gulvvarmemodel 3 (Hele jordvolumenet er ikke medtaget). Bemærk forskellen i målestok mellem x- og y-retning.

Et eksempel på den grafiske brugerflade, der er opbygget til FHSim, er vist på figur 11.

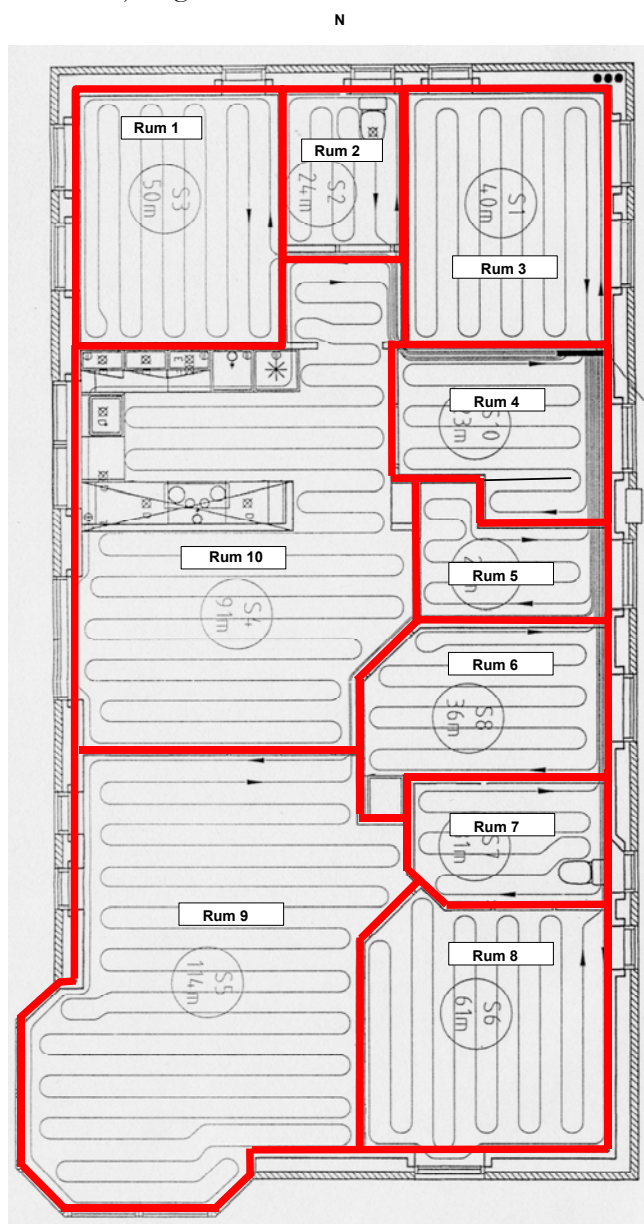


Figur 11 Grafisk brugerflade til FHSim

En validering af gulvmoduliet i FHSim er beskrevet i /4/. Her er simuleringresultaterne sammenlignet med målinger foretaget på et svensk prøvehus med gulvvarme. Resultaterne viser en fin overensstemmelse mellem målte og beregnede størrelser. Den øvrige del af programmet er valideret i /6/.

5 Sammenligning af tung og let gulvvarme

Da et hus består af mange forskellige rumtyper fx. mht. gulvbelægninger, vinduesarealer og ønsket rumtemperatur, er der opbygget en række modeller af rummene i et repræsentativt typehus. Typehuset ses på figur 12 og i tabel 1 ses de vigtigste input til simuleringen. Klimaskærmskonstruktionerne er opbygget jf. /7/, der detaljeret beskriver opbygningen af disse. U-værdierne fremgår ligeledes af tabel 1. Fremløbstemperaturen er valgt til 45°C og ventilationen med varmgenvinding ($\eta=0,9$) og infiltrationen er simuleret til at være hhv. $0,5 \text{ h}^{-1}$ og $0,1 \text{ h}^{-1}$. Gulvkonstruktionen er som udgangspunkt tung og med gulvbelægning af enten træ (parketgulv) eller klinker. Gulvkonstruktionen er således opbygget med gulvvarme-model 2, jf. figur 8.



Figur 12 Simuleret typehus (fra Bülow & Nielsen)

Tabel 1: Input til simulering

Rum nr.	Beskrivelse	Areal [m²]	T _{set} [°C]
1	Værelse	10,0	21
2	Badeværelse	3,5	23
3	Værelse	10,0	21
4	Bryggers	6,6	18
5	Entré	4,2	18
6	Værelse	7,4	21
7	Badeværelse	4,2	23
8	Soveværelse	11,7	18
9	Stue	26,4	21
10	Køkken/alrum	24,1	21

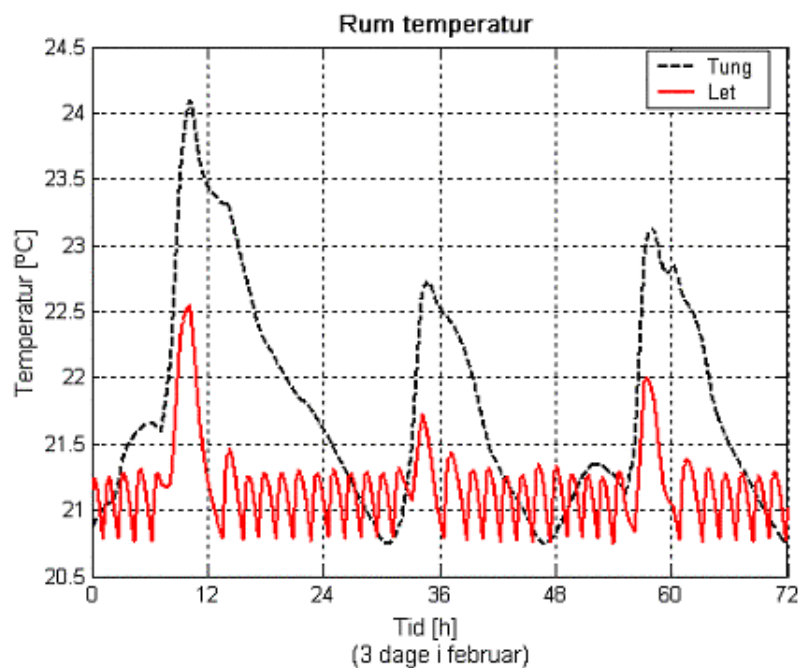
Rum nr.	Vinduesareal [m²]	Gulvbelægning
1	3,09	Parket
2	0,74	Klinker
3	3,09	Parket
4	2,13	Klinker
5	2,13	Klinker
6	1,17	Parket
7	0,74	Klinker
8	2,87	Parket
9	13,42	Parket
10	5,81	Klinker

U-værdier [W/m²K]	
Ydervæg	0,18
Tag	0,11
Terrændæk	0,13
Vinduer	1,70

Med samme isoleringstykkelse i terrændækket er efterfølgende opbygget en model af en let gulvkonstruktion (model 1 jf. figur 8). Ved at benytte samme input (yder-vægge, vinduer, tag og luftskifte mm.) for resten af rummet kan gulvkonstruktionens betydning for varmekonsum og indeklima vurderes.

Da modellen ikke medregner linielabet ved fundamentet er der i stedet beregnet en fiktiv jordtemperatur. Beregningsproceduren til bestemmelse af denne fiktive jordtemperatur er vist i appendiks 1.

På figur 13 ses en sammenligning af rumtemperaturen i rum 3 jf. figur 12 (værelse på 10 m² med parketgulv), ved brug af let og tung gulvvarme. Værelset har et vinduesareal på 3,1 m² orienteret mod øst.



Figur 13 Sammenligning af let og tung gulvvarme i et rum på 10 m² med vinduer orienteret mod nord og øst. Fremløbstemperatur 45°C.

Som det ses på figur 13 stiger rumtemperaturen i begge modeller om dagen grundet stigende udetemperatur og solindfald gennem vinduer. Det ses dog at rumtemperaturen ved brug af det tunge gulvvarmesystem stiger 1 til 2 grader mere i det viste eksempel. Dette kan forklares ved forskellen i den termiske masse i de to systemer. Selvom styringen af det tunge gulvvarmesystem stopper væskecirkulationen, så vil gulvkonstruktionen fortsat afgive varme, hvilket således ikke giver en optimal drift både mht. til varmekonsum og indeklima. Forskellen i det beregnede varmekonsum for dette værelse er ca. 3 kWh/m² pr. år.

I tabel 2 ses en sammenligning af varmekonsumet for alle husets rum under antagelse af, at rum med parketgulve kan udføres som enten tung eller let gulvvarme. Resultaterne er desuden sammenlignet med en simulering, hvor der antages et ideelt varmeanlæg, hvilket vil sige, at der lige netop tilføres så meget varme til det enkelte rum, at den ønskede rumtemperatur opretholdes. Bortset fra gulvkonstruktion er der benyttet samme klimaskærmskonstruktioner. Da der ikke benyttes

gulvvarme (ved ideel opvarmning) er gulvkonstruktionen opbygget svarende til U-værdi-kravet i /5/ for terrændæk uden gulvvarme ($0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Tabel 2: Simuleret varmeforbrug i typehus

				Varmeforbrug [kWh/m ²]		
Rum nr.	Beskrivelse	Areal [m ²]	T _{set} [°C]	Gulvvarme tung	Gulvvarme let	Ideel opvarmning
1	Værelse	10,0	21	84	81	71
2	Badeværelse	3,5	23	93	-	83
3	Værelse	10,0	21	80	76	66
4	Bryggers	6,6	18	46	-	40
5	Entré	4,2	18	53	-	45
6	Værelse	7,4	21	52	49	44
7	Badeværelse	4,2	23	61	-	55
8	Soveværelse	11,7	18	36	34	27
9	Stue	26,4	21	69	59	42
10	Køkken/alrum	24,1	21	42	-	37
I alt				59	55	46

Som det ses af tabel 2, reduceres varmemforbruget for alle rum ved anvendelse af let gulvvarme. Specielt ses at varmemforbruget for stuen (rum 9) reduceres med ca. 15 %. Forklaringen på den store reduktion af varmemforbruget i stuen er, at det store vinduesparti mod syd/vest giver anledning til en dårlig styring af gulvvarmen. Om natten haves et stort varmetab gennem vinduerne og om dagen vil solindfaldets variation gøre det svært at holde en konstant rumtemperatur.

Hele husets varmekonsum reduceres med 5 - 6 % ved at benytte let gulvvarme i rum med parketgulve, men som det ses af resultatet ved ideel opvarmning, er der endnu et stort unødvendigt energiforbrug. I tabel 3 ses en beregning af middeltemperaturerne for fyringssæsonen i de forskellige rum.

Tabel 3: Beregnet middeldrumtemperatur i fyringssæsonen (24. september til 13. maj)

Rum nr.	Beskrivelse	Areal [m ²]	T _{set} [°C]	Middel rumtemperatur [°C]		
				Gulvvarme tung	Gulvvarme let/tung	Ideel opvarmning
1	Værelse	10,0	21	22,0	21,5	21,2
2	Badeværelse	3,5	23	23,3	-	23,0
3	Værelse	10,0	21	22,1	21,7	21,4
4	Bryggers	6,6	18	19,8	-	19,2
5	Entré	4,2	18	20,1	-	19,5
6	Værelse	7,4	21	22,0	21,6	21,3
7	Badeværelse	4,2	23	23,5	-	23,1
8	Soveværelse	11,7	18	20,5	20,2	19,7
9	Stue	26,4	21	23,0	22,6	22,3
10	Køkken/alrum	24,1	21	22,2	-	21,6

Som det ses af tabel 3 reduceres middeltermperaturen i de rum, der i stedet for tung gulvvarme, udføres med let gulvvarme. Sammenlignes med det ideelle opvarmningssystem ses, at forskellen i rumtemperatur kan være op til 0,7 °C højere ved tung gulvvarme og 0,5°C ved let gulvvarme, hvilket indikerer at styringen af gulvvarmesystemet ikke er perfekt selv ved brug af let gulvvarme.

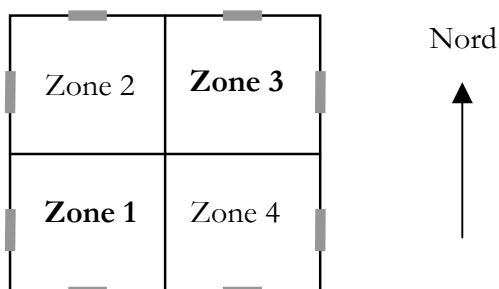
Desuden skal bemærkes, at de i denne sammenhæng benyttede gulvvarmemodeler (for let og tung gulvkonstruktion) medregner linietabet ved fundamentet ved brug af en fiktiv jordtemperatur, der er antages ens for begge konstruktionstyper. Det vurderes at et terrændæk med tung gulvvarme generelt vil have et større linietab end et terrændæk med let gulvvarme. Derved vil forskellen i varmekonsumet mellem tung og let gulvvarme sandsynligvis være større end de beregnede 5 - 6 %.

Af /7/ fremgår det, at det simulerede typehus's klimaskærmskonstruktioner og varme- og ventilationsanlæg er optimeret således, at husets varmebehov reduceres til 67 % af energirammekravet i BR95. Typehusets energiramme (inkl. tillæg) er i /7/ bestemt til 95 kWh/m², hvorved varmebehovet reduceres til:
 $0,67 \cdot 95 \text{ kWh/m}^2 = 63 \text{ kWh/m}^2$. Simuleringerne af typehuset viser således at det skulle være muligt at opfylde målsætningen om et varmekonsum på 67 % af energirammen angivet BR95, hvilket også er eftervist i /7/ ved en tsbi3 simulering. Opvarmningsbehovet blev her bestemt til 58 kWh/m² svarende til de 59 kWh/m² pr. år angivet i tabel 2.

6 Beskrivelse af referencemodel

Som tidligere beskrevet er der til FHSim opbygget en stor model af en tung gulvkonstruktion med fundament (Se figur 9 side 11). Denne model vil i det efterfølgende blive brugt til at undersøge forskellige parametres betydning for gulvvarmesystemet mht. til varmekonsum og indeklima.

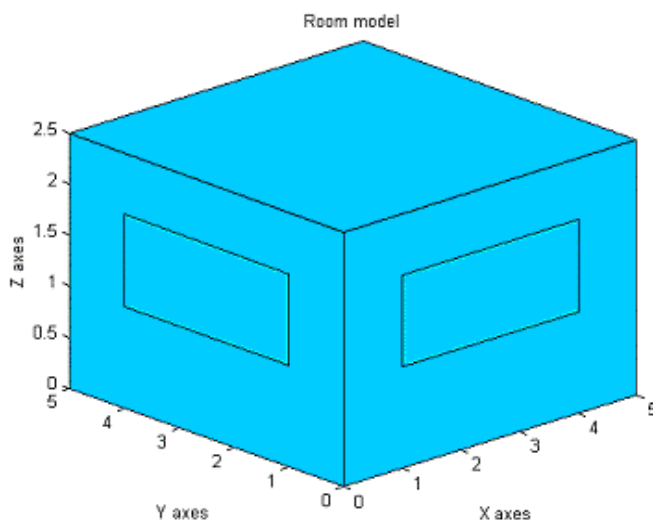
Til dette ønskes en simpel simuleringsmodel af et repræsentativt rum med gulvvarme. Der tages således udgangspunkt i et hus på 144 m², der tænkes inddelt i fire zoner af 36 m² (6 m · 6 m), som vist på figur 14. Der ses bort fra om der skal benyttes en eller to gulvvarmekredse til at dække varmekonsumet i et rum.



Figur 14 Principskitse af model . Zonerne simuleres enkeltvis.

Simuleringer foretaget med to af de på figur 14 viste rummodeller orienteret mod syd/vest (Zone 1) og syd/øst (Zone 4) gav kun mindre forskelle i det beregnede varmekonsum. Tilsvarende små afvigelser blev fundet for zonerne orienteret mod nord/vest og nord/øst. Det er derfor valgt i det videre arbejde yderligere at simplificere simuleringerne til kun at omfatte zonerne orienteret mod syd/vest og nord/øst (Zone 1 og Zone 3 på figur 14).

Rummodellen består således af to ydervægskonstruktioner og to skillevægskonstruktioner. Der antages ikke at være nogen varmestrøm gennem de to skillevægskonstruktioner. I hver af de to ydervægskonstruktioner er placeret et vindue med et areal på 4 m² (svarende til ca. 22 % vinduesareal).



Figur 15 Simuleringsmodel fra FHSim. Figuren viser de to ydervægge med vinduer.

Referencemodellens varmeforbrug (i kWh/m²) findes efterfølgende som middelværdien af det simulerede varmeforbrug i de to zoner (1 og 3). Det beregnede varmeforbrug kan dog ikke direkte sammenlignes med målte varmeforbrug, idet metoden ikke tager højde for at der i fx. badeværelser vil være et væsentligt større varmeforbrug pr. m² grundet en højere rumtemperatur og et større luftskifte. Varmeforbruget i badeværelser er derfor undersøgt separat i kapitel 13. Ligeledes tages der ikke højde for varmeanlæggets effektivitet.

6.1 Simuleringsrutine

I det følgende beskrives den simuleringsrutine der er benyttet. Programmet starter med at foretage en simulering til bestemmelse af linietafskoefficienten for fundamentsamlingen. Simuleringen foretages jf. beregningsreglerne beskrevet i /3/, dog stoppes linietafsimuleringen af hensyn til beregningstiden, hvis ændringen i Ψ -værdien er mindre end 0,01 W/mK mellem to årssimuleringer.

Herefter fortsætter programmet med en dynamisk årssimulering af varmeforbruget ved brug af det danske referencevejrdataår DRY. Temperaturprofilen i jordvolumenet og konstruktionerne fundet ved linietafsimuleringen benyttes igen, hvorved der haves et godt startgæt til den dynamiske simulering.

Varmestrømmene gennem den 2-dimensionelle terrændækskonstruktion (med fundament), ydervægskonstruktionen, vinduer (inkl. solindfald), ventilationstab og internt varmetilskud bestemmes time for time.

Da modellen i princippet består af to ydervægsfundamenter (og beregningen kun medtager det ene) er det valgt efterfølgende at korrigere det samlede beregnede varmeforbrug. Korrektionens størrelse beregnes ved at bruge den af programmet beregnede linietafsværdi for fundamentet. Efterfølgende bestemmes det årlige varmetab ved brug af referenceårets data for udetemperaturen. Korrektionen beregnes på følgende måde:

$$\Phi_{t,korr} = \frac{\Psi_f \cdot l_f \cdot (\theta_i - \theta_e)}{1000 \cdot A_t}$$

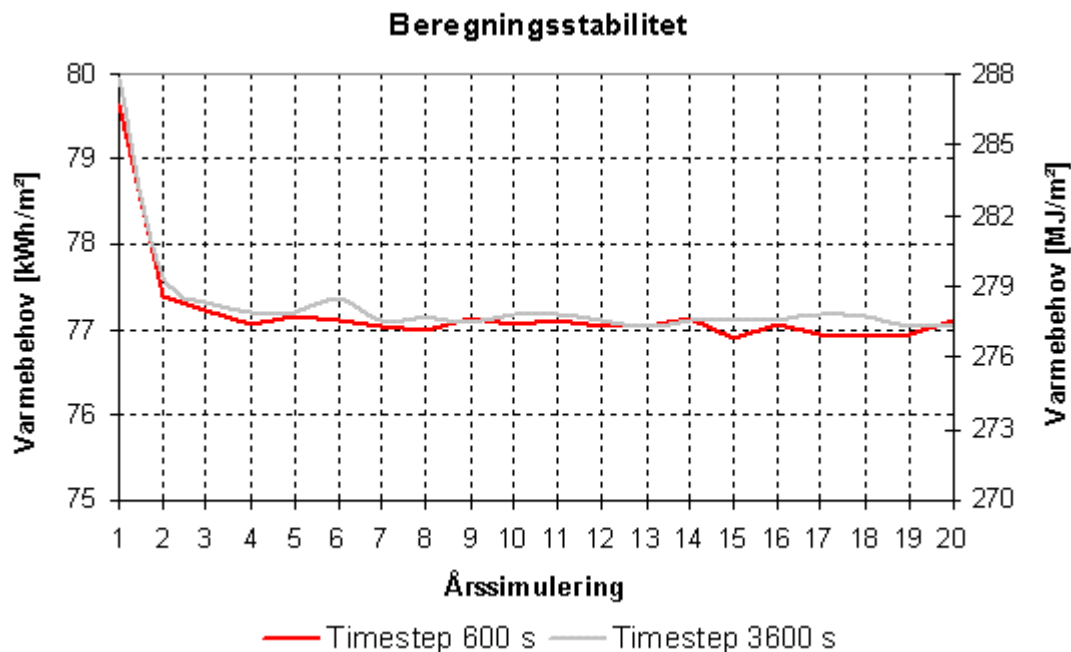
hvor

$\Phi_{t,korr}$	Transmissionstab	[kWh/m ² pr. år]
Ψ_f	linietafsværdi	[W/mK]
l_f	ydre længde af fundament	[m]
θ_i	Indetemperatur i rum	[K]
θ_e	Udetemperatur	[K]
A_t	Gulvareal	[m ²]

Korrektionen for linietafet beregnes for fyringssæsonen (24. september til 13. maj) Afhængigt af linietafsværdien ligger korrektionen af varmeforbruget typisk mellem 2 og 7 kWh/m².

6.2 Tidsskridt

Der er foretaget en indledende undersøgelse af betydningen af tidsskridtes størrelse samt hvor mange årssimuleringer, det er nødvendigt at foretage. På figur 16 ses en 20 årssimulering, hvor der er benyttet et tidsskridt på hhv. 600 sekunder og 3600 sekunder (Bemærk at der er zoomet på y-aksen).



Figur 16 Varmeforbruget for zone 3 (jf. Figur 14) simuleret for en periode på 20 år. Bemærk at der er zoomet på y-akserne.

Da forskellen mellem resultaterne for et tidsskridt på hhv. 600 s og 3600 sekunder ses at være minimal og at resultatet efter 5 års simuleringer ikke ændres nævneværdigt, er det til de følgende parametervariationer valgt at bruge et tidsskridt på 3600 sekunder og resultatet fundet ved den 5. årssimulering.

6.3 Ventilation

Luftskiftet ved ventilation og infiltration er i simuleringerne sat til hhv. $0,5 \text{ h}^{-1}$ og $0,1 \text{ h}^{-1}$. Hvis der i simuleringerne benyttes ventilation med varmegenvinding varmegenvindingsaggregatets effektivitet antaget at være 0,9.

Det kan diskuteres, hvordan luftskiftet bedst modelleres når indetemperaturen om sommeren bliver for høj og der i praksis åbnes for vinduer og døre, men da der fokuseres på varmekonsumet er det af mindre betydning i denne sammenhæng. Det er valgt at benytte følgende simple simuleringsrutine: Når indetemperaturen kommer over 25°C øges ventilation indtil temperaturen atter kommer under 25°C . Dog er det valgt at luftskiftet maks. kan have en værdi på 4 h^{-1} af hensyn til trækgener. I nogle tilfælde kan temperaturen dog stadig ikke holdes på 25°C .

6.4 Klimaskærmskonstruktioner

I oplægget til Bygningsreglementet 2005 /5/ er U-værdi-kravene angivet for:

1. En simpel eftervisning af de enkelte konstruktioners U-værdi
2. Eftervisning af varmetabsramme eller energiramme

I arbejdsfasen med at revidere bygningsreglement er det foreslået at boligernes varmekonsum reduceres med 33 % i forhold til BR95 (280 MJ/m²). Den del af energirammen der dækker varmekonsum bliver således 187 MJ/m² svarende til 52 kWh/m².

I tabel 4 er vist de i denne sammenhæng interessante U-værdi-krav og linietabsværdi-krav fra BR05.

Tabel 4 Uddrag af oplægget til det kommende bygningsreglement BR 2005 vedr. U-værdi-krav og Ψ -værdi-krav for en række udvalgte konstruktioner.

BR 2005	Simpel eftervisning	Eftervisning af varmetabs-/ energiramme	
Ydervæg	0,18	0,30	W/m ² K
Terrændæk m. gulvvarme	0,12	0,20	W/m ² K
Loft/Tag	0,12	0,25	W/m ² K
Vinduer	1,50	2,90	W/m ² K
Linietab ved ydervægsfundamenter m. gulvvarme	0,12	0,30	W/mK

Det er i det efterfølgende valgt at benytte konstruktioner med U-værdier svarende til kravet for den simple eftervisning jf. tabel 4.

FHsim kræver en detaljeret indtastning af vindueskomponenternes data. I tabel 5 er vist de i modellen indtastede data.

Tabel 5 Benyttede data for vindueskomponenter i FHsim

Vinduesdata	U-værdi/ Ψ -værdi	Areal/længde
	[W/m ² K] / [W/mK]	[m ²] / [m]
Rude	1,28	3,2
Ramme/karm	1,60	0,8
Linietab	0,06	10,0
Samlet vindue	1,49	4,0

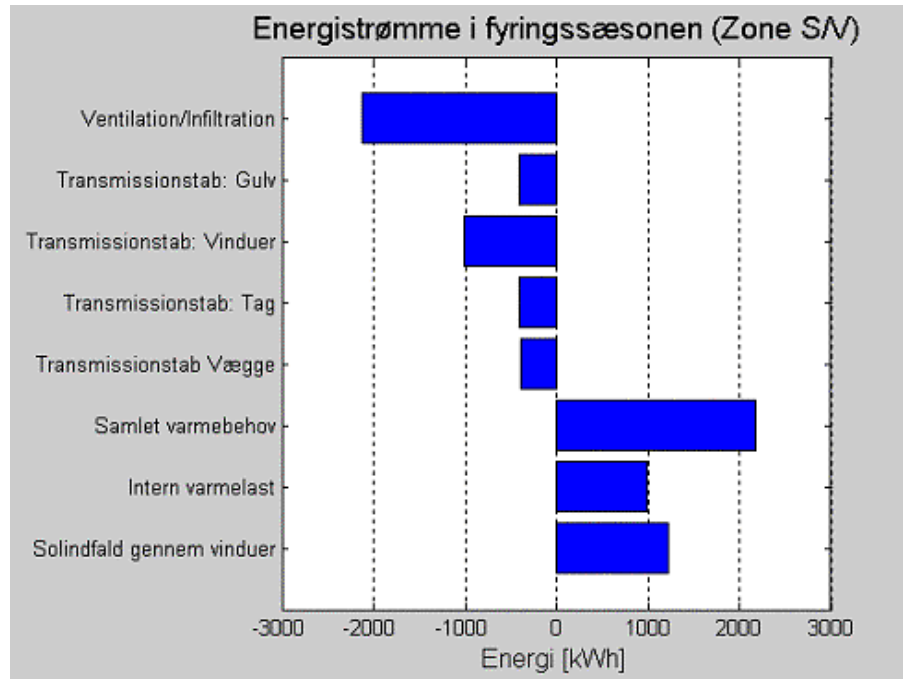
I FHsim findes desuden data for forskellige ruders g-værdier som funktion af solstrålingens indfaldsvinklen. Det er til referencemodellen valgt at benytte et datasæt svarende til en 2-lags lavenergirude med blød lav-emissions belægning.

6.5 Generelle inputdata

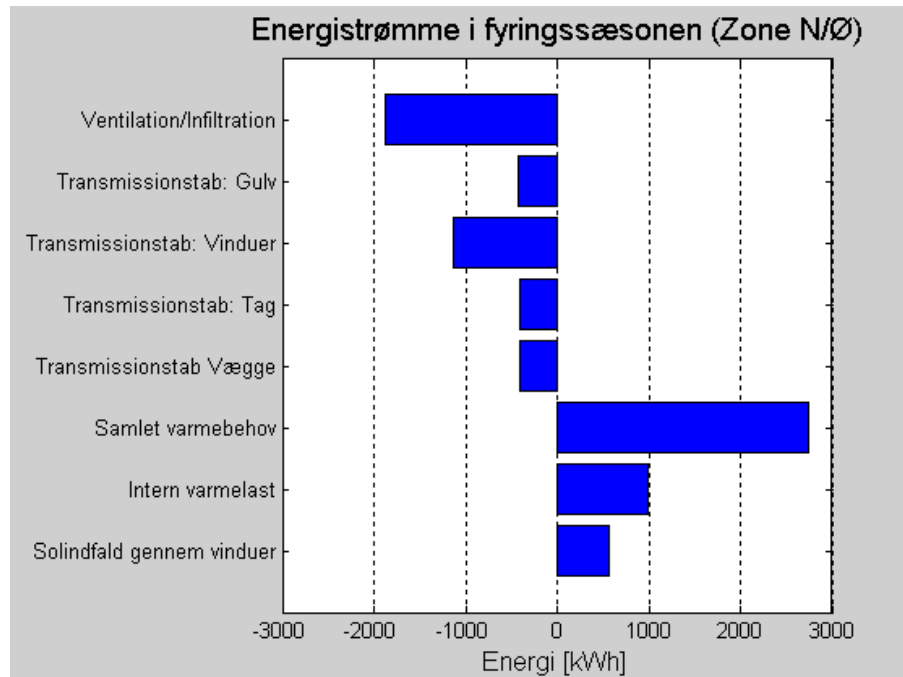
Setpunkttemperaturen til gulvvarmen er i beregningerne sat til 21°C med en start/stop differens på 0,2°C. Desuden benyttes generelt ved simuleringerne en fremløbstemperatur til gulvvarmen på 40°C. I kapitel 9 er fremløbstemperaturens betydning dog specielt undersøgt.

6.6 Simulering med referencemodel

På figur 17 og figur 18 ses størrelserne på de forskellige energistrømme summeret over fyringssæsonen (24. september til 13. maj) for hhv. zone 1 (syd/vest) og zone 3 (nord/øst) jf. figur 14. Klimaskærmskonstruktionerne er opbygget med U-værdier svarende til værdierne angivet i tabel 4. Ventilationen er i eksemplet simuleret uden varmgenvinding.



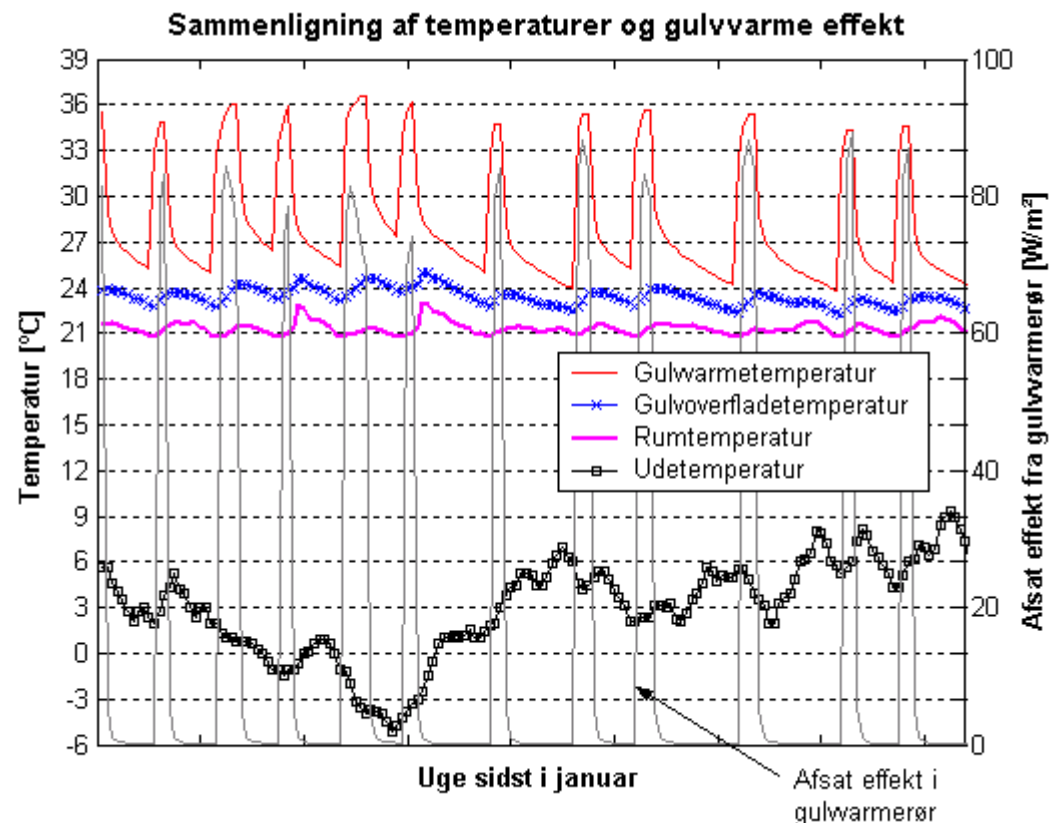
Figur 17 Varmestrømmenes størrelser summeret over fyringssæsonen for zone 1 (Syd/Vest). Simuleringen er foretaget med U-værdier svarende til kravene angivet i tabel 4



Figur 18 Varmestrømmenes størrelser summeret over fyringssæsonen for zone 3 (nord/øst). Simuleringen er foretaget med U-værdier svarende til kravene angivet i tabel 4

Som det ses af figur 17 og figur 18 er ventilationstabet en stor post i det samlede varmeforbrug. Det vil derfor være af stor betydning om ventilationen udføres med eller uden varmgenvinding.

På figur 19 ses et typisk temperaturforløb af gulvvarmetemperaturen (middelvæsketemperatur), temperatur på gulvoverfladen, rumtemperaturen, udetemperaturen og effekt afsat i gulvvarmen. Resultaterne er vist for den nord/øst orienterede zone ved en fremløbstemperatur på 40°C til gulvvarmen og ventilation uden brug af varmegenvinding. Gulvbelægning er simuleret til at være et træ parketgulv.



Figur 19 Typisk temperaturforløb af gulvvarmetemperatur, gulvoverfladetemperatur, rumtemperatur, udetemperatur samt afsat effekt i gulvvarmerørene pr. m² gulvareal. Simuleret med den nord/øst orienterede zone med ventilation uden varmegenvinding og en fremløbstemperatur til gulvvarmen på 40°C.

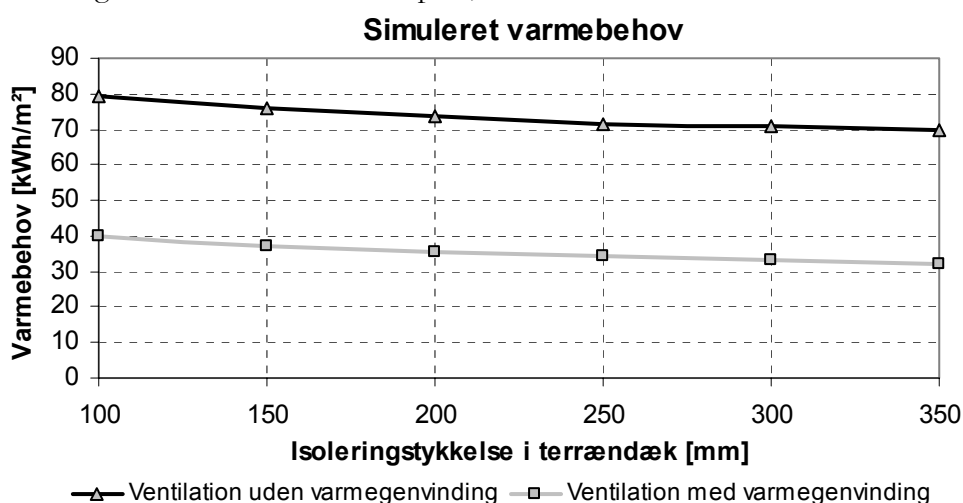
Som det ses på figur 19 tænder og slukker gulvvarmen typisk kortvarigt en til to gange i døgnet afhængigt af udetemperaturen. Desuden ses at rumtemperaturen først topper efter at gulvvarmesystemet er stoppet.

7 Isoleringsniveau

I det følgende analyseres isoleringsniveauets betydning for varmekonsumet og indetemperaturen.

7.1 Isoleringstykkelse

På figur 20 ses resultaterne ved simulering af modellen med forskellige isoleringstykkelser i terrændækskonstruktionen. Fundamentløsningen er modelleret til at have et linietaf på ca. 0,11 W/mK (denne påvirkes dog i mindre grad også af isoleringstykkelsen i terrændækket, hvilket der ses bort fra her). Beregningerne er foretaget med og uden varmegenvinding på ventilationen. Varmegenvindingsaggregatet antages at have en effektivitet på 0,9.

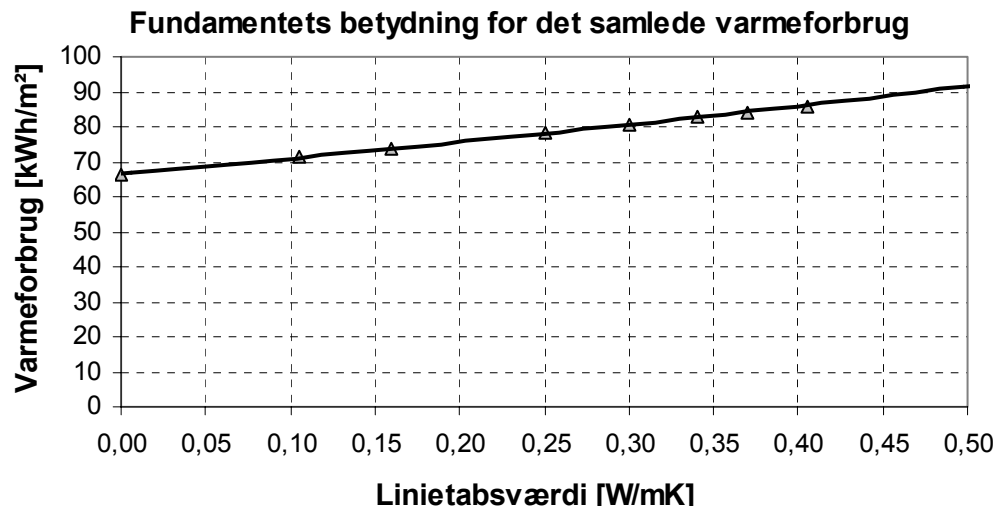


Figur 20 Simuleret årligt varmekonsum ved stigende isoleringstykkelse i terrændækket. Alle simuleringerne er foretaget med et 200 mm kapillarbrydende lag i terrændækket med en varmeledningsevne på 0,7 W/mK (stenlag jf. /3/). Beregningerne er foretaget med og uden varmegenvinding på ventilationsluften. Varmegenvindingsaggregatet antages at have en effektivitet på 0,9.

På baggrund af ovenstående resultater anbefales det at terrændækket udføres med en U-værdi på maksimalt 0,12 W/m²K jf. BR2005. (Fx. ved en isoleringstykkelse i terrændækket på 250 mm og et 200 mm kapillarbrydende lag af singels).

8 Linietaf ved fundamentet

Da gulvvarmen bevirker at temperaturen i terrændækket er højere end ved normal radiatoropvarmning, har samlingen mellem terrændæk og fundament en større betydning for varmetabet. På figur 21 ses varmekonsumet som funktion af udformning af fundamentsløsningen/linietafsværdien.

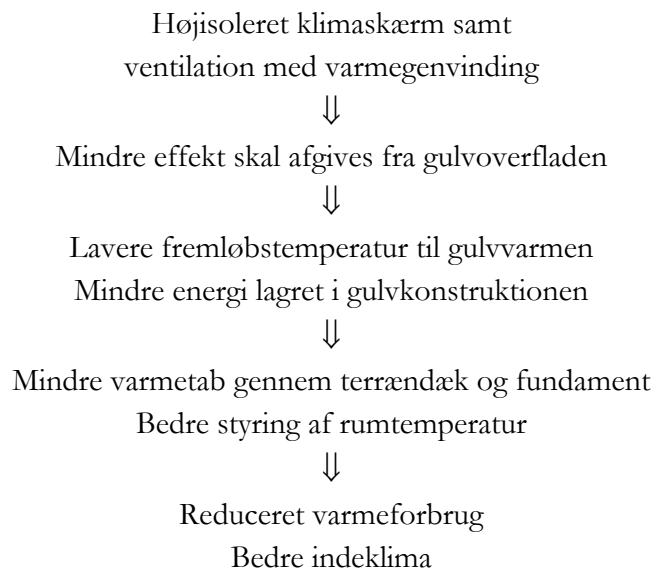


Figur 21 Simulering af varmekonsumet som funktion af linietabet ved fundamentet. (Ventilation uden varmegenvinding).

Det ses at der er en næsten lineær sammenhæng mellem linietabsværdien for fundamentet og det samlede varmekonsum. Det anbefales at bygningsreglementets krav for linietabsværdien ved fundamentet på 0,12 W/mK (med gulvvarme) overholdes, idet varmekonsumet ses at stige markant med stigende linietabsværdi.

9 Styling af gulvvarmetemperaturen

Styringen af gulvvarmesystemet skal sikre at den ønskede setpunkttemperatur opretholdes i hele fyringssæsonen og i alle rum. Den store termiske masse i gulvkonstruktionen samt et varierende solindfald og udetemperatur stiller derfor store krav til en optimal styling af gulvvarmetemperaturen. For at opfylde kravene til indeklimaet og et lavt varmekonsum foreslås følgende metode:



9.1 Konstant fremløbstemperatur

Der er foretaget fire simuleringer, hvor fremløbstemperaturen er varieret fra 30°C til 45°C. De øvrige klimaskærmskonstruktioner er simuleret med U-værdier svarende til kravene, jf. tabel 4 (simpel eftervisning). Simuleringerne er desuden foretaget med ventilation med og uden varmegenvinding for at se effekten af denne.

For at kunne sammenligne resultaterne er det valgt at beregne et gradtimetal over og under setpunkttemperaturen (21°C). Gradtimetallet er kun beregnet for fyringssæsonen (24. september til 13. maj). Resultaterne fra simuleringerne er angivet i tabel 6 og tabel 7

Tabel 6: Simuleringsresultater ved forskellige fremløbstemperaturer til gulvvarmesystemet. (Ventilation uden varmegenvinding)

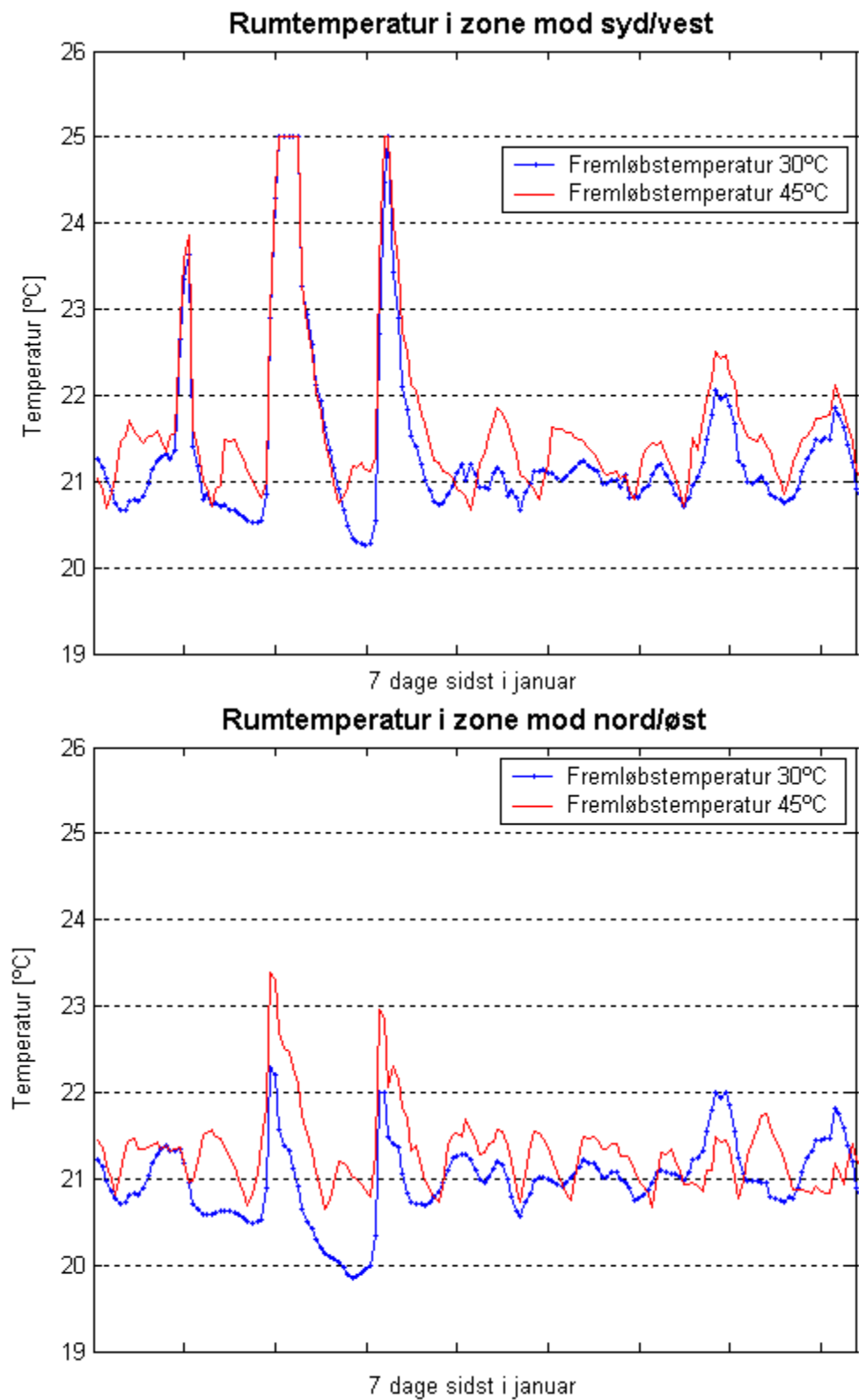
Fremløbs- temperatur	Varmeforbrug [kWh/m²]	Zone 1 (Syd/Vest)		Zone 3 (Nord/Øst)	
		Gradtimer over 21°C	Gradtimer under 21°C	Gradtimer over 21°C	Gradtimer under 21°C
30°C	67	5715	1030	3370	1483
35°C	70	6434	311	4190	368
40°C	71	6756	158	4582	189
45°C	72	7056	112	5022	135

Tabel 7: Simuleringsresultater ved forskellige fremløbstemperaturer til gulvvarmesystemet. (Ventilation uden varmegenvinding)

Fremløbs- temperatur [°C]	Varmeforbrug [kWh/m²]	Zone 1 (Syd/Vest)		Zone 3 (Nord/Øst)	
		Timer med temperatur over 25°C	Timer med temperatur under 20°C	Timer med temperatur over 25°C	Timer med temperatur under 20°C
30	67	1024	274	627	425
35	70	1052	30	639	27
40	71	1048	0	641	2
45	72	1059	0	668	0

Sammenlignes en fremløbstemperatur på 30°C og 45°C ses en reduktion i varmeforbruget på ca. 6 %, men antallet af timer med rumtemperaturer under 20°C stiger dog markant og er muligvis ikke acceptabelt.

Som det ses af figur 22 bliver rumtemperaturen ofte højere end ønsket ved en fremløbstemperatur på 45°C, men omvendt medfører en fremløbstemperatur på 30°C også risiko for at rumtemperaturen i kortere perioder bliver lavere end ønsket. Årsagen til rumtemperaturstigningen skyldes et stort solindfald de første par dag.



Figur 22 Rumtemperaturen ved en fremløbstemperatur på 30°C og 45°C sidst i januar måned. Øverst ses den syd/vest orienterede zone og nederst ses den nord/øst orienterede zone.

I tabel 8 og tabel 9 ses resultaterne fra tilsvarende simuleringer, men med antagelse af et ventilationsanlæg med varmegenvinding (effektivitet på 0,9). Det ses at varmekonsumet ca. halveres og at problemet med rumtemperatur under 20 °C næsten ikke forekommer selv i den nord/øst orienterede zone.

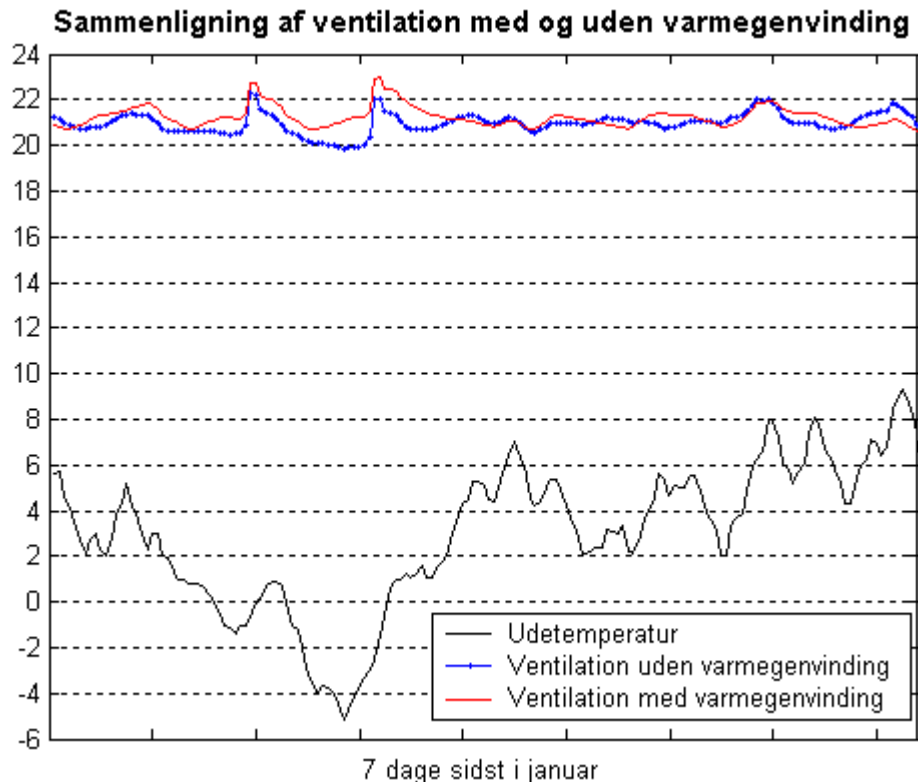
Tabel 8 Simuleringsresultater ved forskellige fremløbstemperaturer til gulvvarmesystemet. (Ventilation med varmegenvinding)

Fremløbs- temperatur	Energiforbrug [kWh/m²]	Zone 1 (Syd/Vest)		Zone 3 (Nord/Øst)	
		Gradtimer over 21°C	Gradtimer under 21°C	Gradtimer over 21°C	Gradtimer under 21°C
30°C	33	8848	131	5436	191
35°C	33	9928	76	5963	110
40°C	34	9550	53	6470	73
45°C	34	9640	52	6648	72

Tabel 9 Simuleringsresultater ved forskellige fremløbstemperaturer til gulvvarmesystemet. (Ventilation med varmegenvinding)

Fremløbs- temperatur [°C]	Varmeforbrug [kWh/m²]	Zone 1 (Syd/Vest)		Zone 3 (Nord/Øst)	
		Timer med temperatur over 25°C	Timer med temperatur under 20°C	Timer med temperatur over 25°C	Timer med temperatur under 20°C
30	33	1039	0	641	2
35	33	1051	0	656	0
40	34	1046	0	661	0
45	34	1037	0	653	0

På figur 23 ses en tilsvarende sammenligning for rumtemperaturen i den nord/øst orienterede zone ved brug af ventilation med og uden varmegenvinding og en fremløbstemperatur til gulvvarme på 30°C. Det ses at i de timer hvor temperaturen falder til -5 °C kan den ønskede rumtemperatur på 21°C fortsat opretholdes.



Figur 23 Sammenligning af indetemperaturen i den nord/øst orienterede zone ved brug af ventilation med og uden varmegenvinding. Fremløbstemperatur 30°C.

9.2 Udetemperaturstyring

Fremløbstemperaturen til gulvvarmen kan alternativt styres efter udetemperaturen, således at der haves en høj fremløbstemperatur når udetemperaturen er lav og omvendt en lav fremløbstemperatur når udetemperaturen er høj.

I det følgende er fremløbstemperaturen til gulvvarmen bestemt som en lineær funktion af udetemperaturen. Til dette er det dimensionerende varmetab (inkl. ventilationstab) beregnet. Efterfølgende er den nødvendige middelgulvvarmetemperatur bestemt for at opretholde en rumtemperatur på 21°C. Beregningen korrigeres desuden for det interne varmetilskud (5 W/m²).

På tilsvarende måde er den nødvendige middelgulvvarmetemperatur ved en udetemperatur på 15°C bestemt.

For det aktuelle eksempel er fremløbstemperaturen bestemt under forudsætning af at fremløbstemperaturen er ca. 5°C højere end middeltemperaturen i gulvvarmerørene. Herved fås følgende sammenhæng mellem udetemperatur og fremløbstemperatur til gulvvarmen (uden brug af varmegenvinding).

Udetemperatur [°C]	-12	15
Fremløbstemperatur [°C]	37	26

Da ventilationstabet er af stor betydning for varmetabet er beregninger udført for ventilation med og uden varmegenvinding. Følgende funktioner for fremløbstemperaturen er således bestemt til:

Ventilation uden VGV

$$T_{\text{frem}} = a \cdot T_{\text{ude}} + b = -0,4 \cdot T_{\text{ude}} + 32^{\circ}\text{C}$$

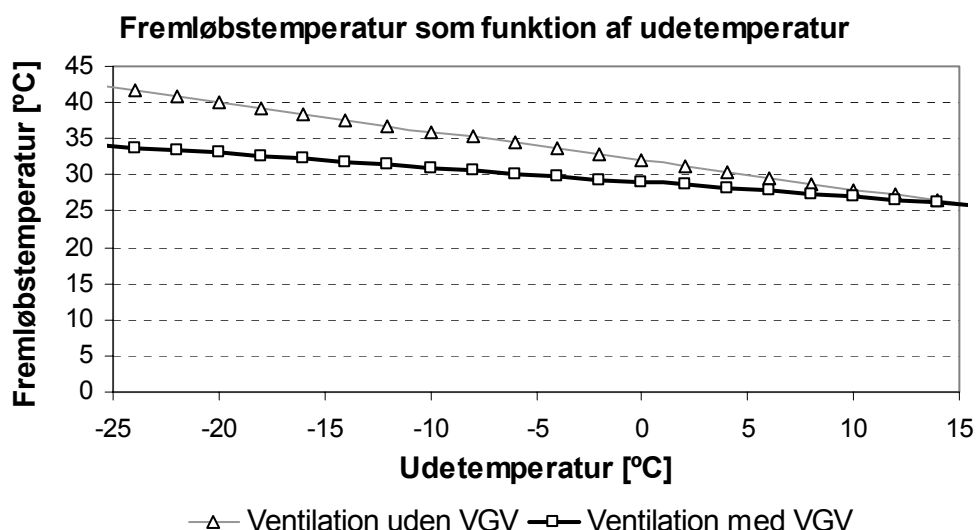
Ligning 1

Ventilation med VGV

$$T_{\text{frem}} = a \cdot T_{\text{ude}} + b = -0,2 \cdot T_{\text{ude}} + 29^{\circ}\text{C}$$

Ligning 2

De to funktionsudtryk er vist på figur 24.



Figur 24 Udetemperaturstyret fremløbstemperatur til gulvvarmen. Beregningen er lavet for referencemodellen med ventilation med og uden varmegenvinding.

I tabel 10 ses det simulerede varmeforbrug foretaget med udtrykket fra ligning 1 og ligning 2 sammenlignet med en konstant fremløbstemperatur på 40°C.

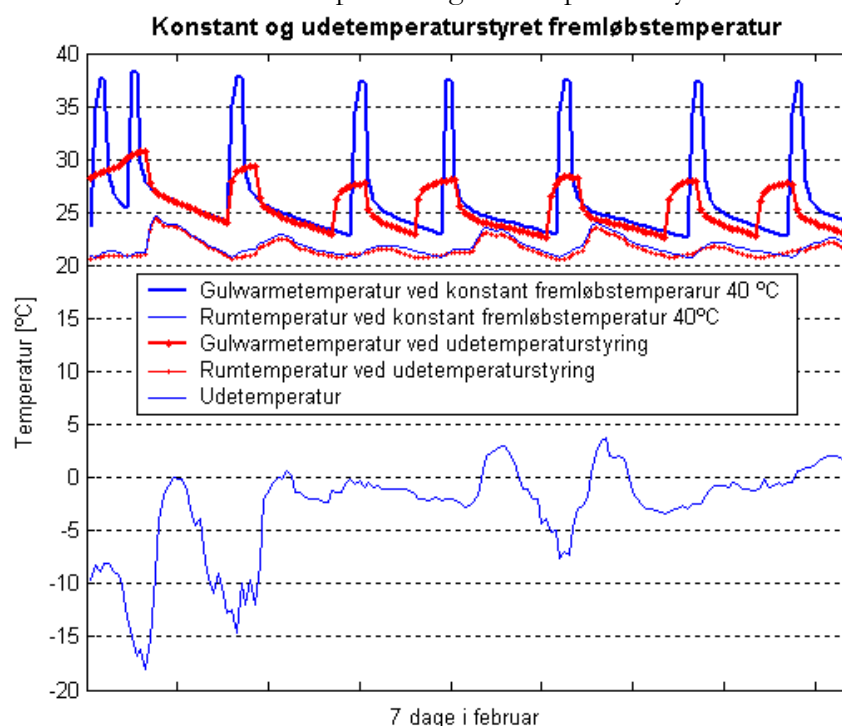
Tabel 10 Sammenligning af styringsstrategier ved brug af konstant fremløbstemperatur og en fremløbstemperatur styret efter udetemperaturen. Antal timer under 20 °C og gradtimer over og under 21°C er vist for den nord/øst orienterede zone. VGV = varmegenvinding.

Styring af fremløbstemperatur	VGV	Varme- forbrug [kWh/m ²]	Antal timer T < 20°C [-]	Gradtimer under 21°C [Kh]	Gradtimer over 21°C [Kh]
Konst. fremløbstemperatur, 40°C	÷	71	2	-189	4582
Konst. fremløbstemperatur, 40°C	+	34	0	-73	6470
Udetemp. fremløbstemperatur	÷	69	18	-507	3896
Udetemp. fremløbstemperatur	+	32	0	-202	5356

Det ses at varmeforbruget ved brug af en udetemperaturstyret fremløbstemperatur til gulvvarmen reduceres med ca. 2 kWh/m² pr. år svarende til en reduktion af varmeforbruget på 3 til 6 %.

Desuden ses at der ved brug af den udetemperaturstyrede fremløbstemperatur forekommer 18 timer med rumtemperatur under 20°C. Dette skyldes at der i referenceåret et par gange i løbet af vinteren, er et kraftigt fald i udetemperaturen over

nogle få timer. Gulvvarmesystemet træghed bevirker derfor at rumtemperaturen ikke kan opretholdes i denne periode. Et eksempel på dette er vist i appendiks 2. På figur 25 ses en sammenligning af rumtemperatur og gulvvarmetemperaturen ved konstant fremløbstemperatur og udetemperaturstyret fremløbstemperatur.



Figur 25 Udetemperaturstyret fremløbstemperatur sammenlignet med konstant fremløbstemperatur på 40°C.

Som det ses på figur 25 aktiveres gulvvarmesystemet ca. en gang i døgnet ved en udetemperatur på ca. 0°C. Længden af driftsperioden ses at være betydelig længere og ved en lavere gulvvarmetemperatur.

9.3 Start/stop differens

Gulvvarmestyringen benytter en start/stop differens på typisk 0,2°C eller 0,5°C. Indstilles setpunkttemperaturen til fx. 21°C vil gulvvarmesystemets således starte når rumtemperaturen falder under 20,5°C og efterfølgende først stoppe når rumtemperaturen bliver større end 21,5°C. I tabel 11 ses en sammenligning af start/stop differensens betydning for varmekonsumet og indeklimaet.

Tabel 11 Start/stop differensens betydning for varmekonsumet og rumtemperaturen beregnet for zonen orienteret mod nord/øst.

Start/Stop differens	Varmeforbrug [kWh/m ²]	Antal timer med temperatur under 20°C	Antal timer med temperatur over 25°C
0,2°C	71	2	660
0,5°C	72	10	670
1,0°C	71	180	625

Som det ses af resultaterne i tabel 12 har indstillingen af start/stop differensen kun en mindre indflydelse på det årlige varmeforbrug. Det anbefales dog, at der benyttes en start/stop differens på 0,2°C da denne indstilling resulterer i færrest timer med temperaturer under 20°C.

9.4 Natsænkning

Der er foretaget en simulering hvor setpunktstemperaturen for gulvvarmen sænkes i aften- og nattetimerne. En hensigtsmæssig indstilling af natsænkningen kan være problematisk grundet den termiske masse i bygningskonstruktionerne.

Tabel 12 Natsænkning af rumtemperaturen. Gulvvarmens setpunktstemperatur ændres fra 21°C til 17°C i tidsrummet fra klokken 21:00 til 05:00. Ventilation uden varmegenvinding.

	Varmeforbrug [kWh/m ²]
Natsænkning (17°C)	68
Ingen natsænkning	71

Natsænkning af rumtemperaturen til 17°C ses for referencemodellen at reducere varmeforbruget med 3 kWh/m² svarende til en besparelse på ca. 4 %.

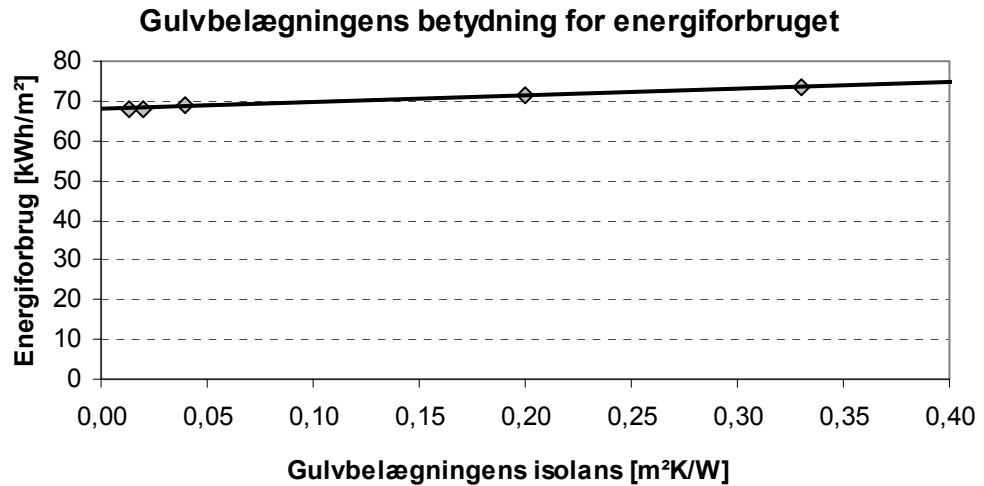
10 Gulvbelægninger

Gulvbelægningen har betydning for hvor meget effekt der kan afgives fra gulvet til rummet. Der er foretaget en række simuleringer med forskellige isolanser for typiske gulvbelægninger jf. tabel 13.

Tabel 13 Isolanser for typiske gulvbelægninger. De angivne isolanser for tæpper er skønnet maksimums og minimums værdier, idet der tages udgangspunkt i værdier angivet i simuleringsprogrammet BSim2002's database.

Gulvbelægning	Isolans [W/m ² K]
Klinkegulv, $\lambda = 1,3$ W/mK (10 mm – 20 mm inkl. mørtel)	0,01 – 0,02
Klinkegulv (R=0,015 W/m ² K) med gulvtæppe	
Tæppetykkelse 5 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,10$ W/mK	0,07
Tæppetykkelse 10 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,05$ W/mK	0,12
Tæppe direkte på betongulv	
Tæppetykkelse 5 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,10$ W/mK	0,05
Tæppetykkelse 10 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,05$ W/mK	0,20
Trægulv inkl. filt /6/	
14 mm parket el. lamel	0,20
20 mm planke	0,20
22 mm parket	0,25
Trægulv (R=0,2 m ² K/W) med gulvtæppe	
Tæppetykkelse 5 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,10$ W/mK	0,25
Tæppetykkelse 10 mm, $\lambda_{\text{gulvtæppe}} = 0,05$ W/mK	0,40

På figur 26 ses de simulerede varmekonsum ved forskellige gulvbelægnings. Det er i simuleringssprogrammet FHSim kun muligt at simulere væg til væg tæpper. Anvendes løse tæpper vil ændringen i de beregnede varmekonsum være mindre end angivet på figur 26.



Figur 26 Simuleret varmekonsum som funktion af gulvbelægnings isolans

Et typisk trægulv med gulvtæppe (væg til væg), ses således at forøge energiforbruget med 5 -10 % sammenlignet med et almindeligt klinkegulv, jf. isolanserne angivet i tabel 13 og figur 26.

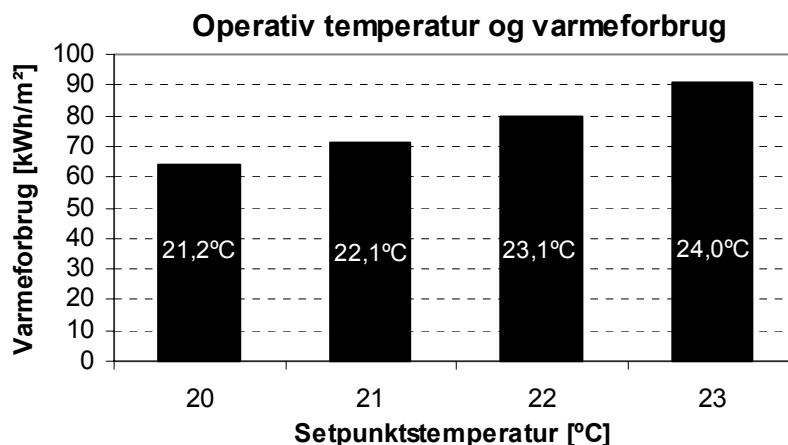
Den termiske komfort ved forskellige gulvbelægnings er ikke undersøgt. Fx. kunne en højere gulvoverfladetemperatur på klikegulve medføre et større varmekonsum.

11 Rumtemperaturen og varmekonsumet

I det følgende er foretaget en analyse af rumtemperaturens betydning for varmekonsumet. I den sammenhæng er det vigtigt at skelne mellem lufttemperaturen og den operative temperatur. I FHSim programmet styres gulvvarmen efter lufttemperaturen ved angivelse af en ønsket setpunktstemperatur.

På figur 27 ses varmekonsumet for referencemodellen, hvor den ønskede setpunktstemperatur for gulvvarmen er varieret fra 20 til 24 grader.

Desuden er der på figur 27 vist en middelværdi for den operative temperatur i fyringssæsonen (24/9 – 13/5) for det nordøst orienterede rum. (Den operative temperatur for det sydvest orienterede rum er ca. $0,2^\circ\text{C}$ højere grundet større solindfald).



Figur 27 Setpunktstemperatures betydning for varmekonsumet. Ventilation uden varmegenvinding. Den operative temperatur er vist for det nordøst orienterede rum og er beregnet som middelværdien i fyringssæsonen fra 24/9 til 13/5.

Det ses at varmekonsumet stiger ca. 10 til 12 % pr. grad setpunktstemperaturen øges og at den operative temperatur er ca. 1 grad højere end setpunktstemperaturen. Et gulvvarmeanlæg giver i forhold til radiatoranlæg en højere temperatur på gulvet og dermed en ca. 1 °C højere operativ temperatur. Man vil altså opnå samme termiske komfort ved ca. 1 °C lavere rumlufttemperatur ved gulvvarmeanlægget. Tages der hensyn til dette i indstillingen af setpunktstemperaturen for gulvvarmeanlægget vil det give en varmebesparelse på ca. 10%.

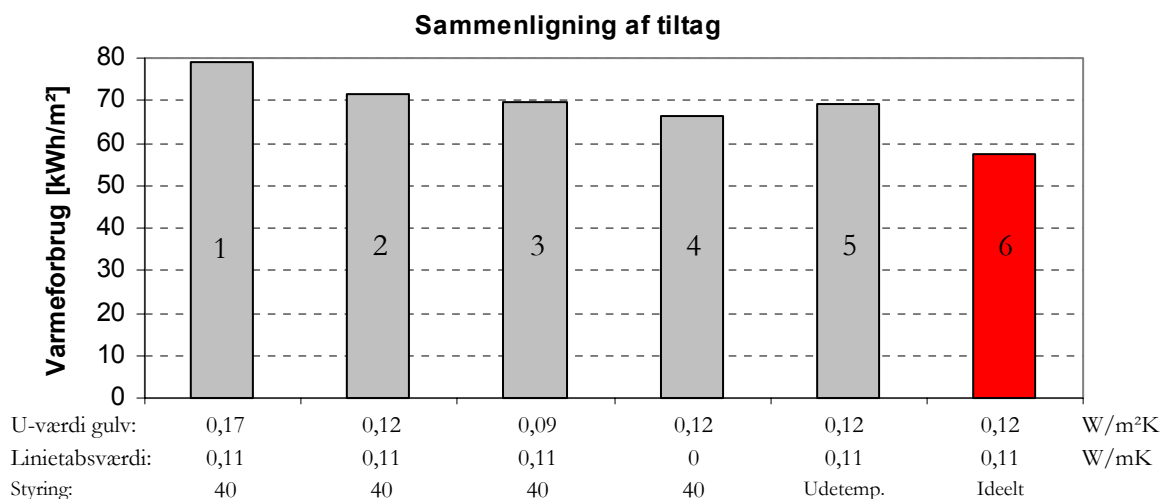
12 Sammenligning med ideel opvarmning

I de ovenstående kapitler er foretaget undersøgelser af forskellige tiltag med henblik på at reducere opvarmningsforbruget uden at dette påvirker det termiske indeklima nævneværdigt.

Til sammenligning er foretaget en simulering med referencemodellen, hvor et ideelt/fiktivt varmeanlæg antages. Et ideelt varmeanlæg vil sige et varmeanlæg der netop tilfører rummet den mængde energi (varme), der skal til for at opretholde den ønskede setpunkttemperatur uden brug af gulvvarme eller radiatorer. Der haves således ikke et større varmetab gennem gulvkonstruktionen grundet gulvvarmen eller bag radiatoren på ydervægge og ligeledes kan der ses bort fra det ekstra varmetab rumtemperaturstyringen kan forårsage pga. perioder med overtemperaturer. Det ideelle varmeanlæg holder konstant den ønskede setpunkttemperatur. Temperaturen kan dog blive højere end setpunktstemperaturen ved solindfald gennem vinduerne.

Forskellen kan således vise, hvor meget det rent teoretisk er muligt at reducere varmekonsumet til.

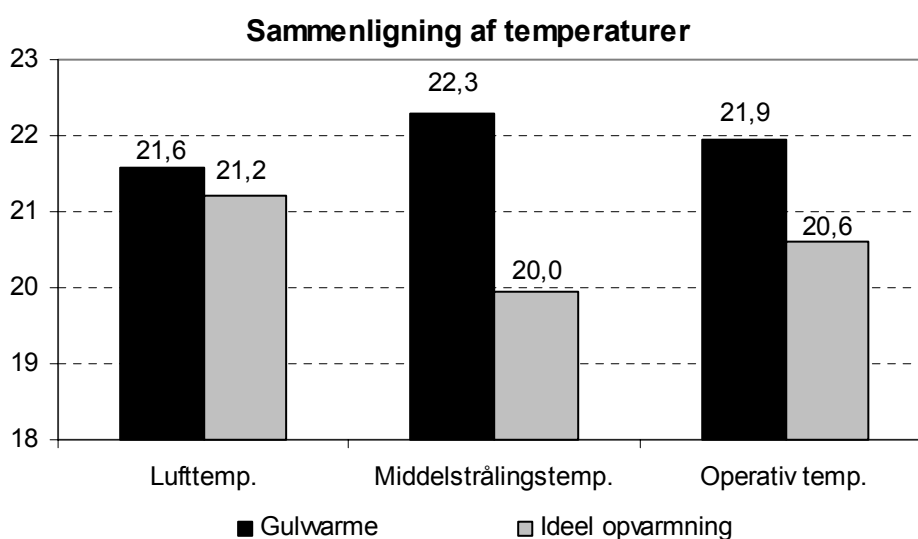
På Figur 28 er sammenlignet udvalgte resultater af ovenstående arbejde. De sidste to søjler viser varmekonsumet for hhv. et realistisk bud på et energirigtigt gulvvarmesystem og det ideelle varmeanlæg.



Figur 28 Simuleret varmekonsum for gulvvarmeløsninger sammenlignet med et antaget ideelt varmeanlæg. Ventilation uden varmegenvinding.

- Søjle 1 til 3: Isoleringstykkelser i terrændækket øges. Samme linietabsværdi og konstant fremløbstemperatur på 40°C.
- Søjle 4: Linietabet negligeres i beregningen. Samme isoleringstykkelser som søjle 2 og konstant fremløbstemperatur på 40°C.
- Søjle 5: Samme isoleringstykkelser og linietabsværdi som søjle 2, men med en fremløbstemperatur styret efter udetemperaturen.
- Søjle 6: Ideel opvarmning.

Som det ses på Figur 28 er der trods de forskellige tiltag fortsat et markant mindre varmekonsum på 17 % ved et ideelt opvarmningssystem. For at finde en forklaring på denne relativt store forskel, er der på Figur 29 vist en sammenligning af lufttemperaturen, middelstrålingstemperaturen og den operative temperatur beregnet i midten af rummet svarende til resultaterne angivet på Figur 28 søjle 5 og 6.



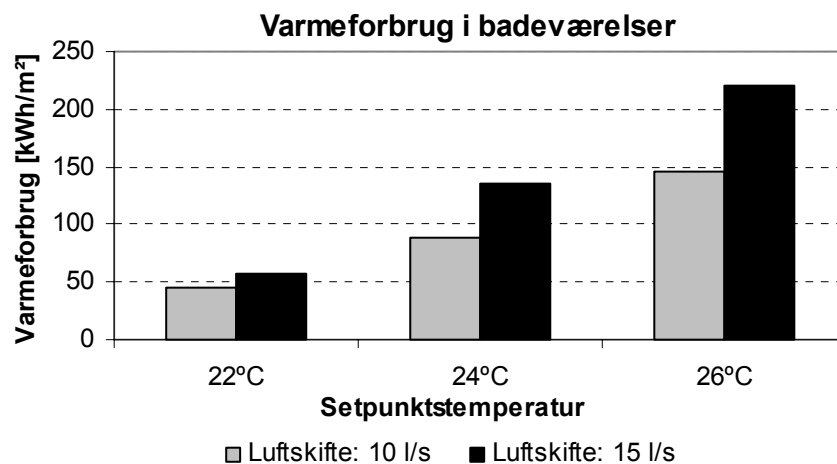
Figur 29 Sammenligning af lufttemperatur, strålingstemperatur og operativtemperatur. Temperaturerne er middelværdier i fyringssæsonen beregnet i rummets midte.

Som det ses på Figur 29 er der en forskel i den operative temperatur og lufttemperatur på hhv. 1,3 °C og 0,4 °C. Korrigeres der for den lidt højere lufttemperatur fås en operativ temperatur der er ca. 1 °C højere. Den højere operative temperatur forklarer således hvorfor varmemeforbruget ved ideel opvarmning er væsentligt mindre end varmemeforbruget ved brug af gulvvarme. En operativ temperatur der er ca. 1 °C højere medfører jf. Figur 27 en ekstra varmemeforbrug på ca. 10 %. De sidste 7 % større varmemeforbrug ved opvarmning med gulvvarme, kan forklares dels ved et større varmetab til jord og dels med at gulvvarmestyringen ikke er optimal.

13 Badeværelser

Gulvvarme i badeværelser benyttes ofte hele året og da der typisk haves en højere rumtemperatur og et større luftskifte vil det årlige varmemeforbrug for dette rum være større end for resten af huset. Nedenfor er foretaget en simulering af et badeværelse på 4,5 m² med klinke belægning. Simuleringerne er foretaget for forskellige setpunktstemperaturer og ventilationsniveauer.

Det antages at ventilationen i praksis udføres således, at der suges luft ind fra nabo rum med en lufttemperatur på 21°C.



Figur 30 Simuleret varmemeforbrug i badeværelse med et areal på 4,5 m².

Det ses at både ventilations størrelse og rumtemperaturen, som forventet har stor betydning for varmemeforbruget trods det, at der ventileres med rumluft fra nabo rum. En styring af ventilationen på badeværelser med en hygrostat (fugtafhængig styring) kunne være energibesparende. Det skal nævnes at ventilationskravet i BR95 er 15 l/s.

14 Konklusion

Der er i projektet foretaget en række undersøgelser af udformningen og styringen af gulvvarmesystemer med henblik på at minimere varmekonsumet i BR05 bygninger med gulvvarme. På baggrund af resultaterne gives følgende generelle anbefalinger.

Anbefalet udformning og styring

Ved at reducere klimaskærmens varmetab og ventilationstabet for en given bolig reduceres den nødvendige effekt, der skal afgives fra gulvoverfladen. Derved kan gulvvarmetemperaturen nedsættes, hvorved der lagres mindre termisk energi i gulvkonstruktionen. Varmeafgivelsen fra gulvoverfladen kan derved hurtigere stoppes i tilfælde af fx. større solindfald eller intern varmelast.

Følgende punkter anbefales generelt for dimensionering og drift af et energirigtigt gulvvarmesystem i BR05 bygninger:

- Terrændækket udføres med en U-værdi på maks. 0,12 W/m²K (fx. 300 mm isolering plus 200 mm kapillarbrydende lag af grus)
- Fundamentet udføres med et linietaf tab der maks. er 0,12 W/mK, som angivet i oplægget til BR05.
- De skærpede U-værdi-krav til de øvrige klimaskærmskonstruktioner angivet i oplægget til BR05 overholdes.
- Der benyttes ventilation med effektiv varmegenvinding.
- Let gulvvarme anbefales (hvor det er muligt) frem for tung gulvvarme grundet en hurtigere reaktionstid og derved bedre styringen af rumtemperaturen.
- Fremløbstemperaturen til gulvvarmen indstilles ved en så lav temperatur at rumtemperaturen netop kan opretholdes i kolde perioder. Fx. 30°C til 35°C.
- Styringen af gulvvarmesystemet kan med fordel udføres med en udetemperaturstyring fremfor en konstant fremløbstemperatur hele året.
- I rum der ikke benyttes regelmæssigt, kan rumtemperaturen med fordel nedsættes. For hver grad rumtemperaturen nedsættes spares 10 - 15 % i varmekonsum i rum opvarmet med gulvvarme.

Referencer

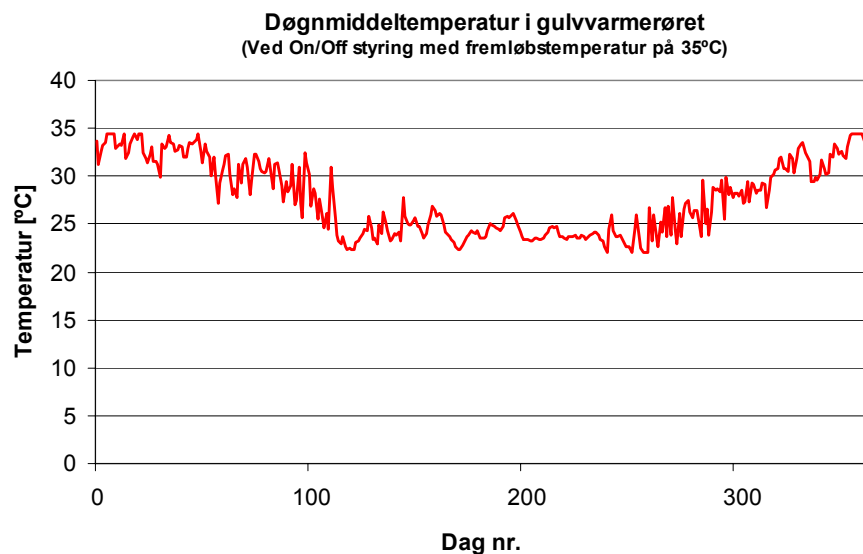
- /1/ FHSim, Floor Heating Systems, simuleringsprogram, Peter Weitzmann, August 2002.
- /2/ Ph.d. afhandling. Endnu ikke afleveret. Peter Weitzmann, Danmarks Tekniske Universitet, BYG·DTU, Brovej, Bygning 118, 2800 KGS. Lyngby.
- /3/ DS 418 – 6.udgave, 2002-04-03, Beregninger af bygningers varmetab, Dansk standard.
- /4/ Development of a method for comparing field measurements in a house with floor heating under three-dimensional conditions using a two-dimensional modelling tool, Peter Weitzmann, Danmarks Tekniske Universitet, Institut for bygninger og energi.
- /5/ Oplæg til energibestemmelser i Bygningsreglementet år 2005 og skitse til bestemmelser i år 2012. Udkast august 2001, Journal nr. 431-27, Søren Aggerholm, BY og BYG.
- /6/ Varmeteknisk analyse af gulvvarmeanlæg, Peter Weitzmann, Claus F. Jensen, November 2000, Danmarks Tekniske Universitet, Institut for bygninger og energi.
- /7/ Typehus svarende til BR-2005-Energikrav, Del1: Optimering af konstruktioner/systemer, Jørgen Rose, Rapport R-001, Februar 2001, Danmarks Tekniske Universitet, BYG·DTU.

Appendiks 1 Fiktiv jordtemperatur

For at inkludere linietabet i simuleringerne foretaget med gulvvarmemodel 1 og 2 til FHSim, er en korrigeret jordtemperatur umiddelbart under terrændækket benyttet. Hvorledes denne er bestemt beskrives i det følgende.

Temperaturen i gulvvarmerørene er fundet ved at foretage en årssimulering i FHSim med et antaget jordtemperaturprofil umiddelbart under terrændækket. Programmet benytter, som tidligere nævnt et referenceår for udeklimaet, hvorved den simulerede driftsperioden for gulvvarmen er realistisk.

Temperaturen i gulvvarmerøret logges hver time, hvorefter en middeltemperatur pr. døgn bestemmes for alle årets dage. Døgnmiddeltemperaturen ved en fremløbstemperatur på 35°C og en On/Off styring ses på figur 31.



Figur 31: Simuleret døgnmiddeltemperatur fra FHSim. Simuleringen er foretaget i et rum med parketgulv og en setpunktstemperatur på 21°C.

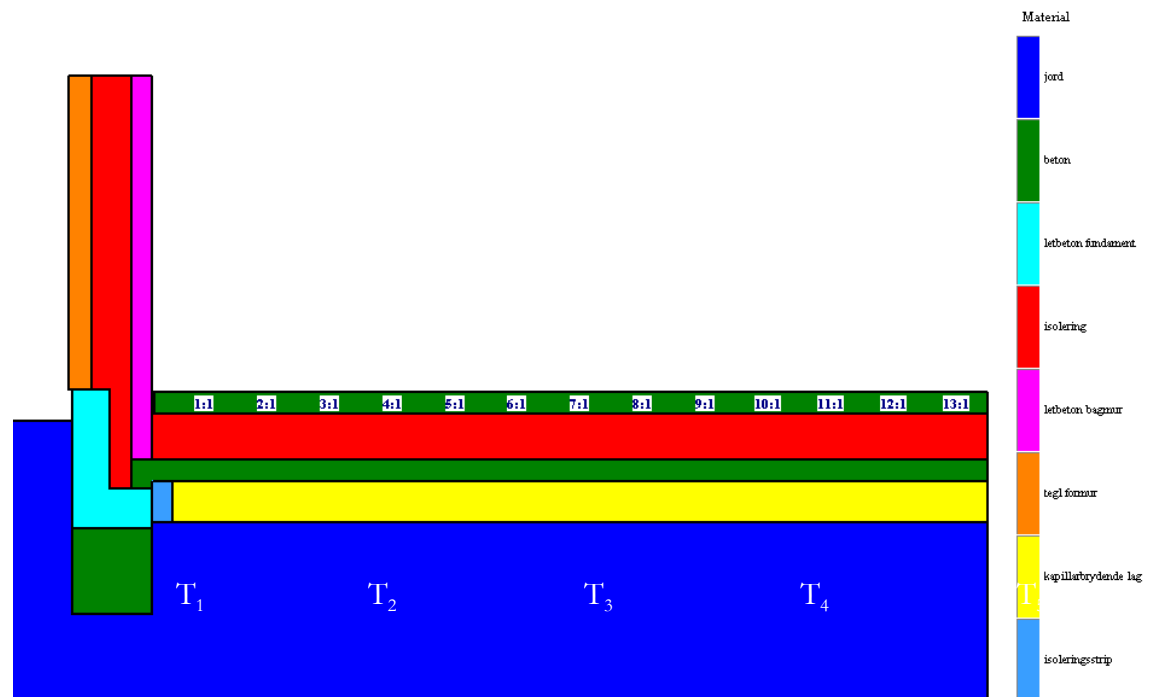
I det 2-dimensionale beregningsprogram Heat2 opbygges en model af samlingen mellem fundament og terrændæk. Modellen fremgår af figur 32. Som grænsebetingelser benyttes indvendigt 20°C og en overgangsisolans på 0,13 m²K/W. Udvendigt benyttes en overgangsisolans på 0,04 m²K/W samt følgende tilnærmede funktionsudtryk for udetemperaturens årsvariation:

$$T_{ude}(t) = 8 + 8,5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t - t_0}{31536000 \text{ s}}\right)$$

hvor t er tiden i sekunder.

En dynamisk styringen af den nødvendige temperatur i gulvvarmerørene ved en given setpunktstemperatur i et rum kan ikke umiddelbart opbygges i Heat2. For at implementere denne dynamik i Heat2 simuleringen indsættes derfor den tidligere beskrevne døgnmiddeltemperatur i gulvvarmerørene fra FHSim.

Under simuleringen i Heat2 logges temperaturen umiddelbart under terrændækket hver meter horisontalt fra fundamentet (se figur 32).

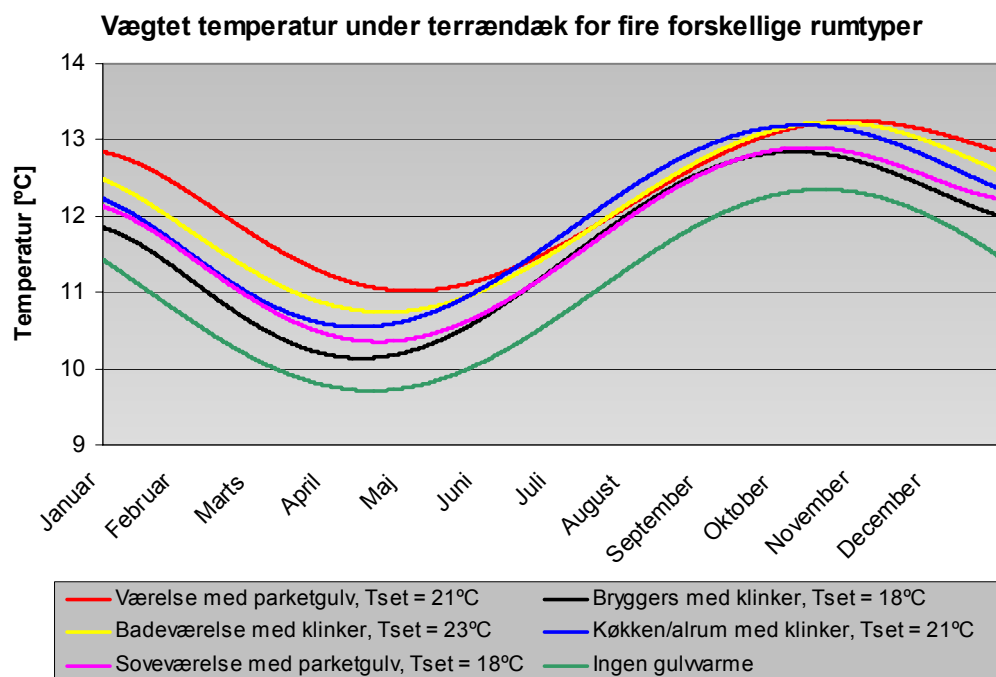


Figur 32: Model af samlingen mellem fundament og terrændæk. Det faktiske jordvolumen er større end ovenfor vist.

Den korrigerede jordtemperatur beregnes på baggrund af de loggede jordtemperaturer efter en simuleringsperiode på 10 år. En vægtet middeltjordtemperatur gældende for hele terrændækkets underside er beregnet jf. ligning 3.

$$T_{mid} = \frac{(T_1 + 2 \cdot T_2 + 2 \cdot T_3 + 2 \cdot T_4 + T_5)}{8} \quad \text{Ligning 3}$$

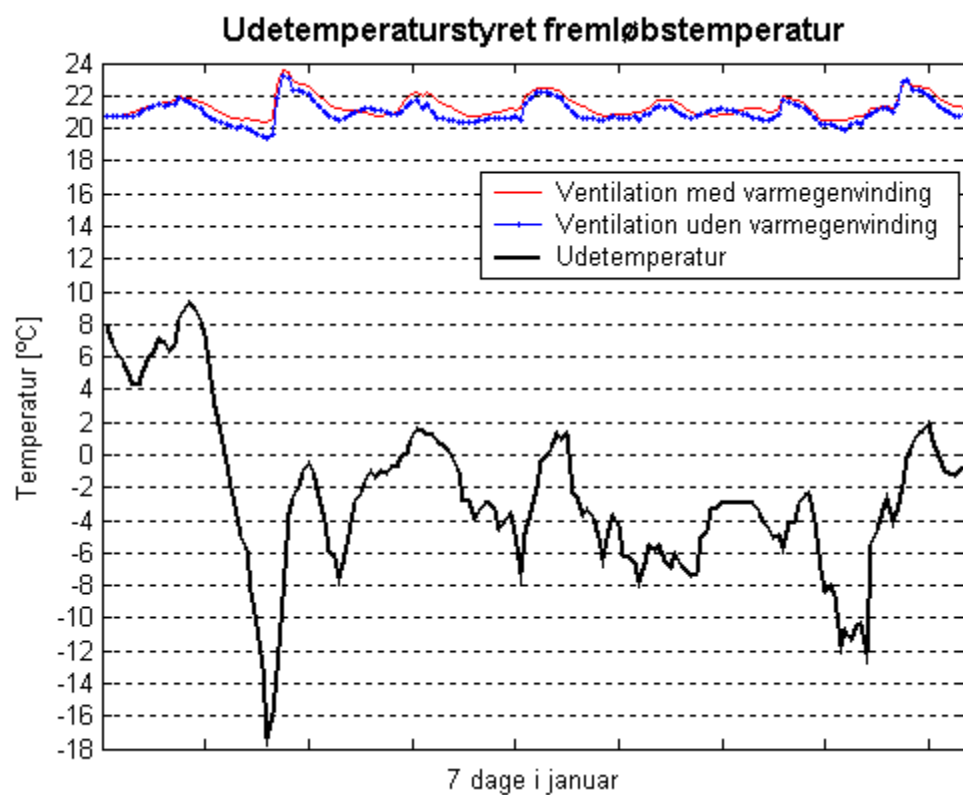
Ovenstående beregningsmetode er anvendt på flere forskellige rum med forskellige funktioner og setpunktstemperaturer. Resultaterne fremgår af figur 33.



Figur 33: Vægtet jordtemperatur umiddelbart under terrændæk. Desuden ses en simulering hvor gulvvarme ikke har været anvendt. Bemærk zoomet y-akse.

Som det ses af figur 33 varierer temperaturen under terrændækket mindre end 1° mellem de forskellige rumtyper. To simuleringer, foretaget med FHSim, af opvarmningsbehovet for samme rum (rum 1, værelse med parketgulv), men med to forskellige korrigerede jordtemperaturer resulterede i en forskel i varmekonsumet på under 0,5 %. Fejlen ved at benytte samme korrigerede jordtemperatur for alle rumtyper med samme isoleringstykkelse i terrændækket, vurderes derfor at være relativt begrænset.

Appendiks 2 Plot af resultater fra FHSim



Figur 34 Udetemperaturen og rumtemperaturen i den nord/øst orienterede zone simuleret med ventilation med og uden varmegenvinding.

Det ses at der i DRY året i løbet af få timer er et markant fald i udetemperaturen hvilket bevirker at den ønskede rumtemperatur ikke kan opretholdes i nogle få timer.