



**AALBORG UNIVERSITET  
KØBENHAVN**

Aalborg Universitet København  
Statens Byggeforskningsinstitut  
A. C. Meyers Vænge 15  
2450 København SV  
Danmark

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto  
Telefon: 9940 2285  
master@sbi.aau.dk

## *Studenterrapport*

**Uddannelse:** Master i Bygningsfysik  
**Semester:** Master speciale  
**Titel på masterprojekt:** Efterisolering af ydervægge med præfabrikerede plade elementer  
**Projektperiode:** Forår 2016

**Vejleder:** Martin Morelli

**Studerende:** Poul B. Hansen

[Underskrift]  
  
[Indsæt navn]

[Underskrift]

[Indsæt navn]

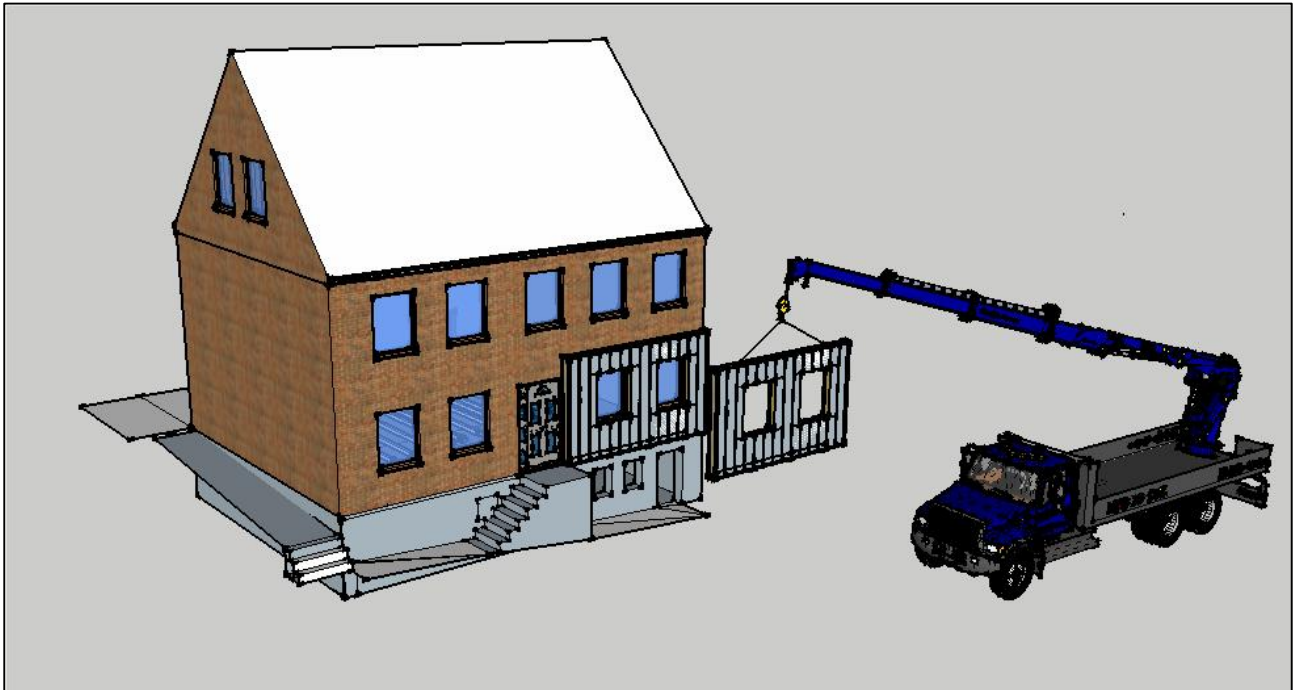
**Antal normalsider:** 25

**Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen**

**Afleveringsdato:** 01.05 2016

### **Resume:**

Undersøgelsen bearbejder forskellige aspekter af emnet efterisolering med præfabrikerede elementer. Først undersøges om det er økonomisk forsvarligt. Det afklares herunder hvordan et præfabrikeret element kan opbygges. Dernæst undersøges et andet emne. Når bygninger efterisoleres reduceres energitabet ud gennem konstruktionerne, det er godt i vinteren, men knap så godt om sommeren når der er risiko for bygninger kan blive overophedede. Denne ophobning af varme inde i bygningen kan måske undgås hvis det er muligt at lave et ventileret hulrum mellem den gamle klimaskærm og det nye præfabrikerede element. Denne del af undersøgelsen prøver at sammensætte et værktøj der kan beregne effekter af denne ventilationsspalte.



Præfabrikerede elementer til udvendig efterisolering

Poul Børison Hansen

Master i Bygningsfysik 2016

Master speciale, juni 2016

## Abstract

This survey investigates how prefabricated insulating elements mounted on existing buildings work. Is it an economically feasible solution, given the energy prices and the investment in mounting prefabricated insulating elements.

Furthermore it investigates wheatear the prefabricated elements can be a help on keeping the indoor air temperature at a comfortable level all year round. During winter the extra insulation will reduce the heatloss through the buildings thermal envelope. And during summer the extra insulation does the same, causing the building inside the thermal envelope to accumulate too much heat energy and thereby overheat. This overheating may be hindered if it is possible to make a ventilated gab between the existing building and the prefabricated insulating element.

This survey attempts to find tools and then to calculate the possible effect of this situation during a few chosen situations.

## Indholdsfortegnelse

<b>1. Introduktion/ indledning</b> .....	<b>4</b>
1.1. Spørgsmål: .....	5
1.2. Værktøjer:.....	5
<b>2. Den eksisterende bygning</b> .....	<b>6</b>
2.1. Eksisterende bygninger .....	6
2.1.1. Beregning af U-værdi og overfladetemperaturer for 350 mm tegльдervæg. ....	8
<b>3. Det præfabrikerede element</b> .....	<b>9</b>
3.1. Krav til element og materialer .....	9
3.2. Elementopbygning.....	9
3.3. Beregning af U-værdi for element .....	11
3.3.1. Beregning af elementets U-værdi i HEAT2.....	11
3.3.2. Beregning af U-værdi og overfladetemperatur for tegльдervæg og element .....	12
3.4. Fugtberegning i WUFI Pro .....	12
3.5. Opsummering af elementopbygningen .....	13
<b>4. Rentabilitet af investering</b> .....	<b>14</b>
4.1. Opmåling af bygning til bestemmelse af energiforbrug i Be15 .....	14
4.2. Fastsættelse af de øvrige nødvendige faktorer. ....	14
4.3. Bygningens energiforbrug .....	15
4.4. Energipriser .....	15
4.5. Pris på præfabrikeret element.....	16
4.6. Forrentning af investering.....	16
4.7. Diskussion af rentabilitet og energibesparelse .....	17
<b>5. Beregning af effekt af det ventilerede hulrum</b> .....	<b>18</b>
5.1. Varmeledning i faste materialer .....	18
5.2. Varmeledning til luft.....	19
5.3. Varmestråling .....	20
5.4. Konvektion.....	20
5.5. Varmebalance for element .....	21
5.5.1. Entalpi, I, energi i fugtig luft.....	24
5.5.2. $\Phi$ Varmestrøm – summen af varmemstrøm fra de to overflader .....	25
5.6. Beregning af varmemstrømme til hulrum .....	28
5.7. Beregning af luftmængder.....	33
5.8. Diskussion af effekten af ventilation af facadeelement .....	35
<b>6. Konklusion</b> .....	<b>37</b>
<b>7. Perspektivering</b> .....	<b>38</b>
<b>8. Figurliste</b> .....	<b>40</b>
<b>9. BILAG</b> .....	<b>41</b>

## 1. Introduktion/ indledning

Der er en stor del af den danske boligmasse der fremstår, næsten som da den blev opført. Især er der meget etageboligbyggeri, der aldrig er blevet efterisoleret. Der vil være fordele ved at efterisolere ældre eksisterende bygninger for at spare penge til energiudgifter og derudover forbedre indeklimaet i bygningerne.

Det danske etageboligbyggeri opført mellem 1850 og 1960 er typisk opført med ydervægge i blank murværk. Mange af disse bygninger har ingen eller kun meget lidt isolering, hvilket resulterer i et stort varmetab gennem klimaskærmen. Dette varmetab resulterer i et højt energiforbrug for at opretholde det termiske indeklima i bygningerne.

Ved at efterisolere kan energiudgifterne reduceres og det termiske indeklima forbedres i opvarmingsperioden. Et forbedret termisk indeklima med ingen eller kun små udsving i indetemperaturen over hele året og uden trækgener medfører en forbedret tilfredshed blandt beboerne.

En forudsætning for at udføre udvendig efterisolering er naturligvis, at facaderne ikke er bevaringsværdige. Fordelen ved at lave udvendig efterisolering er at der kan etableres en hel – ubrudt isolering langs hele ydervæggsfacaden og at de indvendige opholdsarealer bevares uændret i størrelse, samt at der ikke skal udføres omfattende indvendige arbejder.

For at minimere de udvendige arbejdsprocesser mest muligt og derigennem afkorte arbejdsperioden kan den udvendige efterisolering produceres i elementer der monteres i større moduler. Formålet med disse større elementer er at kunne producere dem under kontrollerede forhold, så konstruktion og materialer holdes tørre under processen og medarbejderne arbejder under sikre forhold.

I undersøgelsen vurderes om en efterisolering med udvendige præfabrikerede elementer er økonomisk forsvarlig, og om den forbedrer indeklimaet. Indeklimaet skal forbedres for hele året. Isoleringen sikrer at der bliver behagelige temperaturer i vinterperioden, men kan medføre at det bliver for varmt i sommerperioden.

Temperaturen skal af hensyn til beboernes komfort, være mellem 20-24oC om vinteren og 23-26oC grader om sommeren. {SBI-anvisning 196, Indeklimahåndbogen, Tabel 3.12}.

Tesen: efterisolering der afhjælper varmetabet i opvarmningssæsonen, isolerer så effektivt at der bliver et overskud af varme i bygningen uden for opvarmningssæsonen.

Menneskets komfort i bygningen er lige vigtig om sommeren som om vinteren, og det er følgelig nødvendigt at undgå overskudsvarmen. I den valgte bygningstype, er det oftest nødvendigt at udlufte varmen ved at åbne vinduerne, og dermed give risiko for træk.

Varmebalancen for facaderne er kendetegnet ved varmestrømmen der ledes gennem ydervæggen, samt varmestrømmen og varmestrålingen gennem vinduerne.

Er det muligt at lave en konstruktion hvor isoleringsevnen af ydervæggen kan varieres, så den er stor i opvarmningssæsonen og lav uden for opvarmningssæsonen?

Det vil i givet fald hjælpe til at opretholde det termiske indeklima i sommeren, og reducere varmetabet gennem ydervæggen i vinteren.

Uden for bygningens opvarmningssæson, vil der med en reduceret isoleringsevne kunne bortledes energi til omgivelserne.

Det kan tænkes gjort på mange måder, i nærværende undersøgelse etableres en isolering der slutter tæt til bygningen om vinteren. Og i løbet af forår/forsommer at etablere et ventileret hulrum mellem isoleringen og det oprindelige murværk, der kan bortlede overskydende energi fra bygningen.

### 1.1. Spørgsmål:

- Hvordan kan efterisolering med præfabrikerede elementer reducere energiforbruget i bygninger, uden at skade det termiske indeklima uden for opvarmningssæsonen?
- Hvordan er et præfabrikeret element opbygget?
- Er udvendig efterisolering med præfabrikerede elementer rentabelt?
- Kan der laves et ventileret hulrum bag elementet der kan give en kølende effekt uden for opvarmningssæsonen?
  - Hvor stort en luftstrøm skal ventileres gennem hulrummet for at have den ønskede effekt?

### 1.2. Værktøjer:

Element designes og eftervises ved brug af HEAT2.

Rentabilitet beregnes ved brug af energiberegning i Be15, og rapporter fra undersøgelser udført af SBI.

Element og ydervæg undersøges med WUFI Pro.

Beregning af varmestrømmene i elementet og det ventilerede hulrum. Udføres ved brug af værktøjer og viden fra undervisningen under uddannelsen Master i Bygningsfysik.

## 2. Den eksisterende bygning

Det danske etageboligbyggeri opført mellem 1850 og 1960 er typisk opført med ydervægge i blank murværk. En meget stor del af disse fremstår næsten som da de blev opført, og har derfor ingen eller meget lidt isolering i ydervægskonstruktionerne, hvilket resulterer i et stort varmetab. Dette varmetab resulterer i et højt energiforbrug for at opretholde det termiske indeklima i bygningerne. Et forbedret termisk indeklima med ingen eller kun meget få arealer med kuldestråling og uden temperatursvingninger, medfører en øget tilfredshed med indeklimaet blandt beboerne

### 2.1. Eksisterende bygninger

Da målet med undersøgelsen er at afklare om det vil være gavnligt at efterisolere den eksisterende bygningsmasse med præfabrikerede elementer, må det undersøges om det er økonomisk fornuftigt at efterisolere.



Figur 1 - Vitus Berings Plads 12, 8700 Horsens

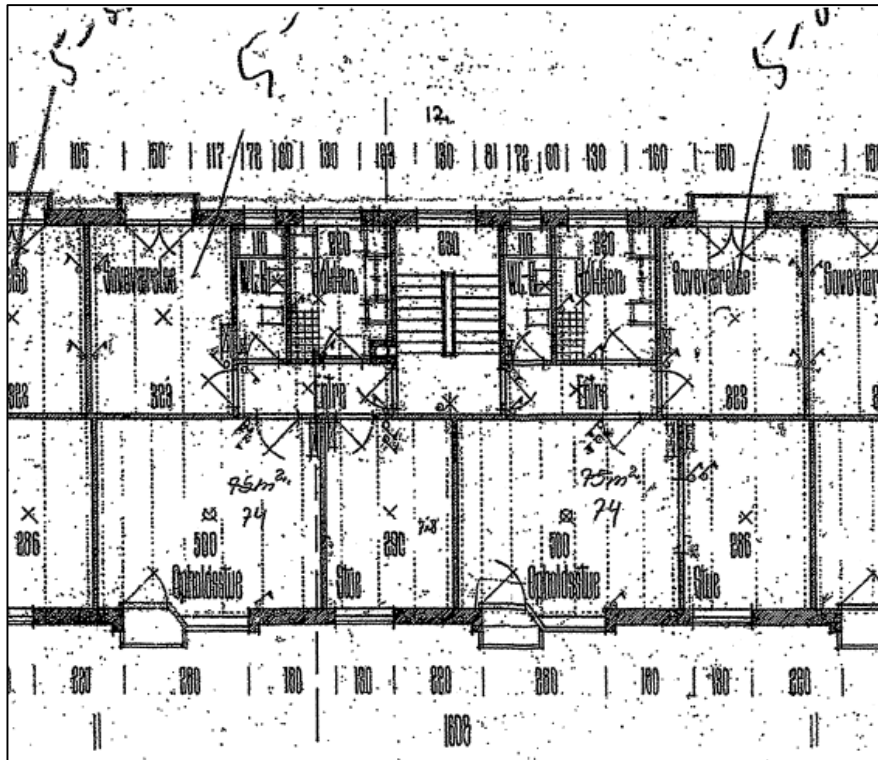
Til det formål er der valgt en traditionel etagebolig bygning der er opført i 1943. Den er placeret i Horsens, og omfatter en enkelt trappeopgang i en større bebyggelse. Bygningen har 5 etager og fuld kælder. Det valgte bygningsudsnit indeholder 10 lejligheder, alle på 75 m<sup>2</sup>. Bygningen er orienteret med facader mod syd og nord. Mod nord er servicefunktioner som toilet og køkken samt et soveværelse. Mod syd ligger de 2 stuer der udgør opholdsrummene.

Bygningen er blevet løbende vedligeholdt, og der er blevet udført loft isoleringsarbejder i forbindelse med en tagudskiftning. Endvidere er vinduerne blevet udskiftet til lavenergivinduer.

Bygningens facader er fuldmuret tegl på henholdsvis 35 cm i de øverste to etager, og 48 cm i de nederste tre etager, kælderydervæggen er opført i 49 cm beton.

Bygningens varmforsyning er fjernvarme, leveret af Horsens Fjernvarmeværk AMBA.

Bygningen simplificeres på enkelte punkter, f.eks. tages der ikke hensyn til altaner der er på bygningerne. De vil for eksemplets skyld erstattes med en glasflade.



Figur 2 - Plansnit af Vitus Berings Plads 10

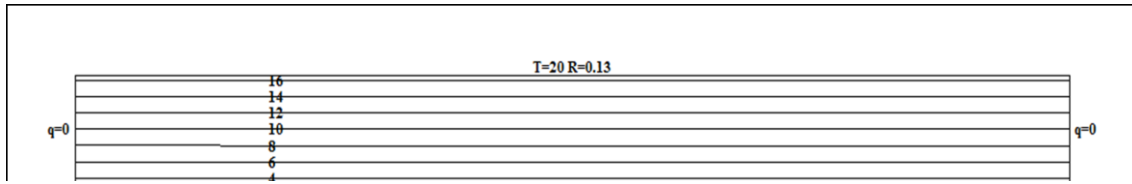
Det totale bebyggede areal er  $740,6 \text{ m}^2$  og kælder på  $132 \text{ m}^2$ .

Eftersom energiberegningen der udføres her skal vise besparelses potentialet ved efterisolering af ydervæggene, bliver vinduernes U-værdi antaget for en fast størrelse uanset vinduets dimension, ved efterisolering vil vinduernes U-værdi ikke ændres.

Linietaf ved den nuværende placering af vinduerne vil reduceres som følge af den udvendige efterisolering og inkluderes derfor i energiberegningen. Tag og terrændæk inkluderes for at få en komplet klimaskærm. Bygningen har tvungen mekanisk udsugning i køkken og bad og frisklufttilførsel gennem vinduesventiler i alle rum.



## 2.1.1. Beregning af U-værdi og overfladetemperaturer for 350 mm teglydervæg.



Figur 3 - Isotherm for 350 mm teglydervæg

Ved simuleringen i HEAT2 beregnes overfladetemperaturen til 16,6 [°C], for en indvendig lufttemperatur på 20 [°C] og en udvendig lufttemperatur på 0 [°C]. Bilag 1 viser data fra beregning i Heat.

Den i HEAT2 beregnede U-værdi for 350 mm teglydervæg er 1,29 [W/m<sup>2</sup>K]

Ved U-værdiberegning efter DS418 bliver U-værdien 1,3 [W/m<sup>2</sup>K]

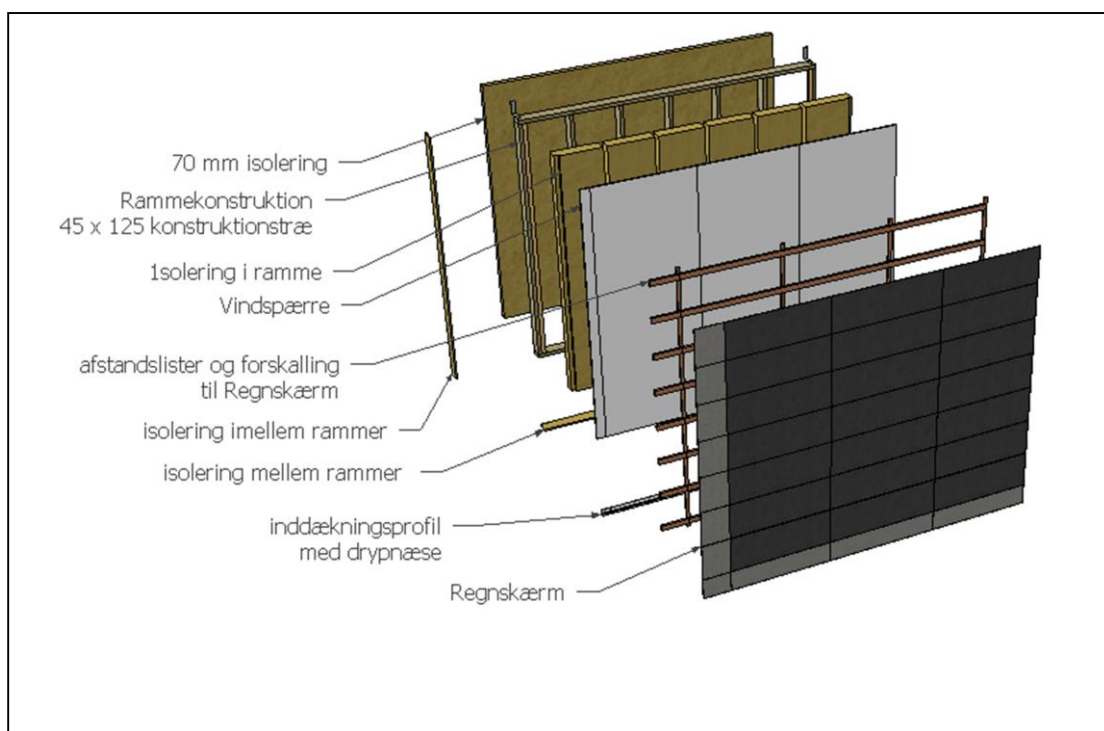
### 3. Det præfabrikerede element

#### 3.1. Krav til element og materialer

- Elementet skal kunne bevæges bort fra væg og ind til væggen igen mindst en gang om året. Bevægelige hængsler og beslag er ikke forsøgt løst i detaljer i nærværende opgave. I design og beregninger er inkluderet simple vinkeljern til befæstigelse.
- Elementet skal forbedre bygningens termiske isoleringsevne.
- Elementet må ikke forringe bygningens sikkerhed mod brand.
- Elementet skal være "solidt"/"stabilt" nok til at kunne produceres, transporteres og monteres på bygningen.
- Elementet skal være i stand til at modstå de ydre påvirkninger som klimaet byder, og de påvirkninger fra den eksisterende bygningskrop.
- Elementet skal overholde maksimale dimensioner der tillader transport fra fabrik til byggeplads.
- Elementet skal opbygges af simple materialer med mindst mulig forarbejdning af de enkelte komponenter.

#### 3.2. Elementopbygning

Eftersom elementet skal være bevægeligt, anvendes en ventileret facadeløsning der har separat vindspærre og regnskærm. Det vil minimere risikoen for vand indtrængen udefra i elementets indre konstruktioner.



Figur 4 - Principopbygning af element

Elementet der er designet til analyserne er opbygget med en regnskærm bestående af keramiske fliser monteret med metalclips på en forskalling af træ. Træforskallingen må af brandhensyn maksimalt udgøre 10% af hulrummets overflader. Vindspærren der udgør den indre overflade er en calciumsilikatplade. Den fås i mål på op til 3 m længde og 1,2 m bredde, hvilket afgør modulets mål. Elementets konstruktive / bærende konstruktioner tænkes udført i konstruktionstræ 125x45 mm placeret med centerafstand på 600 mm, hvilket passer med behovet for fastgørelse af calciumsilikatpladen. Hulrummet fyldes med mineraluld med en varmeledningsevne på  $0,037 [W/m^2K]$ , og elementet afsluttes med en hård, ubrændbar, isolering der

beskytter trædelen i elementerne mod brandpåvirkning. Denne isolering skal muligvis udføres med en overfladebelægning mod murværket der kan beskytte isoleringen under transport og i de perioder hvor hulrummet mellem element og murværk er åbent for ventilation.

Elementet udføres uden dampspærre. Den oprindelige teglydervæg på 350 [mm] tegl kombineret med komponenter tillader fugt at diffundere bort, når diffusionsmodstanden gennem elementet er omkring 1/10 af teglvæggens. Teglvæggens damppermeabilitet antages at være cirka  $0,2[\mu\text{g}/\text{m s Pa}]$ , hvilket svarer til en Z-værdi på  $17,5 [\text{GPa m}^2 \text{ s}/\text{kg}]$  {Kilde SBI 224}. I elementet har vindspærren har den højeste dampdiffusionsmodstand på  $0,5 [\text{GPa m}^2 \text{ s}/\text{kg}]$ , se Tabel 1

Klimaskærmens lufttæthed anses for sikret da teglydervæggen har en tykkelse på mere end 100 mm og en densitet på mere end  $1600 [\text{kg}/\text{m}^3]$ . {Kilde SBI 214}

Den samlede vægt af elementet bliver 387 kg, se Bilag 2

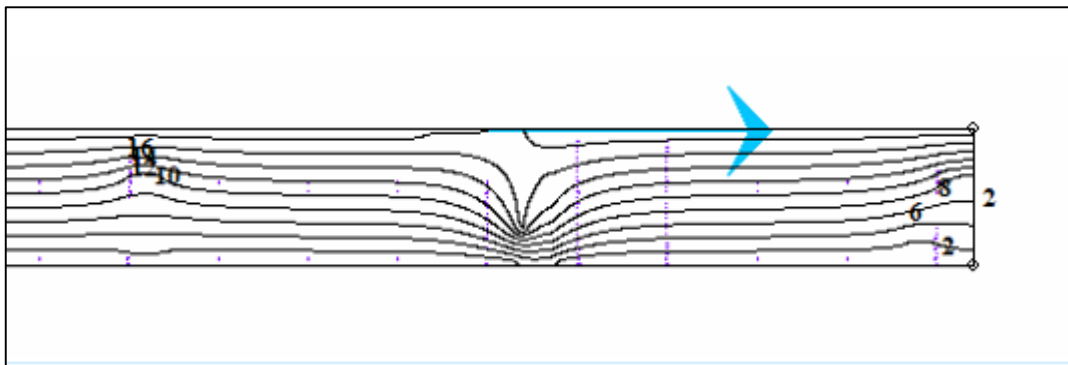
Materiale	Tykkelse	Densitet	Lambda værdi	Z-værdi	Brand egenskaber
	m	$\text{Kg}/\text{m}^3$	$\text{W}/\text{mK}$	$\text{GPa s m}^2/\text{kg}$	
Isolering	0,070	30	0,037	-	
Ramme af konstruktionstræ	0,125	450	0,12	0,002	
Isolering i rammekonstruktion	0,125	30	0,037	-	
Vindspærre	0,008	33,5 $\text{kg}/\text{plade}$	0,22	0,5	
Forskalling for regnskærm	0,037	450	-	-	
Regnskærm	0,006	1400	-	-	
Total	0,247				

Tabel 1 - Egenskaber for materialer i element

### 3.3. Beregning af U-værdi for element

Elementets u-værdi beregnes ved brug af HEAT2, for at udrede om hvor meget det isolerer ydervæggen. Da elementet uden for opvarmningssæsonen skal være separeret fra væggen, udregnes først elementets egen U-værdi, derefter beregnes u-værdien for elementet og teglydervæg. Da teglydervæggen har to tykkelser gentages beregningen for dem begge. Endvidere skal elementet forbedre indeklimaet både i opvarmningssæsonen og udenfor. Til at eftervise en forbedringen i indeklimaet beregnes overfladetemperaturen for 350 mm teglydervæg, uden og med efterisolering med elementet.

#### 3.3.1. Beregning af elementets U-værdi i HEAT2.



Figur 5 - Isothermer - Temperaturforløb i element



Figur 6 - Elementopbygning i Heat2

Ved brug af egenskaberne for materialerne, der indgår i elementet, se: Tabel 1 - Egenskaber for materialer i element, beregnet med HEAT2, fås en gennemsnitlig U-værdi for elementet på 0,24 [W/m<sup>2</sup>K]. Bilag 3

Ved beregningen er regnskærm og forskalling for regnskærm erstattet af den indvendige overgangsisolans på 0,13 [m<sup>2</sup>K/W], som foreskrevet for ventilerede hulrum i DS418.

Den tilsvarende beregning efter DS418, dog uden at inkludere beslagene giver: 0,21 [W/m<sup>2</sup>K], se Bilag 4

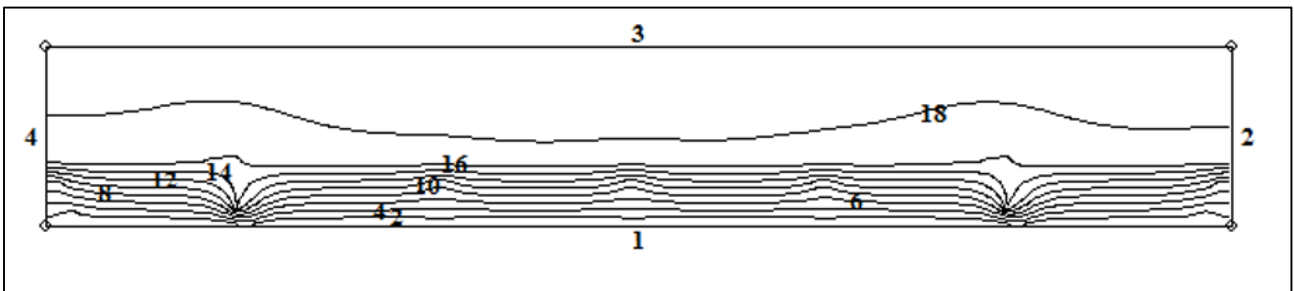
Når elementet er monteret som isolering i opvarmningssæsonen er der behov for den samlede u-værdi for element og teglydervæg derfor er der lavet flere beregninger af U-værdier, for de to tykkelser teglvæg elementet er monteret på.

U-værdien kan forbedres ved at anvende alternative isoleringsmaterialer som PUR skum med gasfyldning i stedet for atmosfærisk luft i hulrummene.

### 3.3.2. Beregning af U-værdi og overfladetemperatur for teglydervæg og element



Figur 7 – Forsatsvæg på 350 mm. Tegl ydervæg modelleret i HEAT2



Figur 8 - Isothermer for Ydervæg med element

Ved simulering er U-værdien for ydervæg på 350 mm tegl med forsatsselement monteret beregnet i HEAT2 til 0,21 [W/m<sup>2</sup>K], og overfladetemperaturen beregnet til 19,3 [°C]. Bilag 5

Tilsvarende beregninger er foretaget for 480 mm teglydervæg, og resultaterne for teglydervæg og efterisolering er U-værdi på 0,20 [W/m<sup>2</sup>K], og indvendige overfladetemperatur på 19,4 [°C]. Bilag 6

For beton kælderydervæg er resultaterne en U-værdi på 0,23 [W/m<sup>2</sup>K] og overfladetemperatur på 19,3 [°C].

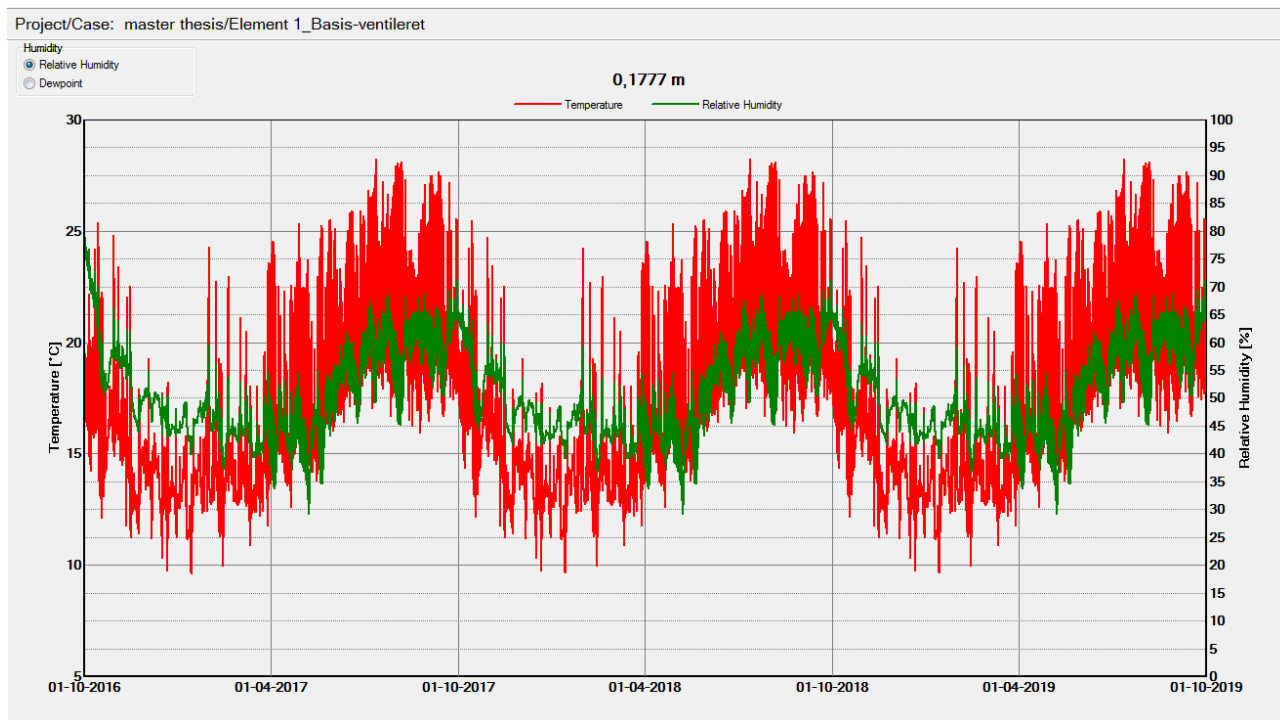
### 3.4. Fugtberegning i WUFI Pro

Da elementet udsættes for fugt, både fra udeklimaet og den fugt der kan diffundere ud gennem teglvæggen fra indeluften, kontrolleres ved en beregning i WUFI Pro, at der ikke opstår en kritisk relativ luftfugtighed i elementet så der kan ske kondensation af fugt i de udsatte konstruktioner.

Det værste sted der kan opstå kondensation vil være i den sammensatte konstruktion bestående af træelement med isoleringen. Hvis der opstår kondens deri, og fugten ophobes, kan træet risikere at nedbrydes af råd og svamp.

Beregningen i WUFI Pro inkluderer luftfugt i indeluften og den luftfugt i udeklimaet, samt belastningen fra regn. Fugten fra indeluften kan diffundere ud gennem teglvæggen og trænge videre ud i elementet. Derfra skal den transporteres videre ud gennem elementet til udeluften, der har et lavere fugtindhold end indeluften.

For en udvalgt del af klimaskærmen vises resultatet af fugtsimuleringen se Figur 9



Figur 9 - Fugtindhold i isoleringslaget

### 3.5. Opsummering af elementopbygningen

Beregningen i WUFI af element og ydervæg viser at der ikke ophobes vand gennem året. På de mest kritiske steder i konstruktionen, i isoleringen, kommer den relative fugtighed sjældent over 70 [%RF]. Så risikoen for nedbrud forårsaget af fugt er meget lille.

Det ses af rapporten fra WUFI at alle komponenterne i løbet af den treårige simuleringsperiode har mindre vandindhold i slutningen af perioden. Bilag 7 WUFI rapport

Elementets opbygning og størrelse er dikteret af ydre omstændigheder som dimension på materialer, og ønsket om at kunne udføre efterisoleringsarbejdet uden at skulle søge om byggetilladelse. Det sidste medfører at det maksimalt må være 250 mm tykt, hvilket ved brug af almindelige byggematerialer sætter begrænsninger for den isoleringsevne elementet kan yde. Elementets højde bør ved anvendelse af den ventilerede facade ikke overstige den dimension pladematerialet der bruges som vindspærre kan leveres i, da det vil medføre samlinger i lodrette bygningsdele, der kan lade elementets vindspærre sårbar for fugt der trænger gennem regnskærmen.

U-værdien for elementet kan forbedres ved at anvende isoleringsmaterialer med en lavere varmeledningsevne eller ved at lave elementerne mere end 250 mm tykke.

Fugtteknisk fungerer elementet monteret på teglvæggen uden problemer, det eftervises ved brug af WUFI Pro, at der ikke ophobes vand i konstruktionen.

Forbedringen af det termiske indeklima, den kolde ydervæg bliver forbedret væsentlig ved at efterisolere med elementerne, ændringen af overflade temperatur fra 16,6 [°C] til 19,3 [°C] vil føles som en stor ændring af kuldstrålingen fra væggens overflade.

## 4. Rentabilitet af investering

Til at konstatere om den valgte form for efterisolering er rentabel, beregnes bygningens energiforbrug i programmet Be15, i to situationer, 1, som eksisterende, og 2 med påmonterede præfabrikerede elementer. Forskellen mellem de to situationer udgør den beregnede energibesparelse.

- For at kunne beregne om det er en rentabel investering, beregnes besparelsen og der anslås en investeringssum for produktion og montage af elementerne.
- Rentabiliteten beregnes for en periode på 30 år, da det vil være den typiske tilbagebetalingstid for kreditforeningslån.
- Der beregnes tilbagebetalingstiden for investeringen ved 2 rentesatser 0% - 2,5%

### 4.1. Opmåling af bygning til bestemmelse af energiforbrug i Be15

I Tabel 2, er opmålingen af bygningens klimaskærm opsat i tabel sammen med parametre der er indsat i Be15 til beregning af bygningens energiforbrug, herunder de U-værdier den nye isolering vil medføre.

Inddata til Be15			
Eksisterende bygning	Eksist. væg		Med element
	U-værdi	Arealer	U-værdi
35 cm teglvæg	1,3	196,51	0,213
48 cm teglvæg	1,1	179,64	0,204
49 cm beton	2,0	32,20	0,232
Tag	0,17	148,12	
Terrændæk	0,27	132,02	
Vinduer	1,0	Bilag 8	
Linietaf			
Fundament	0,42	32,2	
Vinduer og døre	0,11	305,26	0,03

Tabel 2 - Skematisk oversigt over bygningens isoleringsværdier

### 4.2. Fastsættelse af de øvrige nødvendige faktorer.

I Be 15 beregnes hele bygningens energiforbrug, da beregningen udføres for at opklare om efterisolering er rentabel, er værdier for energiforbrug til ventilation, varmt brugsvand og varmetab fra installationer fastsat ud fra løse betragtninger om deres reelle værdier.

Ventilation er anslået ud fra bygningsreglementets krav om udsugning i køkken og bad, hvilket giver en værdi på 0,47 [l/s\*m<sup>2</sup>]

Nøgletal, kWh/m <sup>2</sup> år			
Renoveringsklasse 2			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
114,1	0,0	114,1	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>166,9</b>	
Renoveringsklasse 1			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
54,6	0,0	54,6	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>166,9</b>	
Energiramme BR 2015			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
31,3	0,0	31,3	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>142,0</b>	
Energiramme Byggeri 2020			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
20,0	0,0	20,0	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>105,3</b>	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	124,0	Rumopvarmning	119,7
El til bygningsdrift	17,1	Varmt brugsvand	13,1
Overtemp. i rum	0,0	Køling	0,0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	4,3
Opvarmning af rum	0,0	Varmt brugsvand	0,0
Opvarmning af vbv	13,1	Ydelse fra særlige kilder	
Varmepumpe	0,0	Solvarme	0,0
Ventilatorer	3,9	Varmepumpe	0,0
Pumper	0,0	Solceller	0,0
Køling	0,0	Vindmøller	0,0
Totalt elforbrug	46,5		

Nøgletal, kWh/m <sup>2</sup> år			
Renoveringsklasse 2			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
114,1	0,0	114,1	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>110,4</b>	
Renoveringsklasse 1			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
54,6	0,0	54,6	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>110,4</b>	
Energiramme BR 2015			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
31,3	0,0	31,3	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>97,4</b>	
Energiramme Byggeri 2020			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
20,0	0,0	20,0	
<b>Samlet energibehov</b>		<b>72,4</b>	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	65,0	Rumopvarmning	60,7
El til bygningsdrift	17,1	Varmt brugsvand	13,1
Overtemp. i rum	2,5	Køling	0,0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	4,3
Opvarmning af rum	0,0	Varmt brugsvand	0,0
Opvarmning af vbv	13,1	Ydelse fra særlige kilder	
Varmepumpe	0,0	Solvarme	0,0
Ventilatorer	3,9	Varmepumpe	0,0
Pumper	0,0	Solceller	0,0
Køling	0,0	Vindmøller	0,0
Totalt elforbrug	46,5		

Figur 11 - Be15 beregning eksisterende bygning

Figur 11 - Be15 beregning med efterisolering

Vinduer er udskiftet i 2010 til lavenergivinduer efter datidens standard, og har en estimeret U-værdi på 1,0 [W/m<sup>2</sup>K] og en g-faktor på 0,63.

Varmeanlægget er udført med udetemperatur kompensering, hvilket medfører at fremløbstemperaturen reduceres uden for opvarmningssæsonen.

### 4.3. Bygningens energiforbrug

Ved indtastning af ovenstående data i BE15, opnås et resultat for den eksisterende bygning på 166,9 [kWh/m<sup>2</sup> år]

Når beregningen i Be15 gentages med præfabrikerede elementer monteret, giver det et energiforbrug på 110,4 [kWh/m<sup>2</sup> år]

Hvilet medfører en energi besparelse på 56,5 [kWh/m<sup>2</sup> år] ved efterisolering med de præfabrikerede elementer.

Efterisoleringen vil medføre en reduktion af energiforbruget på 0,076 [kWh/m<sup>2</sup> år] pr m<sup>2</sup> beboelsesareal. For klimaskærmen, ydervæggene, er besparelsen 0,138 [kWh/m<sup>2</sup> år] pr m<sup>2</sup> ydervæg.

### 4.4. Energipriser

Almindeligvis bliver rentabilitetsberegninger udført med den øjeblikkelige energipris. Det er usikkert hvad fremtidige energipriser reelt vil være. Et studie {Morelli, Harrestrup og Svendsen, 2013} viser at prisen for fjernvarme i Danmark omkring år 2040 kan forventes at koste omkring 0,15 [Euro/kWh] svarende til 1,12



[DKK/kWh]. Studiet inkluderer forventningerne til udviklingen af det danske fjernvarmenet. Fjernvarmenettet forventes omstillet til vedvarende energi, og de forventede omkostninger til drift og vedligehold samt energiskat inkluderes.

Nutidens energipris (2015) på fjernvarme hos Horsens Fjernvarmeværk er 0,66 [DKK/kWh].

Til at beregne besparelsen på energi over en årrække ud i fremtiden – 30 år – antages at en vægтет gennemsnitlig pris kan være repræsentativ. Så til beregning af rentabiliteten, fremskrives prisen i 2045 til 1,31 [DKK/kWh], og den gennemsnitlige pris for energi i 2030 antages til 0,98 [DKK/kWh].

#### 4.5. Pris på præfabrikeret element

Et præfabrikeret element svarende til det i kapitel 3 designede, er beregnet i Sigma Enterprise, V&S prisbog til at koste ca. 1600 [DKK/m<sup>2</sup>], eksklusiv Moms.

Så monteret på bygningen vil et element inklusiv moms koste 2000 [DKK/m<sup>2</sup>].

Herudover kommer udgifter til montage af elementer på bygningen, de anslås til ca. 250 [DKK/m<sup>2</sup>].

Prisen for at efterisolere bygningen vil være 2250 [DKK/m<sup>2</sup>].

(21)35.13.01 Træskelet 50 x 125 mm med fibercementplader											
Position	Nr	Tekst	*	Kategori	Enhed	Mængde	Enhedspris	Kostpris	Samlet EP	Samlet KP	Prisreg.
								<b>1.619,34</b>		<b>1.619,34</b>	
1.1.1.1	04.20.10,01	50 x 100 mm tømmer i træskelet	TE	[blandet]	lbm	2,8	64,67	181,07	64,67	181,07	1
1.1.1.2	04.20.10,02	50 x 125 mm tømmer i træskelet	TE	[blandet]	lbm	2,8	71,33	199,72	71,33	199,72	1
1.1.1.3	04.21.10,06	Ankerbolte 16 x 250 mm vfz. stål	TE	[blandet]	stk	0,3	53,94	16,18	53,94	16,18	1
1.1.1.4	04.21.45,03	BMF universalbeslag, type 130 / 17 søm	TE	[blandet]	stk	0,5	66,46	33,23	66,46	33,23	1
1.1.1.5	04.21.45,05	BMF vinkelbeslag, type 90 m/ribbe 20 søm	TE	[blandet]	stk	4,5	52,04	234,19	52,04	234,19	1
1.1.1.6	04.21.52,07	BMF vindtrækbånd, type 40 x 2 mm 3,1 søm	TE	[blandet]	lbm	0,25	51,38	12,85	51,38	12,85	1
1.1.1.7	04.22.50,01	Membran, asfaltpap 0,6 kg/m <sup>2</sup>	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	29,11	29,11	29,11	29,11	1
1.1.1.8	04.22.50,03	Membran, 0,15 mm plastfolie	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	21,89	21,89	21,89	21,89	1
1.1.1.9	04.23.21,04	Cembrit, 8 mm plan facadeplade, Perle	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	482,35	482,35	482,35	482,35	1
1.1.1.10	04.23.39,04	Træunderlag 200 mm mellemrum ml. brædder	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	71,30	71,30	71,30	71,30	1
1.1.1.11	04.23.48,03	Indv. beklædning 12,5mm gips synligt lag	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	102,33	102,33	102,33	102,33	1
1.1.1.12	04.23.12,03	Afstandsliste t/væg 25x95 mm pr. 600 mm	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	1	33,99	33,99	33,99	33,99	1
1.1.1.13	04.22.01,11	Murpap for radonspærre under 300 mm	TE	[blandet]	lbm	0,42	54,54	22,91	54,54	22,91	1
1.1.1.14	04.22.05,03	95 mm mineraluld kl. 37 trækonstruktion	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	0,92	86,60	79,67	86,60	79,67	1
1.1.1.15	04.22.05,04	120 mm mineraluld kl. 37 trækonstruktion	TE	[blandet]	m <sup>2</sup>	0,92	107,09	98,53	107,09	98,53	1

Figur 12 - Pris for et tilsvarende præfabrikeret element beregnet i Sigma

#### 4.6. Forrentning af investering

For at få en reel pris på investeringen, skal renteudgifterne inkluderes, Derfor laves der beregninger der vil anslå hvor stor investeringen vil være med en rentesats på 2,5%, hvad der svarer til et almindeligt tilgængeligt kreditforeningslån. Ved optagelse af et almindeligt tilgængeligt kreditforeningslån på 30 år. Elementet forventes at have en mindste levetid for på 30 år. Udgifter til drift og vedligehold vurderes at være minimale på grund af konstruktionens opbygning, og inddrages derfor ikke i beregning af rentabiliteten.

Ved en besparelse på 56,5 [kWh/m<sup>2</sup> år] og en energipris på 0,98 [DKK/kWh], kan der ved efterisolering være en besparelse i energjudgiften på 55,5 [DKK/m<sup>2</sup> år]. Over en periode på 30 år vil det blive en besparelse på 1664 [DKK/m<sup>2</sup>].

0% rente,

Hvis investeringen kan foretages uden tanke på rentebidrag vil investeringen over 30 år, bliver en investering i efterisolering på 1664 [DKK/m<sup>2</sup>] facadevæg rentabel.

2,5%rente,

Med en rente på 2,5% kan der investeres ca. 1161 [DKK/m<sup>2</sup>] facade.

Med en pris for elementer på 2250 [DKK/m<sup>2</sup>] og en rente på 2,5%, sammenholdt med den beregnede årlige besparelse, vil besparelsen som er afdrag på lånet ikke kunne betale renterne på lånet.

#### 4.7. Diskussion af rentabilitet og energibesparelse

Med det valgte element, og dermed den besparelse der opnås, vil det ikke kunne betale sig at efterisolere bygningen.

Elementet er dimensioneret til at være mindre end 250 mm tykt, for at arbejdet skulle kunne udføres uden at søge byggetilladelse.

Med en bedre isolering i samme tykkelse, eller et tykkere element med mere isolering, vil den årlige besparelse blive større, og det vil forbedre mulighederne for at projektet bliver rentabelt. En bedre isolering og et tykkere element vil dog nok medføre en højere pris, og vil derfor ikke have den fulde ønskede effekt for rentabiliteten.

Elementets levetid uden merudgifter til drift og vedligehold kan nok diskuteres. En regnskærm af keramisk materiale og vindspærre af fibercement, har meget lang levetid og meget lidt behov for vedligehold.

Elementets indre bestående af træ og isolering er velbeskyttet, og vil ikke kræve vedligehold.

Energiprisen der er benyttet til udregningen har en del usikkerheder tilknyttet, en væsentlig del af usikkerhederne har en politisk baggrund, såsom fjernvarmeværkernes fremtid og den mulige omlægning til andre energiformer. Det anses for sandsynligt at energipriserne vil udvikles som anslået i den nævnte artikel.

## 5. Beregning af effekt af det ventilerede hulrum

For at bestemme om etableringen af et hulrum i konstruktionen, har den ønskede kølende effekt, bestemmes temperaturforløbene gennem konstruktionen. Beregningen vil koncentrere sig om klimaskærmens varmebalance og dermed effekterne af den energi der overføres til luften i hulrummet fra de omgivende flader. Der vil være tilførsel af energi fra den eksisterende teglvæg, hvis indetemperaturen er højere end temperaturen af luften i hulrummet. Samtidig tilføres der energi fra forsatsvæggen når den er udsat for varmestråling fra solen. Det medfører at den mest interessante, og derfor valgte situation er for en sydvendt væg.

Det vil kræve en beregning af de tre former for varmetransport: ledning, stråling og konvektion for den samlede konstruktion.

Beregningsværktøjerne er samlet fra DANVAKS grundbog i varme og klimateknik og Varmeteorologi for masteruddannelsen.

### 5.1. Varmeledning i faste materialer

Varmeledning er transporten af varmeenergi gennem et eller flere materialer der er sammensat uden hulrum, energitransporten er molekylebevægelser der forplanter sig gennem materialet. Energi vil altid gå fra et højt energi niveau mod et lavere energi niveau, så varmestrøm vil bevæge sig fra en høj temperatur mod en lavere temperatur. Varmestrømmen gennem et materiale afhænger af materialets varmeledningsevne og

$$\phi = \lambda * \frac{A}{d} * \Delta\theta$$

Ligning 1 - Fouriers varmeledning ligning

temperatur forskellen mellem de to modstående sider.

I Fouriers varmeledning ligning er varmestrømmen  $\phi$ , bestemt ved materialets varmeledningsevne  $\lambda$ , materialets areal  $A$ , materialets tykkelse  $d$  og temperaturforskellen  $\theta$  mellem de to sider af materialet. Ligningen beskriver hvor meget energi der transporteres gennem et materiale ved en given temperaturforskelle.

$$q_s = \frac{1}{R_s} * (\theta_a - \theta_s)$$

Ligning 2 - Ligning for varmeovergang

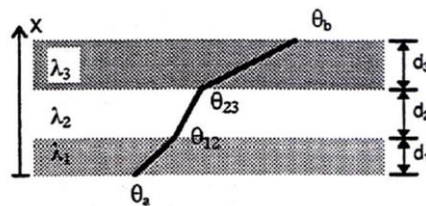
Hvor varmetransporten  $q_s$  gennem et materiale er beregnet som materialets isolans  $R_s$ , multipliceret med temperaturforskellen over materialet. Hermed kan varmetransporten gennem en sammensat konstruktion beregnes ved at addere isolanserne for flere materialer.

Med nogle få omskrivninger, kan ligningen beskrive en temperaturforskkel ved en kendt varmestrøm og starttemperatur gennem et materiale:

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{d * \phi}{A * \lambda}$$

Ligning 3 - Omskrevet Fouriers varmeledningsligning

Ligning 3 kan nu udtrykke temperaturforskellen mellem to overflader som en funktion af varmestrøm og et materiales varmeledningsevne og tykkelse.



Figur 13 - Varmeledning gennem sammensatte materialer i en konstruktion

Fouriers formel beskriver varmetransport gennem massive homogene materialer med kontakt mellem overfladerne.

Til at beregne temperaturen i specifikke lag gennem konstruktionen må antages konstante parametre omkring varmetransporten og isoleringsevnen af de forskellige lag. Se Figur 13

## 5.2. Varmeledning til luft

Da fugtig luft er en kombination af forskellige gasser og vanddamp, skal beregningerne tage hensyn til sammensætningen af gasarterne. Ved beregning af varmeledningsevnen for gasarter beregnes den samlede entropi for gassen. Tør atmosfærisk luft og vanddamp har ikke samme varmeledningsevne. Derfor skal entropien for fugtig luft bestemmes ud fra den mængde vanddamp der er i et kg tør luft. Massen af atmosfærisk luft afhænger af temperatur og tryk, for almindelig atmosfærisk tryk og temperaturer mellem -20[°C] og 50 [°C] regnes med nogle standard parametre. Massen af vand i et kg luft er bestemt af den relative luftfugtighed.

$$\Phi = C_p * q_m * (t_1 - t_2)$$

Ligning 4 - Varmeligning for idealgas

$\Phi$  Varmestrøm – summen af varmestrøm fra de to overflader  
 $C_p$  specifik varmekapacitet luft.  
 $q_m$  Luftmængde gennem hulrummet  
 $t_1$  start temperatur luftstrøm  
 $t_2$  slut temperatur luftstrøm

### 5.3. Varmestråling

Varmestråling sker hvor modstående flader har forskellig temperatur.

Strålingen afhænger af overfladens emissionstal, der er angivet som et enhedsløst forholdstal, der beskriver forholdet mellem varmemestrålingen fra et sort legeme sammenholdt med andre materialer. Stråling afgives og modtages af alle overflader. Mængden afhænger af temperaturforskellen, og materialets evne til at absorbere eller reflektere strålingen. Varmestråling består af 3 dele, absorption  $\alpha$ , refleksion  $\rho$ , og transmission  $\tau$ , hvor summen af de tre dele udgør den samlede strålingsenergi, forudsat der ikke udvikles varme i legemet.

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Ligning 5 - Strålings delkomponenter

Hvis der udvikles varme forårsaget af faktoren  $\alpha$ , i legemet bliver beregningen ikke stationær, og der skal der indregnes faktorer som varmekapacitet og varmediffusionsevne, samt en tidsfaktor. Det vil komplicere beregningerne af varmebalancerne for hulrummet og kan ikke umiddelbart udføres med de simple værktøjer der er til rådighed for undersøgelsen. (Se diskussion kapitel 5.8)

### 5.4. Konvektion

Konvektion kan opstå i hulrum, fyldt med luft og væsker, hvis der er en temperaturforskel over overfladerne. Konvektion opstår fordi kold luft er tungere end varm luft. Når kold luft tilføres energi, bliver den lettere og vil forsøge at strømme op i gennem hulrummet.

Opvarmningen af luft ved konvektion kan kun vanskeligt beregnes, men den kan bestemmes eksperimentelt ifølge Varmelære teori for Master i bygningsfysik, 2014. Ved eksperimenter er bestemt at konvektionsdelen i en konstruktion kan bestemmes efter:

$$k = \Phi_k * \frac{d}{A * (\theta_1 - \theta_2)}$$

Ligning 6 - Ligning for beregning af konvektionsdel

I formlen indgår konvektionsfaktoren  $k$ , der i øvrigt afhænger af luftens viskositet og friktionen i hulrummet,  $\Phi_k$  den konvektive varmetransport,  $d$  spalte bredden og  $A$  arealet der er berørt, endelig er temperaturerne  $\theta_1$  og  $\theta_2$  temperaturerne for overfladen og luften. For luft ved en gennemsnitstemperatur på 20°C og normal lufttryk er opstillet en tabel over  $k$  ved forskellige spaltebredder.

Spaltebredde [m]	Konvektionstal [W/mK]
0,001	0,0
0,1	0,002
0,02	0,01
0,05	0,05
0,1	0,12

Tabel 3 - Konvektionstal

Andelen af varmetab forårsaget af konvektion er meget vanskelig at bestemme, da der indgår parametre som lufthastighed, specifik temperatur for en specifik placering i hulrummet, og omgivelsernes ruhed, form og orientering, kilde: Varme og klimateknik, Danvaks grundbog, 2. udgave.

For at inddrage effekten af konvektion på overfladernes temperatur inddrages de i bygningsfysikken antagede overgangsisolanser.

Efter DS 418 antages at overgangsisolans for det ventilerede hulrum mellem eksisterende ydervæg og elementet opfylder betingelserne for ventilerede hulrum, hvor overgangsisolansen ved en vandret luftstrøm antages at være 0,13 [m<sup>2</sup>K/W]

	Varmestrømmens retning		
	Opad	Vandret	Nedad
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Tabel 4 - Overgangsisolans, Uddrag fra DS 418

## 5.5. Varmebalance for element

Eftersom målet med undersøgelsen er at bestemme om der er en effekt af at etablere et hulrum mellem isolering og eksisterende murværk, og der i beregningen indgår mange faktorer, er det bestemt at undlade beregningen af effekter forårsaget af den ventilerede regnskærm der indgår i designet af elementet, se Figur 4.

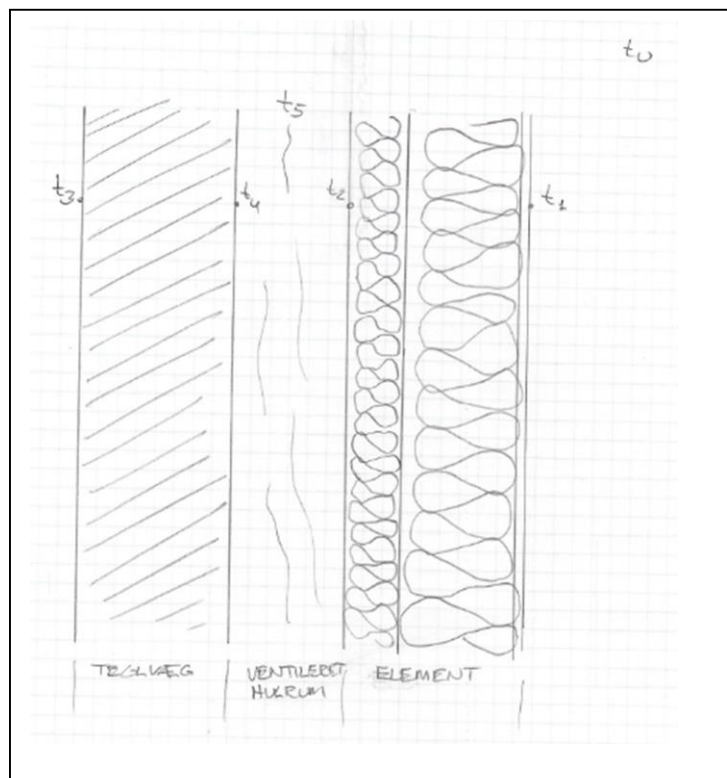
Der regnes med stationær varmeledning. Beregningerne udføres som om varmemstrømmen har en umiddelbar effekt i elementet, der tages ikke hensyn til at materialerne vil opvarmes over tid, og derved ændre tiden det tages for varmen at komme gennem elementet til hulrummet.

Beregningerne antages udført med data som de kan forekomme i forsommeren, specifikt er valgt at betragte især solindfald for april måned.

Betingelser:

- Statiske beregninger, der udvælges et antal situationer der gennemregnes.
- Indeklima 20, 25 og 30 [°C]
- Udeluft temperatur 10, 15 og 20 [°C]
- Energibidrag fra overflader
- Solbidrag for april

Elementet varmebalance vil vise hvilken retning og størrelse energistrømmene gennem elementet antager.



Figur 14 - Skitse af ventileret hulrum

I Figur 14, er vist elementets opbygning og nogle udvalgte temperaturer der vil være interessante at betragte for derigennem at kunne bestemme overflade- og luft- temperatur i spalten. Varmebalancen er bestemt af ydre forhold som temperaturer og vindpåvirkning samt solstråling.

Antagelser for beregninger:

- Effekten af en luftstrøm gennem hulrummet mellem element og teglvæg, forudsætter at temperaturen af luftstrømmen gennem luftspalten ikke bliver højere end temperaturen inde.
- Luften opvarmes ved varmeledning fra overfladerne i hulrummet, konvektion fra overfladerne i hulrummet inddrages ikke i beregningen.
- Hulrummet ventileres med en luftmængde der kan optage hele varmestrømmen der kommer gennem element og teglvæg. Dermed bliver temperaturerne for de to overflader så ensartede at strålingsbidrag fra overfladerne bliver meget små, strålingsbidrag for overfladerne i hulrummet indregnes derfor ikke.
- Beregning foretages for forskellige ude og inde temperaturer. De valgte temperaturer kan forekomme i forår og efterår, hvorfor data for udeklima, solstråling og luftfugtighed er valgt som de kan forekomme i april.
- Sydvendt facade med solstråling

Opvarmning af luften i hulrummet beregnes derfor ud fra følgende parametre:

Tilførsel af energi til luft:

- Varmeledning fra de to overflader der vender mod hulrummet
- Overfladetemperaturer for de to overflader mod hulrummet
- Fugtig lufts varmekapacitet
- Luftmængde der strømmer gennem hulrummet
- Udeluft temperatur

$$t_5 = \frac{\Phi}{C_p * q_m} + t_{2-4}$$

Ligning 7 - Beregning af lufttemperatur

$T_5$  er slut temperatur luftstrøm

$\Phi$  Varmestrøm – summen af varmemstrøm fra de to overflader

$C_p$  Specifik varmekapacitet luft. For fugtig luft bruges i stedet Entalpi "l" for fugtig luft (varmekapacitet tør luft, og Varmekapacitet for vandindhold)

$q_m$  Luftmængde gennem hulrummet -

$t_{2-4}$  Start temperatur luftstrøm (= udetemperatur + tillæg for varmemstrøm fra tidligere passerede overflader)

I de efterfølgende kapitler behandles følgende parametre:

$T_5$  er slut temperatur luftstrøm beskrives i kapitel 5.7

$\Phi$  Varmestrøm – beregnes i som vist kapitel 5.5.2

I Entalpi fugtig luft - beregnes som vist i kapitel 0

$q_m$  Luftmængde gennem hulrummet - beregnes som vist i kapitel 5.7

Beregning af luftmængder

$$q_m = \frac{\Phi}{C_p * \Delta t}$$

Ligning 8 - Beregning af luftmængder

$q_m$  Luftmængde gennem hulrummet

$\Phi$  Varmestrøm – summen af varmemstrøm fra de to overflader

$C_p$  Specifik varmekapacitet luft. For fugtig luft bruges i stedet Entalpi "l" for fugtig luft (varmekapacitet tør luft, og Varmekapacitet for vandindhold)

$\Delta t$  er temperaturforskellen mellem overflader og luft i hulrummet



## 5.5.1. Entalpi, I, energi i fugtig luft

Fugtig lufts varmekapacitet er afhængig af temperaturen og vandindholdet.

I temperaturområdet -20[°C] til 50[°C] vil værdierne  $C_p$  for vand og luft kunne antages at være stabile ved at bruge værdierne  $C_{pl}$  (luft) som 1,006 [kJ/kg K] og  $C_{pv}$  (vand) som 1,8 [kJ/kg K]. Kilde: DANVAK

For at beregne Entalpi for fugtig luft, beregnes faktorerne  $h_l$  og  $h_d$ , der er den specifikke entalpi for henholdsvis luft og vand. Den fælles entalpi kan beregnes som Ligning 9 - Beregning af Entalpi for fugtig luft

$$I = 1 * h_l + x * h_d$$

Ligning 9 - Beregning af Entalpi for fugtig luft

Hvori:

$h_l = C_{pl} * t$ , [kJ/kg K]. specifik entalpi tør luft, beregnet af den specifikke varmekapacitet for luft multipliceret med temperaturen.

$h_d = 2501 + C_{pd} * t$ , [kJ/kg K]. specifik entalpi vanddamp, beregnet af den specifikke varmekapacitet for vand multipliceret med temperaturen adderet med vands fordampningsvarme.

$x$  er vandindholdet i kg

$t$  er her temperaturen i [°C].

$$I = 1,008 * t + x * (2501 + 1,08 * t)$$

Ligning 10 - Beregning af specifik Entalpi

Temperatur	RF	Vandmængde kg H <sub>2</sub> O/kg tør luft
10	80%RF	0,005
15		0,085
20		0,0118

Tabel 5 - Vandindhold i fugtig luft

Resultat for nærværende undersøgelse er, at når entalpien ændres, og fugtindholdet holdes konstant vil resultatet være en temperaturændring af den fugtige luft.

Vandindhold aflæst i IX diagram se bilag 9

### 5.5.2. $\Phi$ Varmestrøm – summen af varmemstrøm fra de to overflader

Varmestrømmen gennem de to overflader,

Overflade 1, (element mod hulrum) og overflade 2 (teglvæg mod hulrum). Det antages at luftstrømmen kan optage hele energistrømmen fra de to overflader. Se Figur 14.

#### 5.5.2.1. Overflade 1

Betingelser:

- Sydvendt facade, klar himmel – solstråling
- Udvendig overflade udsat for konvektion, solstråling og varmeledning.
- Indvendige overflader mod hulrum har så ensartede temperaturer at strålingsudveksling mellem de to overflader er irrelevant.
- Indvendige overflader regnes uden konvektion til trods for varmebidrag ventileres bort.

Varmestrømmen fra overfladen på elementet har udgangspunkt i elementets varmebalance.

Elementets indvendige overflade er kun påvirket af lufttemperatur og stråling, derfor regnes med overgangsisolanser som foreskrevet i DS418.

$$q_s = U_s * (t_a - t_s)$$

Ligning 11 - Ligning for varmeledning gennem element

Hvor:

$q_s$  er varmemstrømmen gennem elementet

$U_s$  er elementets varmeledningsmodstand

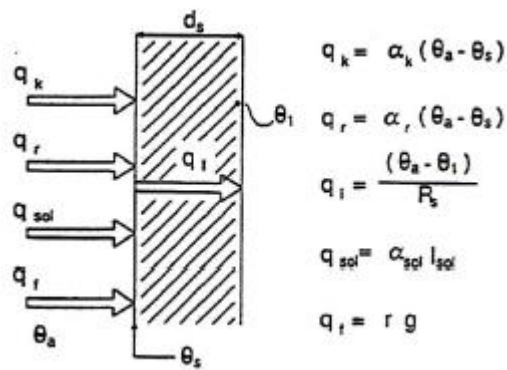
$t_a$  er overfladetemperaturen udvendig

$t_s$  er overfladetemperaturen i hulrummet = lufttemperatur.

Beregning for  $U_s$  er vist i bilag 4, den er forskellig fra  $U$ -værdien beregnet i HEAT2 tidligere i rapporten, da her er foretaget forsimplinger af elementet og der beregnes med overgangsisolanser efter DS418.

Lufttemperaturen antages som nævnt tidligere i kapitel 5.5.

Varmeledningen gennem elementet er forårsaget af bidrag fra konvektion  $q_k$ , modstråling  $q_r$ , solstråling  $q_{sol}$ , fugtudveksling med omgivelserne  $q_f$ , og temperaturen af de to overflader. Temperaturen  $t_1 = t_{ou}$ , den udvendige overfladetemperatur, er beregnet ud fra lufttemperaturen, konvektion og stråling. Se Figur 14 og Figur 15



Figur 15 - Varmeledning gennem element

$$q_l = q_k + q_r + q_{sol} + q_f$$

Ligning 12 - Varmebalance for udvendig facadeelement

$$t_1 = \frac{\frac{1}{R_s} * t_l + \alpha_k * t_a - \varphi_s + \alpha * H}{\frac{1}{R_s} + \alpha_k}$$

Ligning 13 - Beregning af overfladetemperatur facadeelement

Hvor:

$R_s$  er elementets varmeledningsevne uden udvendig overgangsisolans

$T_1 = t_{ou}$  er den udvendige overfladetemperatur

$t_1 = t_2$  Indvendige overfladetemperatur på element

$t_a = t_u$  Lufttemperatur

$\alpha_k$  Konvektivt varmeovergangstal se afsnit 0

$\varphi_s$  Varmestrøm afgivet ved stråling se afsnit 5.5.2.1.2

$\alpha$  Væggens absorptionstal for solstråling, for tegl og beton 0,93, Varmeteorologi for masteruddannelse

$H$  Solintensitet lodret flade, april lodret flade [895 W/m<sup>2</sup>], se Bilag 7

**5.5.2.1.1. Konvektivt overgangstal  $\alpha_k$** 

For udvendige vægoverflader er det konvektive overgangstal afhængig af vindhastigheden og det længden af det areal der betragtes. Kan antages at være mellem 5 og 25 [W/m<sup>2</sup> K]

$$\alpha_k = 18 * \sqrt{\frac{v}{L}}$$

Ligning 14 - Beregning af konvektivt overgangstal

Vindhastighed er, den meteorologiske lufthastighed, der måles i 10 m. højde og L er bredden af den berørte facade.

Her antages at  $\alpha_k$  er 9 [W/m<sup>2</sup> K]

Det vil svare til en vindhastighed på omkring 4 [m/s], hvilket svarer til en let vind. (4 [m/s] er valgt for at give resultatet et simpelt heltal.)

L er facadens længde 16,1 [m].

**5.5.2.1.2. Varmestrøm afgivet ved stråling**

$$\varphi_s = \varepsilon_{12} * \sigma * A * (T_{ou}^4 - T_g^4)$$

Ligning 15 - Beregning af strålingstemperatur

$\varepsilon_{12}$  Emissionstal

$\sigma$  Stefan - Boltzmanns konstant: 5,672E-08 [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

A det berørte areal = 1 [m<sup>2</sup>]

$T_{ou}$  temperatur af overfladen anført i [°K] =  $t_1$

$T_g$  den effektive modstrålingstemperatur anført i [°K], DANVAK figur 3.44 se også Tabel 6

$\varepsilon_{12}$  Emissionstal

Tal for vægtet strålingsudveksling, når arealet af den beregnede overflade er meget mindre end den modstående overflade gælder tallet for den beregnede overflade.

Tal for emissivitet af overflade for materiale, regnskærm som mørk tegl/beton 0,93 for de fleste byggematerialer omkring 0,9, Varmeteorier for Masteruddannelsen.

$\sigma$  Absorptionstal mellem de to overflader gælder ved små temperaturforskelle

$T_g$  for anvendte ude luft temperaturer, lodrette flader: Tabel 6

Lufttemperatur	Modstrålingstemperatur	$T_g$
°C	°C	°K
10	5	278
15	10	283
20	15 (udenfor skala)	288

Tabel 6 - Effektiv modstrålingstemperatur

## 5.6. Beregning af varmestrømme til hulrum

Varmebidraget fra elementet beregnes ved at opstille varmebalancen for elementet.

Først beregnes den udvendige overfladetemperatur for elementet.

Indgangsdataene er solstråling, overfladetemperatur, og den resulterende acceptable middeltemperatur i hulrummet. Den resulterende acceptable middeltemperatur i hulrummet er fastsat ved at antage en resulterende temperaturforøgelse pr meter overflade, forårsaget af varmestrømmen fra overfladerne.

Overfladetemperaturen  $t_{ou}$  fastsættes ved gentagne indtastninger af værdier, indtil værdien er ens med den beregnede værdi overfladetemperatur.

Dernæst overføres data for acceptabel lufttemperatur til U-værdiberegningerne i Figur 17 og Figur 18, hvorefter varmestrømmene udlæses til skemaerne i Figur 19 og Figur 20.

Alle beregninger er vist i Bilag 11.

De herefter afbillede beregninger i Figur 16, Figur 18 og Figur 17, har indgangsparametrene:

- U-værdi for element se Figur 18
- U-værdi for teglvæg se Figur 17
- $t$ -hulrum =  $t_5$ , den resulterende temperatur der vil være ved en acceptabel temperatur stigning på  $0,4^\circ\text{C}$  pr meter luften transporteres gennem hulrummet, og hulrummets udstrækning er ved facade højde på 17 m.
- $t_u = t_1 = 20^\circ\text{C}$
- $t_i = t_3 = 30^\circ\text{C}$
- Konvektivt overgangstal  $\alpha_k$  som beskrevet i 5.5.2.1.1
- $\alpha$  Væggens absorptionstal for stråling 0,93, som beskrevet i 5.5.2
- H Solintensitet som beskrevet i 5.5.2
- $\varepsilon_{12}$  Emissionstal for overflade 0,93, som beskrevet i 5.5.2.1.2
- $\sigma$  Stefan – Boltzmanns konstant:  $5,672\text{E}-08$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$ ], som beskrevet i 5.5.2.1.2
- $T_g$ , modstrålingstemperatur som beskrevet i 5.5.2.1.2
- $T_{ou}$ , overfladetemperatur element, gættes indtil tallet svarer til overfladetemperatur.
- Varmestrøm afgivet ved stråling, som beskrevet i 5.5.2.1.2

Overfladetemperatur element			
U-værdi for Element	U	0,22	
vælges i forhold til højde 17m/6m	t - hulrum	26,8	Højder
	v	4	17 m
	L	16,1	6 m
	$\alpha_k$	9,0	fane: luftmasser
vælges som udetemperatur 10 / 15 / 20	$t_u$	20	acceptabel temperaturstigning
Indetemperatur 20 / 25 / 30	$t_i$	30	
	$\alpha$	0,7	
	H	895	
	$\varepsilon$	0,93	
afhængig af udetemperatur kap:55212	$T_g$	288	
	$\sigma$	5,67E-08	
	$T_{ou}$	331,50	Cpl
tou vælges til den er ens med overfladetemperatur	tou	58,504	1,006
	$\varphi_s$	274,15	cpd
	overfladetemperatur	58,504 gr C	ro
			2501

Figur 16 - Beregning af overfladetemperatur på element

I Figur 17 vises beregningen af temperaturfordeling og den resulterende varmestrøm gennem teglvæggen ved antagelse af de tidligere beskrevne faktorer for temperaturforhold og konstruktionens varmeledningsmodstand.

I beregningen for U-værdi teglvæg indgår overgangsisolanser som beskrevet i DS418, og varmeledningsevnen for tegl som  $1700 \text{ kg/m}^3$  udvendig murværk (DS418)

Beregning af U-værdi - teglvæg							
	Tykkelse m	Lambda W/mk	R m <sup>2</sup> K/W	Delta-T K	Temperatur C	Sum tyk	Sum R
Indetemp					30		
inv. overgang			0,13	0,54		-0,02	0,00
35 cm tegl	0,35	0,68	0,51	2,13	29,5	0	0,13
udv. overgang			0,13	0,54	27,3	0	0,64
temp i hulrum					26,8	0	0,77
		R-tot	0,77		3,2		
U-værdi	1,29	W/m <sup>2</sup> K	Kontrol	3,2			
			qs	4,13	W/m <sup>2</sup>		
			teglvæg	overføres til ARK luftmasser			

Figur 17 - U-værdi og varmestrøm for teglvæg

I Figur 18 vises beregningerne for varmestrømmen gennem elementet under forudsætning af de tidligere valgte parametre, Tabel 1, og overgangsisolanser efter DS418.

Beregning af U-værdi - Element							
	Tykkelse m	Lambda W/mk	R m <sup>2</sup> K/W	Delta-T K	Temperatur C	Sum tyk	Sum R
Temp i hulrum					26,8		0,00
inv. overgang			0,13	-0,78	27,6	0	0,13
70 mm isol 0,037	0,07	0,037	1,89	-11,33	38,9	0,07	2,02
125 mm element 0,05	0,125	0,05	2,50	-14,97	53,9	0,195	4,52
vindspærre	0,008	0,22	0,04	-0,22	54,1	0,203	4,56
udv. overgang			0,04	-0,24			
Tou					54,3	0,203	4,60
		R-tot	4,60		-27,5		
U-værdi	0,22	W/m <sup>2</sup> K	Kontrol	-27,5			
			qs	-5,99	W/m <sup>2</sup>		
			element	overføres til ARK luftmasser			

Figur 18 - U-værdi og varmestrøm for element

Resultatet fra U-værdi beregningerne er vist i bilag 11, hvor værdien  $q_s$ , den resulterende varmestrøm, overføres til skemaerne vist i Figur 19 og bilag 11. Beregningen for elementet Figur 18 viser en negativ værdi forårsaget af det negative temperaturforløb der benyttes i beregningen. Værdien transporteres med modsat fortegn til bilag 13 og Figur 19.

Varmeeffekt gennem de to konstruktioner – overført til skema fra bilag 11.

Hulrum i hele bygningens højde: 17 m.

Efter gentagne beregninger af overfladetemperaturer, forårsaget af de varierende ude- og inde-temperaturer, opsummeres i Figur 19 de resulterende varmestrømme. I kolonnerne for effekt til hulrum, er anført de udlæste værdier fra Bilag 11 for henholdsvis teglvæg og element. I cellen derunder er anført det samlede energitilskud til hulrummet.

acceptabel temperaturforskel		pr m <sup>2</sup>	17 m. høj bygning	0,4						
det vil medføre en temperatur stigning op gennem hulrummet på				6,8						
Indetemperatur				20		25		30		
Vandindhold		Densitet	l	effekt til hulrum		effekt til hulrum		effekt til hulrum		
udetemperatur	gH <sub>2</sub> O/kgluft	kg/M <sup>3</sup>	kJ/kg K	teglvæg	element	teglvæg	element	teglvæg	element	
10 (80%RF)				4,13	6,94	10,58	6,94	17,04	6,94	
tou=48,664				11,07		17,52		23,98		
	5	1,21	12,9074							
15 (80%RF)				-2,32	7,07	4,13	7,07	10,58	7,07	
tou=51,482				4,75		11,2		17,65		
	8,5	1,214	21,6609							
20 (80%RF)				-8,78	6,89	-2,32	6,89	4,13	6,89	
tou=55,504				-1,89		4,57		11,02		
	11,8	1,217	29,9142							

Figur 19 - Resulterende varmestrømme til hulrum ved 17 m høj hulrum

Beregningerne viser hvor meget energi der kan bortledes til hulrummet med de givne ude og inde temperaturer. Ved høje temperaturer i indeklimaet, og lave udetemperaturer kan der ledes en del energi bort fra bygningen.

Ved 30 [°C] inde og 10 [°C] ude kan der, ved de vedtagne forudsætninger, bortledes 17,04 [W/m<sup>2</sup>] gennem teglvæggen. Dertil kommer 6,94 [W/m<sup>2</sup>], så der skal bortventileres 23,98 [W/m<sup>2</sup>] fra hulrummet.

Fra skemaet ses at de celler der er markeret med orange er et negativt varmetilskud. Det er forårsaget af at temperaturen i hulrummet, er højere end temperaturen inde i bygningen, og resultaterne viser effekten af energistrømmene i det samlede hulrum i konstruktionen. Og i det givne tilfælde vil der være en varmestrøm fra hulrummet gennem teglvæggen mod "inde".

Med ventilationsspalte i hele bygningens højde og lave udetemperaturer, er det i de fleste tilfælde muligt at lede energi fra bygningen ud gennem teglvæggen til hulrummet.

I Figur 20 vises effekterne fra en mindre (6. m høj) lufthulrum. Ud fra figuren aflæses samme situation som ved det højere hulrum.

Ved høje ude temperaturer og lav inde temperatur kan temperaturen i luftspalten blive høj, og effekten af luftspalten udebliver. Ved højere inde temperaturer bliver det mulig at fjerne energi fra indeluften.

acceptabel temperaturforskel		pr m	6 m. høj bygning	0,4						
det vil medføre en temperatur stigning op gennem hulrummet på				2,4						
Indetemperatur				20		25		30		
vandindhold	Densitet	l		teglvæg		teglvæg		teglvæg		
gH <sub>2</sub> O/kgluft	kg/M <sup>3</sup>	kJ/kg K		W	W	W	W	W	W	
10 (80%RF)				9,81	8,18	16,26	8,18	22,72	8,18	
tou=48,664				10		24,44		30,9		
	5	1,21	12,9074							
15 (80%RF)				3,36	8,01	9,81	8,01	16,26	8,01	
tou=51,482				11,37		17,82		24,27		
	8,5	1,214	21,6609							
20 (80%RF)				-3,1	7,84	3,36	7,84	9,81	7,84	
tou=54,269				4,74		11,2		17,65		
	11,8	1,217	29,9142							

Figur 20 - Resulterende varmestrømme til hulrum ved 6 m høj hulrum

Ved det mindre, 6 m. høje, hulrum bliver det muligt at bortlede mere energi, end ved det høje hulrum. Her kan der ved 30 [°C] inde temperatur og 10[°C] udetemperatur bortledes 22,72 [W/m<sup>2</sup>] gennem teglvæggen til hulrummet.

Og ved højere udetemperatur, 30 [°C] inde temperatur og 20[°C] udetemperatur kan 9,81 [W/m<sup>2</sup>] bortledes til luftspalten.



Varmestrømme uden solstråling:

Overfladetemperatur element			
U-værdi for Element	U	0,22	
vælges i forhold til højde 17m/6m	t-hulrum	21,8	Højder
	v	4	17 m
	L	16,1	6 m
	αk	9,0	fane: luftmasser
vælges som udetemperatur 10 / 15 / 20	tu	15	acceptabel temperaturstigning
Indetemperatur 20 / 25 / 30	ti	25	+tu = t-hulrum
	α	0,7	+tu = t-hulrum
	H	0	
	ε	0,93	
afhængig af udetemperatur kap.55212	Tg	283	5, 10, 15
	σ	5,67E-08	
	Tou	286,37	Cpl
tou vælges til den er ens med overfladetemperatur	tou	13,374	1,006
	φs	16,42	cpd
	overfladetemperatur	13,374 gr C	ro
			2501
varmestrøm gennem element			
	φelement	-1,83 W	
Varmestrøm gennem teglvæg			
	U teglvæg	1,29	
	tinde	25	
	φteglvæg	4,13 W	

Figur 21 - Beregning af varmeeffekter uden solstråling

Beregningerne med solstråling på elementet Figur 21 og Bilag 12 viser beregning af varmeeffekt til hulrum for en nordvendt facade, eller facade uden direkte solstråling.

For en nordvendt facade, eller en facade solstråling, vil energistrømmen der skal bortventileres kun bestå af varmestrømmen inde fra bygningen.

For en 17 m. høj facadevæg og udetemperatur på 15 [°C], inde temperatur på 25 [°C], og en maksimal energitilførsel til luften i hulrummet på 0,4 [W/m<sup>2</sup>], blive en temperatur af luften i hulrummet på 21,8 [°C] og der vil fra indeluften strømme energi til hulrummet, og også fra hulrummet ud gennem elementet til udeluften, da overfladetemperaturen er lavere end den vedtagne acceptable temperatur i hulrummet.

Denne beregning er ikke fuldført, men den debatteres i afsnit 5.8

## 5.7. Beregning af luftmængder

Beregningsforudsætninger:

For at bestemme temperaturen i hulrummet ( $t_5$ ) mellem den eksisterende væg og det præfabrikerede element, er der behov for at kende overfladetemperaturen af og varmestrømmen fra den eksisterende væg ( $t_4$ ). Der er i undersøgelsen besluttet at temperaturen forøgelsen i hulrummet ( $t_5$ ) ikke må overstige  $0,4^\circ\text{C}$  pr løbende meter op gennem hulrummet. Ved at træffe denne beslutning, reduceres antallet af variabler der knytter sig til luftstrømmen.

Først beregnes luftmængden der skal gennem hulrummet for at absorbere varme flowet, der strømmer ind fra de to overflader, dernæst beregnes hvor stort et luftvolumen det svarer til.

Antagelser

- Luftfugtighed 80%RF, det medfører som det fremgår af Tabel 5 at der er forskelligt vandindhold i luften og dermed forskelle i luftens Entalpi "l".
- Densitet for fugtig luft antages ved normalt tryk 101,3 [kPa], at være som angivet i Figur 19

	Indetemperatur			20		25		30	
	Vandindhold	Densitet	l	luftmasse strøm	luftvolumen	luftmasse strøm	luftvolumen	luftmasse strøm	luftvolumen
udetemperatur	gH <sub>2</sub> O/kgluft	kg/M <sup>3</sup>	kJ/kg K	kg/s	m <sup>3</sup> /s	kg/s	m <sup>3</sup> /s	kg/s	m <sup>3</sup> /s
10 (80%RF) tau=48,664	5	1,21	12,9074	2,14	2,59	3,39	4,11	4,64	5,62
15 (80%RF) tau=51,482	8,5	1,214	21,6609	0,55	0,67	1,29	1,57	2,04	2,47
20 (80%RF) tau=55,504	11,8	1,217	29,9142	-0,16	-0,19	0,38	0,46	0,92	1,12

Figur 22 - Beregning af luftmængder og luftvolumen 17 m høj luftspalte

Af resultaterne i Figur 22 (se fuldt skema i bilag 13) kan ses at der ved lave ude temperaturer og høje inde temperaturer kan bortledes meget energi, og at der derfor skal store luftmængder gennem hulrummet. Det er forårsaget af begrænsningen i temperaturstigning på  $0,4 [^\circ\text{C}]$  i nærværende beregning.

Der er beregnet at der skal ventileres  $[4,64 \text{ kg/s}]$  fugtig luft gennem hulrummet for at bortlede den beregnede samlede varmestrøm på  $23,98 [W/m^2]$ .

Ved højere temperaturer bliver luftbehovet mindre, dels fordi der kan bortledes mindre varme, og dels fordi Entalpien af den varme luft er højere, så der skal mere energi til at opvarme luften.

Endvidere fremgår at der ved lave temperaturforskelle mellem inde og ude vil være en lav eller endog negativ luftstrøm. Det skyldes at der ikke kan overføres energi til luft, der har en højere temperatur end overfladerne der omgiver luften.

Heraf må udledes at beregningen af luftstrøm er problematisk. Der beregnes, hvor stor en luftmængde der skal gennem hulrummet for at bortlede den tilførte varmestrøm der kommer til hulrummet fra de to overflader. I den beregning forekommer Entalpi fra Ligning 8 - Beregning af luftmængder, og den højere Entalpi i den varme fugtige luft viser sig ret afgørende, for luftmængderne der kan bortlede den tilførte energi.

For beregningerne af den 6 m. høje hulrum, gælder som for det 17 m høje hulrum, at beregningerne er betinget af en temperaturstigning af luften på maksimalt 0,4 [°C/m<sup>2</sup>].

Indetemperatur				20		25		30	
vandindhold		Densitet I		luftmasse strøm	luftvolumen	luftmasse strøm	luftvolumen	luftmasse strøm	luftvolumen
udetemperatur	gH <sub>2</sub> O/kgluft	kg/M <sup>3</sup>	kJ/kg K	kg/s	m <sup>3</sup> /s	kg/s	m <sup>3</sup> /s	kg/s	m <sup>3</sup> /s
10 (80%RF)									
tou=48,664				1,94	2,34	4,73	5,73	5,98	7,24
	5	1,21	12,9074						
15 (80%RF)									
tou=51,482				1,31	1,59	2,06	2,50	2,80	3,40
	8,5	1,214	21,6609						
20 (80%RF)									
tou=54,269				0,40	0,48	0,94	1,14	1,48	1,79
	11,8	1,217	29,9142						

Figur 23 - Beregning af luftmængder og luftvolumener ved 6 m høj luftspalte

Ved det 6 m høje hulrum bliver der ingen negative luftstrømme, men dog en del ret lave luftstrømme ved højere udetemperaturer. Det viser at der ved høje inde temperaturer kan ledes energi bort fra bygningen indeklima.

Som for hulrummet på 17 m er luftmængderne ved høj udetemperatur mindre end ved de lavere udetemperaturer.

Fra Figur 20 og Bilag 13 ses at den 6 m. høje hulrum skal optage totalt 30,9 [W/m<sup>2</sup>], for at optage den energi skal der ledes 5,98 [kg/s] til hulrummet, svarende til 7,24 [m<sup>3</sup>/s].

## 5.8. Diskussion af effekten af ventilation af facadeelement

Der er regnet med statiske forhold. I udvalgte enkelt stående tilfælde, med tre temperaturer inde og tre udetemperaturer, det giver tilsammen ni enkeltstående situationer. Og endvidere for to højder af lufthulrummet. Udetemperaturerne er valgt så de kan give indtryk af vejret i Danmark i forsommeren og det tidlige efterår. Inde temperaturerne er valgt for at give et varieret billede af effekterne der kan opnås med et ventileret element.

Beregningerne viser der kan opretholdes en gavnlige temperaturforskel mellem hulrum og inde, - i de fleste af de beregnede tilfælde. Så længe udetemperaturen er lav og indetemperaturen høj, kan der påregnes en varmestrøm ud til hulrummet. I nogle få af de beregnede tilfælde for et 17 m. højt hulrum, er der i hulrummet fremkommet en højere temperatur end der er inde. Af den årsag er der lavet beregninger med et lavere, 6 m. højt hulrum. I det lavere hulrum, er der kun i et enkelt tilfælde højere temperatur i hulrummet end inde bygningen.

Da der er ikke er regnet med varmekapacitet og varmediffusion for de faste materialer, giver beregningen et indtryk af mulighederne for at bruge det ventilerede hulrum til køling. Der er udført statiske beregninger i enkeltstående udvalgte tilfælde. I forhold til den reelle effekt er beregningerne udført som om det er superledende materialer, hvor en påvirkning har umiddelbar effekt gennem hele materialet. Temperaturændringer mellem overfladerne i de, i undersøgelsen, benyttede materialer vil medføre en forsinkelse i varmetransporten, men forfatteren af undersøgelsen, er ikke i stand til at udføre disse beregninger med de valgte værktøjer.

Der er gjort mange antagelser der har indvirkning på effekten af den ventilerede spalte mellem det præfabrikerede element og den eksisterende teglydervæg.

Først er elementet forenklet ved at udelade den ventilerede regnskærm, der er nævnt i kapitel 3.2 Elementopbygning. Den vil have indflydelse på varmestrømme gennem elementet, det ventilerede hulrum mellem regnskærm og vindspærre vil reducere effekten af solstråling. Og dermed ville overfladetemperaturen på vindspærren  $t_{ou}$  være lavere, og dermed vil varmestrømmen gennem elementet mod hulrummet være lavere.

Data for solstråling og udeklima er valgt for at illustrere en situation der kan forekomme i det sene forår og tidlige efterår. Det medfører at temperaturerne der beregnes for, også kan forekomme som døgn temperaturer nat, morgen og dag i sommerperioden og dermed illustrere en mulig effekt i det meste af sommerhalvåret i det danske klima.

Forudsætningen med en acceptabel temperatur forøgelse på 0,4 [°C] pr. meter hulrum medfører nogle komplikationer i beregningerne. At arbejde med en fast værdi reducerer variablerne i beregningen, og giver derfor mening. Den fastsætter lufttemperaturen i luftspalten til en værdi lidt højere end udeluft temperaturen, og resulterer dermed i den luftmængde der kan absorbere energistrømmene fra de to omgivende konstruktioner. At den antager en fast værdi medfører desværre, at der ikke relateres til de reelle effekter der strømmer til. Hvilket ses i Bilag 12 og Figur 21 - Beregning af varmeeffekter uden solstråling. Heri vises resultatet af beregningen for varmebalance i hulrummet. Varmestrømmen gennem teglvæggen er ganske lille, selv om den reelle udetemperatur og overfladetemperaturen på elementet er lav. Beregningen for elementet, i samme tilfælde, viser endda en varmestrøm fra hulrummet ud gennem elementet, mod den udvendige overflade.

Med hensyn til den faktiske effekt, af denne faste faktor, må forventes at effekten heraf er til den sikre side. Ved at indsætte lavere temperaturer for luften i hulrummet, vil den effektive varmestrøm gennem konstruktionerne mod hulrummet vise en større temperaturforskel og dermed højere afkølede effekt.

Med disse faktorer fastlagt, viser beregningerne den luftmængde der skal gennem hulrummet for at fjerne varmestrømmene fra solstråling på element og overtemperaturer inde. Varme effekterne afhænger i alt

væsentligt af temperaturforskellene over konstruktionerne mod hulrummet. Ved høj udetemperaturer og høje inde temperaturer 20 [°C], 30 [°C], 17m høj lufthulrum er beregnet en samlet varmestrøm på 11,02, [W/m<sup>2</sup>] når den effekt skal fjernes med en luftstrøm viser det sig at kræve en luftmasse på 0,92 [kg/s]. Ved omregning til luftvolumen bliver det 1,12 [m<sup>3</sup>/s]. Hvis det antages at hulrummet er 0,1 m mellem fladerne og dermed et strømningsareal på 0,1 [m<sup>2</sup>], vil det resultere i en lufthastighed på ca. 11,2 [m/s]. Beregningen er foretaget ved anvendelse af den entalpi luft antager ved 10 [°C] og 80 %RF og normalt lufttryk. Beregningen viser, som nævnt tidligere, den luftmængde der skal gennem hulrummet for at fjerne varmestrømmene og samtidig opretholde en maksimal lufttemperatur i luftspalten på 26,8 [°C].

I resultatskemaet bilag 13 fremstår nogle af varme effekterne og dermed luftmængder for lave udetemperaturer ret ekstreme. Disse værdier fremkommer af forudsætningen der giver den acceptable temperaturstigning i hulrummet.

## 6. Konklusion

- Der er gode økonomiske årsager til at mange eksisterende bygninger ikke er efterisoleret. Der forventes relativt lave fjernvarme priser frem til 2040. Efterisolering er dyrt, og den valgte form for efterisolering til nærværende undersøgelse er endog meget dyr. Det vil derfor ikke være rentabelt at efterisolere en boligbebyggelse med denne teknik.
- Elementet der er valgt til undersøgelsen opfylder alle de betingelser der er stillet op. Det er ikke tungt, det kan monteres med simple beslag, disse er dog ikke inkluderet i undersøgelsen. Det vil uden tvivl blive en udfordring af designe beslagene, med de ønsker der er til bevægelighed af elementet i store eller små sektioner.
- Når elementet i vinteren er fastgjort direkte på teglvæggen, isolerer elementet mod varmetab til det fri. Ved højere udetemperaturer bliver et hulrum mellem element og bygning. Det medfører at der i sommeren bliver en skygge fra elementet, som beskytter teglvæggen mod direkte solstråling, og medfølgende høje overfladetemperaturer. Samt tillader en kølende effekt mod det ventilerede hulrum.
- Effekten af hulrummet og den luftstrøm der skal gennem hulrummet, varierer med den valgte udetemperatur, beregningerne hvor ude temperatur og inde temperatur har mindst forskel giver de mest brugbare resultater. Ud fra de udførte undersøgelser, synes det at være klart der er et potentiale i at anvende hængslede facadeelementer til at reducere nogle bygningers energi forbrug. Elementerne monteret tæt til en indre klimaskærm i vinteren reducerer varmetabet gennem facaderen. Og uden for selve opvarmningssæsonen, kan der ved bygninger med kølebehov i perioden uden for opvarmningssæsonen, etableres et hulrum der kan bortlede varme fra bygningens indre, uden at etablere mekaniske køleanlæg.

## 7. Perspektivering

Den ventilerede facade er ikke anvendelig for beboelsesbygninger, der ikke køles mekanisk. Måske mere egnet til erhvervsbygninger, hvor der er arbejdsmiljøkrav til indeklimaet, og hvor det derfor vil kunne være mere økonomisk attraktivt at udføre tiltag der kan reducere kølebehovene.

Det skal vurderes om de parametre der er opstillet er rimelige. Især er den valgte acceptable temperaturforøgelse på 0,4 [°C] pr. m udfordrende. Den forvansker resultaterne af beregningerne fra en reel situation, med variabel lufttemperaturer i hulrummet, til en situation med en maksimal temperatur for luften i hulrummet. Det resulterer i en beregning, der giver en luftmasse der skal gennem hulrummet for at holde maksimaltemperaturen, og ikke en beregning af køleeffekten i de valgte temperatursæt.

Der skal laves en undersøgelse af konsekvenser ved en temperatur der er relativ til indetemperaturen, altså en temperatur i luftspalten der er lidt lavere end indetemperaturen. Den situation vil være interessant for at forstå køleeffekterne.

Endnu bedre vil det være at få lavet en beregning hvor varmeeffekterne fra de to omsluttende konstruktioner giver temperaturen i hulrummet.

En udfordring i undersøgelsen er, at der regnes på statiske forhold. Faktorer som varmekapacitet og varmediffusionsevne kan vise sig at have stor indflydelse på resultatet af undersøgelsen. Varmestrømmen fra solstråling på elementets ydre overflade vil have en reduceret indvirkning på vindspærrens overfladetemperatur

En anden undersøgelse bør afklare om der kan findes andre metoder til at ændre klimaskærmens samlede varmeledningsevne med årstidernes skiften.

**Referencer:**

{Morelli, Harrestrup og Svendsen, 2013}, Method for a component-based economic optimisation in design of whole building renovation versus demolishing and rebuilding. Martin Morelli, Maria Harrestrup, Svend Svendsen.

Master i bygningsfysik – Varmelære teori, 2014. Anker Nielsen, Eva B. Møller

DANVAK Grundbog varme og klimateknik, 2. udgave.

SBI-rapport 142, Københavns etageboligbyggeri 1850 – 1900, Jesper Engelsmark, 1983.

SBI-anvisning 213, Bygningers Energibehov, 3. udgave, Søren Aggerholm, Karl Grau, 2014.

Ds418 Beregning af bygningers varmetab, 7. udgave, 2011



## 8. Figurliste

Ligning 1 - Fouriers varmeledningsligning .....	18
Ligning 2 - Ligning for varmeovergang .....	18
Ligning 3 - Omskrevet Fouriers varmeledningsligning .....	19
Ligning 4 - Varmeligning for idealgas .....	19
Ligning 5 - Strålings delkomponenter .....	20
Ligning 6 - Ligning for beregning af konvektionsdel .....	20
Ligning 7 - Beregning af lufttemperatur .....	23
Ligning 8 - Beregning af luftmængder .....	23
Ligning 9 - Beregning af Entalpi for fugtig luft .....	24
Ligning 10 - Beregning af specifik Entalpi .....	24
Ligning 11 - Ligning for varmeledning gennem element .....	25
Ligning 12 - Varmebalance for udvendig facadeelement .....	26
Ligning 13 - Beregning af overfladetemperatur facadeelement .....	26
Ligning 14 - Beregning af konvektivt overgangstal .....	27
Ligning 15 - Beregning af strålingstemperatur .....	27
Figur 1 - Vitus Berings Plads 12, 8700 Horsens .....	6
Figur 2 - Plansnit af Vitus Berings Plads 10 .....	7
Figur 3 - Isotherm for 350 mm teglydervæg .....	8
Figur 4 - Principopbygning af element .....	9
Figur 5 - Isothermer - Temperaturforløb i element .....	11
Figur 6 - Elementopbygning i Heat2 .....	11
Figur 7 – Forsatsvæg på 350 mm. Tegl ydervæg modelleret i HEAT2 .....	12
Figur 8 - Isothermer for Ydervæg med element .....	12
Figur 9 - Fugtindhold i isoleringslaget .....	13
Figur 11 - Be15 beregning med efterisolering .....	15
Figur 11 - Be15 beregning eksisterende bygning .....	15
Figur 12 - Pris for et tilsvarende præfabrikeret element beregnet i Sigma .....	16
Figur 13 - Varmeledning gennem sammensatte materialer i en konstruktion .....	19
Figur 14 - Skitse af ventileret hulrum .....	22
Figur 15 - Varmeledning gennem element .....	26
Figur 16 - Beregning af overfladetemperatur på element .....	28
Figur 17 - U-værdi og varmestrøm for teglvæg .....	29
Figur 18 - U-værdi og varmestrøm for element .....	29
Figur 19 - Resulterende varmestrømme til hulrum ved 17 m høj hulrum .....	30
Figur 20 - Resulterende varmestrømme til hulrum ved 6 m høj hulrum .....	31
Figur 21 - Beregning af varmeeffekter uden solstråling .....	32
Figur 22 - Beregning af luftmængder og luftvolumen 17 m høj luftspalte .....	33
Figur 23 - Beregning af luftmængder og luftvolumener ved 6 m høj luftspalte .....	34
Tabel 1 - Egenskaber for materialer i element .....	10
Tabel 2 - Skematisk oversigt over bygningens isoleringsværdier .....	14
Tabel 3 - Konvektionstal .....	20
Tabel 4 - Overgangsisolans, Uddrag fra DS 418 .....	21
Tabel 5 - Vandindhold i fugtig luft .....	24
Tabel 6 - Effektiv modstrålingstemperatur .....	27

## 9. BILAG

*Bilag 1: HEAT2 beregning af 350 mm teglvæg*

*Bilag 2: Elementets samlede vægt*

*Bilag 3: HEAT2 beregning af præfabrikeret element*

*Bilag 4: U-værdiberegning for præfabrikeret element efter DS418*

*Bilag 5: HEAT2 Data for beregning af overflade temperatur – 350 mm ydervæg uden isolering*

*Bilag 6: HEAT2 Data for beregning af overflade temperatur – 490 mm ydervæg uden isolering*

*Bilag 7: Rapport fra WUFI Pro, element og teglvæg*

*Bilag 8: Opmåling til energiberegning*

*Bilag 9: IX diagram til udlæsning af vandindhold*

*Bilag 10: Solindfaldsskema fra SBi 202*

*Bilag 11: Beregning af varmeeffekter*

*Bilag 12: beregning af varmeeffekt – uden solstråling*

*Bilag 13: Dataopsamlings skema varmeeffekter*