

# Hampakalk

-En jämförelsestudie med avseende på  
brandegenskaper

*Josefin Edbladh och Joar Persson*

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet

Fire Safety Engineering  
Lund University  
Sweden

Rapport 5557 Lund 2018  
Examensarbete på brandingenjörsutbildningen



**LUNDS UNIVERSITET**  
Lunds Tekniska Högskola



# Hampakalk

– en jämförelsestudie med avseende på brandegenskaper

Josefin Edbladh och Joar Persson

Lund 2018

## Titel

Hampakalk – en jämförelsestudie med avseende på brandegenskaper

## Title

Lime-hemp concrete – a comparative study regarding fire technical properties

## Författare / Author

Josefin Edbladh & Joar Persson

## Report 5557

## Antal sidor / Number of pages

62 (inklusive bilagor / including appendices)

## Sökord

Hampakalk, isolering, brandegenskaper, massförlust, värmetransport

## Keywords

Hempecrete, lime-hemp concrete, insulation, fire technical properties, mass loss, heat transport

## Abstract

Lime-hemp concrete is an old insulation material, made out of hemp shiv and lime, making its way back onto the market. This thesis focuses on the usage of lime-hemp as an alternative insulation material for restoration of older wooden buildings in the town of Visby in Gotland, Sweden. The aim of this report is to investigate fire resistance properties of lime-hemp concrete and to compare it to other insulation materials in this regard. The materials compared were: lime-hemp concrete, wood fiber insulation, flax insulation, EPS (expanded polystyrene) and stone wool insulation. Two experimental tests were conducted on each material, where samples of 10x10x5 cm<sup>3</sup> were put in a cone calorimeter and radiated for 30 minutes with heat measuring 10 and 20 kW/m<sup>2</sup>. The results showed lime-hemp having the lowest temperature profile through the material, out of the tested materials. The mass loss of the material was higher than EPS and stone wool and lower than wood fiber and flax insulation, the latter of which started burning at 20 kW/m<sup>2</sup>. Most of the mass loss is assumed to be attributed to the evaporation of water.

Författarna ansvarar för innehållet i rapporten.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2018

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund  
[brand@brand.lth.se](mailto:brand@brand.lth.se)  
<http://www.brand.lth.se>  
Telefon: 046 – 222 73 60

---

Department of Fire Safety Engineering  
Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund  
Sweden  
[brand@brand.lth.se](mailto:brand@brand.lth.se)  
<http://www.brand.lth.se>  
Telephone: +46 46 222 73 60

## Förord

Denna rapport är resultatet av ett examensarbete och ingår som en avslutande del i utbildningen till brandingenjör vid Lunds Tekniska Högskola.

Författarna vill tacka Stefan Svensson vid avdelningen för Brandteknik för handledning av arbetet och stöd vid laboration.

Författarna vill även tacka Paulien Strandberg, vid avdelningen för Byggnadsmaterial, för stöd längs arbetets gång och Viktor Källgren, tidigare student, för hampakalken som användes vid experimenten.

Vidare vill de tacka Stefan Holmberg på Wederslöf Byggnadsvård som bidrog med träfiberisoleringen.

De vill även tacka Kristin Balksten vid Konstvetenskapliga institutionen på Uppsala universitet, Campus Gotland, för idén till arbetet och tillhandahållandet av linullsisoleringen.

Författarna vill även tacka Patrick van Hees vid avdelningen för Brandteknik för vägledning kring försöksmetod för experimenten.

Författarna vill till sist tacka Nils Johansson vid avdelningen för Brandteknik för slutgiltiga kommentarer på arbetet.



## Sammanfattning

Hampakalk är en blandning av hampa och kalk, men kan innehålla ytterligare tillsatser för att påverka isoleringsförmågan. I detta arbete har hampakalk utan tillsatser utsatts för strålning för att få en inblick i hur hampakalk kan tänkas bete sig i en brandsituation. Utgångspunkten för brandegenskaperna som undersöks är brandscenarier där en byggnad som är isolerad med hampakalk riskerar att antändas av en byggnad som brinner på andra sidan gatan. Grunden för denna avgränsning är den täta bebyggelsen i Visby innerstad, som kan komma att isoleras med hampakalk.

I Visby har inte de regler följts, som fanns i Sverige under tiden då husen byggdes. Husen har byggts tätare än rekommenderat, vilket leder till att risken för brandspridning blir högre. Skulle hampakalk visa sig vara ett mer brandfarligt isoleringsalternativ kan konsekvenserna vid en eventuell brand öka.

En jämförelse gjordes på hampakalkens prestationer i laboratoriekontrollerade förhållanden, med andra mer konventionella isoleringsmaterial; träfiberisolering, lullisolering, EPS (expanderad polystyren) och stenullisolering. Provkroppar om 10x10x5 cm<sup>3</sup> bestrålades med 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning under 30 minuter. Temperatur mättes på djupen 2, 3 och 4 cm. Kroppens viktminskning mättes och visuella effekter såsom flammor och rök antecknades.

Hampakalken visade sig jämförelsevis stå emot uppvärmning bra. Utav de testade materialen var hampakalkens temperaturökning långsammast vid varje djup för båda värmestrålningsnivåerna. Resonemang har förts till antagandet att mängden fritt bundet vatten i hampakalken bidrar till den relativt långsamma temperaturökningen, genom att använda värmeenergi till att fasomvandla vattenmolekylerna till gasform.

Massförlusten hos hampakalk visade sig ligga i mitten av de testade materialen, i antal förlorade gram. Däremot hade hampakalken en låg massförlust i förhållande till sin startmassa. Massförlusten i hampakalken var som högst då temperaturökningen var som långsammast. Detta antogs återigen bero på fasomvandlingen av fritt bundet vatten i materialet, speciellt med tanke på att temperaturökningen stannade vid 100 °C, medan massförlusten vid den temperaturen ökade.

Hampakalken antände inte vid någon av strålningsnivåerna. Däremot fanns en antydning till att de hampakäv som stack ut ur materialet långsamt förbrändes under försökets gång. På grund av begränsningar i testerna och den låga förbränningen kunde ingen HRR uppmätas.

Hampakalk visade sig kunna vara ett bra alternativ vid isolering av hus i tätbebyggelse, men det krävs vidare forskning för att fastställa dess exakta brandegenskaper.

Hampakalken som undersöktes i detta arbete hade följande proportioner:

- 7 delar hampa
- 4 delar torrsläckt kalk
- 4,25 delar vatten





## Summary

Lime-hemp is an insulation material made out of a mixture of hemp and lime and can sometimes contain additives to adjust the insulation properties. In this thesis, lime-hemp without additives has been exposed to heat radiation to get a picture of how it might behave in a fire situation. The experiments conducted are based on a situation where a house with lime-hemp insulation is exposed to a fire across the street. This particular case is selected with the city of Visby in mind since this is where the lime-hemp insulation will be used. Here the houses are placed close together because of the wall surrounding the city.

The rules regarding safety distances between houses does not seem to have been followed when the houses in Visby were built. The houses there are placed tightly together which increases the risk of a fire spreading. If lime-hemp insulation would turn out to be more flammable than conventional insulation materials the consequences of a possible fire could increase.

A comparison between the insulation materials is made with the help of experiments in a cone calorimeter. The materials compared were: lime-hemp concrete, wood fiber insulation, flax insulation, EPS (expanded polystyrene) and stone wool insulation. Test pieces measuring  $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$  were put in front of the cone and radiated with a heat radiation of 10 and 20  $\text{kW/m}^2$  for 30 minutes each. During the experiments the temperature was measured 2, 3 and 4 cm into the material. The weight of the test pieces were recorded and effects, like flame and smoke development, were registered.

When compared to the other tested materials, the lime-hemp concrete held up well temperature wise. The rise in temperature was the lowest out of the materials at every point, 2, 3 and 4 cm, in both experiments, 10 and 20  $\text{kW/m}^2$ . Speculations are made that this low rise in temperature might be because of the amount of unbound water in the material. This water requires energy to evaporate, energy that would otherwise be used to raise the temperature in the material.

The mass loss, in grams, was for the lime-hemp insulation lower than the wood fiber and flax insulation, but higher than the EPS and stone wool insulation. But since the lime-hemp test piece had a higher start weight than the other materials the percentage lost was very low. The lime-hemp mass loss was at its highest when the rise in temperature was at its lowest. This is probably because of the previously mentioned evaporation of water, since the rise in temperature stopped at 100 °C while the mass loss at this point increased.

The lime-hemp did not ignite in any of the tested levels of heat radiation. There was however a tendency for the exposed hemp shiv to slowly combust over the course of the experiment. The HRR for this could not be measured because the rate of combustion was too low.

Lime-hemp insulation seems to be a good alternative when insulating tightly packed houses, but requires further investigation in order to determine fire properties with more precision.

The lime hemp concrete investigated in this report had the following mixture proportions:

7 parts hemp  
4 parts dry-slaked lime  
4,25 parts water



## Innehåll

1	Inledning .....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Problematisering.....	1
1.3	Målsättning/Syfte .....	1
1.4	Fokus och avgränsningar.....	2
2	Litteraturundersökning .....	3
2.1	Metod.....	3
2.2	Resultat .....	3
2.2.1	Tidigare forskning.....	3
2.2.2	Materialbakgrund .....	3
2.2.3	Värmetransport.....	5
2.2.4	Massförlust och förbränning.....	6
2.2.5	Konkalorimeter .....	7
2.2.6	Passivt brandskydd förr.....	8
2.2.7	Brandspridning mellan hus .....	9
3	Experiment i konkalorimetern .....	11
3.1	Metod.....	11
3.2	Resultat .....	14
3.2.1	Materialpåverkan.....	14
3.2.2	Temperaturmätning.....	18
3.2.3	Massförlust .....	22
4	Diskussion/Analys .....	27
4.1	Materialpåverkan.....	27
4.2	Temperaturmätning.....	28
4.3	Massförlust .....	30
4.4	Övrigt.....	31
4.5	Felkällor.....	32
5	Slutsatser.....	35
5.1	Förslag till fortsatt forskning.....	35
6	Referenser.....	37



# 1 Inledning

Nedan beskrivs bakgrundproblematiken denna rapport baseras på för att sedan formuleras till ett konkret mål och syfte. Här finns även de avgränsningar som gjorts.

## 1.1 Bakgrund

Innanför Ringmuren i Visby, Gotland, finns en unik stad med byggnader från både medeltid och nutid. Detta har lett till att bevaring av kulturarvet blivit viktigt då byggnader ska renoveras där. De byggnaderna som byggdes mellan år 1720 och 1830 är så kallade bulhus, en sorts trähus som i detta fall har kalkcement inbäddat mellan diagonala träplankor vilka sedan täckts utvändigt med puts. Det finns ca 500 av dessa utspridda innanför stadens murar. Vid renovering av dessa hus väljer många i nuläget att ersätta kalkcementlagret med modernare mer energieffektiv isolering i form av mineralull, cellplast eller träfiberisolering som sedan täcks med en fasad av puts. Dessa material är emellertid inte lika fuktbeständiga som de äldre material de ersätter och kan därmed bidra till att det blir fuktskador på husen. För att slippa dessa skador, i form av fukt och mikrobakteriell tillväxt, har det blickats tillbaka i tiden för att kunna använda sig av gamla tekniker. Ett isoleringsmaterial som dykt upp i denna strävan är hampakalk, och har potential att vara ett mer hållbart alternativ samtidigt som husen behåller ett autentiskt utseende (Strandberg, Balksten, & Donarelli, 2017).

För att kunna börja använda detta material behövs kunskap om hur det beter sig vid brand undersökas. I nuläget finns det dåligt med forskning kring detta och då husen i Visby är byggda så tätt intill varandra, på grund av den begränsade arean innanför murarna, är detta viktig information. Då bulhusen byggdes fanns det en trend i Sverige som ledde till att det började byggas bredare gator för att minska brandspridningsrisken. Detta har dock inte gjorts i Visby, där flera av bulhusen byggts med korta avstånd till husen på andra sidan gatan, runt 3 m (Strandberg, Balksten, & Donarelli, 2017) (Hallberg, o.a., 2010).

Idén till arbetet kommer från Kristin Balksten som arbetar på Uppsala Universitet, Campus Gotland, och som vill få en bättre uppfattning om hampakalkens brandegenskaper i förhållande till de material som används i nuläget.

## 1.2 Problematisering

För att kunna börja applicera hampakalk i bulhusen på ett sätt som gör att de både håller längre och behåller sitt autentiska utseende måste mer information om materialet tas fram. Detta gäller främst information om materialets brandegenskaper. Dessa materialegenskaper kan nämligen ha stor betydelse i en stad som Visby där gatorna är smala och husen placerats tätt intill varandra. Om det visar sig att materialet hampakalk är mycket mer brandfarligt än de material som används idag skulle konsekvenserna av en brand kunna förvärras. Exempelvis kan brandförloppet gå snabbare och därmed hinner branden sprida sig till fler hus innan räddningstjänsten hinner ta sig till platsen. Det skulle i värsta fall kunna ske en så kallad kvartersbrand likt branden i Eksjö, Jönköping, 2015. Här startade en brand i en stadsdel med smala gator och slutna gårdar. Stadsdelens byggnader bestod av äldre hus i trä. Förhållandena gjorde det svårt för räddningstjänsten att ta sig till branden, och det slutade med att ett helt kvarter brann ned (MSB, 2016).

## 1.3 Målsättning/Syfte

Målet med detta arbete är att undersöka hur hampakalk jämför sig med andra material då de utsätts för strålning. Syftet är att utöka kunskaper och skapa intresse för vidare forskning om hampakalkens brandegenskaper.

#### 1.4 Fokus och avgränsningar

Målet med detta arbete är inte att fastställa några konkreta värden för hampakalkens brandegenskaper, utan fokuserar på att jämföra dess förmåga med andra isoleringsmaterial. De resultat som erhålls genom experiment i denna rapport ger inte underlag för hur väl de isoleringsmaterial som testas fungerar vid brand. Resultaten visar enbart hur de presterar i förhållande till varandra inom ramen för de specifika förutsättningarna i laboratorieförsöken.

Hampakalk kan blandas med olika proportioner av hampaved, kalk och vatten. I försöken som gjorts har enbart en hampakalkblandning använts, så hur olika blandningar av hampakalk beter sig behandlas inte.

Material som jämförs i laboratoriet är hampakalk, linullisolering, stenullisolering, EPS och träfiberisolering. Inga fullskaliga experiment utförs på grund av anläggningens begränsningar.

Brandspridning mellan hus på samma sida av en gata, där avstånden kan vara ännu kortare, täcks inte i arbetet.

På grund av begränsat med tid till utrustningen, och begränsningar av mängden material, har försöken i konkalorimetern enbart utförts en gång per material och värmestrålningsnivå (10 och 20 kW/m<sup>2</sup>).

Hampakalk går att använda vid isolering av både väggar, golv och tak. Denna rapport kommer endast ta upp materialets funktion vid isolering av väggar

## 2 Litteraturundersökning

En litteraturundersökning har gjorts för att ta reda på vilken information som redan finns inom ämnet och för att lägga en grund för rapporten.

### 2.1 Metod

Här har information hämtats från både rapporter, böcker och hemsidor för att sedan samla det som kan vara relevant bakgrundsinformation för just denna rapport. I första hand har användbar information sökts upp med hjälp av kurslitteratur och via LUBsearch, Lunds Universitets Biblioteks databas. Då tillräcklig information inte hittats med hjälp av dessa har vetenskapliga artiklar, men även mer allmänna artiklar, sökts på internet.

Sökord som använts vid litteraturundersökningen är: hemp lime, hemp lime fire, type of lime in hemp lime, olika kalk som bindemedel, brandskydd förr, brandspridning mellan hus, brand eksjö 2015, fire basics.

### 2.2 Resultat

Nedan presenteras den information som tagits fram med hjälp av litteraturundersökningen. Denna del handlar bland annat om de material och instrument som använts vid experimenten, men även den fysik experimenten baseras på. Det går också att läsa om brandspridning mellan byggnader och det passiva brandskyddets utveckling genom tiderna, samt tidigare forskning om hampakalkens brandegenskaper.

#### 2.2.1 Tidigare forskning

En undersökning om hampakalkens brandegenskaper utfördes i Australien 2013-14. 1100 mm<sup>2</sup> stora block med olika tjocklekar utsattes för en tid-temperaturkurva enligt den australiensiska standarden AS1530.4-2005, som är baserad på ISO834 standarden. Testet börjar på 20 °C, vilket ökar under 360 minuter till 1213 °C. Mätningar av temperatur gjordes på olika djup i kropparna, och resultat av mätningarna tyder på att kroppens totala tjocklek påverkar temperaturökningen, dvs en tjockare vägg av hampakalk skulle få en mer plan temperaturprofil än en smalare vägg. Testet gjordes om med två ytbeläggningar, lerputs och magnesiumoxid-bräda. Slutsatser som dras är att det verkar gå att specificera en väggtjocklek för önskad brandklassning, och att lerputs eller MgO-bräda kan er hålla samma brandklassning för en smalare vägg (Gregor, 2014).

Ingen annan relevant forskning har hittats.

#### 2.2.2 Materialbakgrund

Nedan hittas bakgrundsinformation om de isoleringsmaterial som experimenteras på i denna rapport.

##### 2.2.2.1 Hampakalk

Hampa har historiskt sett varit en viktig råvara. Fibrerna användes flitigt till rep och segeldukar redan på vikingatiden. Mot slutet av 1800-talet hade produktion av hampa minskat drastiskt på grund av konkurrens med bland annat bomull. Då USA införde förbud mot odling av droghampa med hög tetrahydrocannabinolhalt (THC), dog produktionen i stort sett helt ut, trots låg THC-halt, och större delen av världen följde trenden. I Sverige förbjöds odling av hampa år 1965. År 2003 blev odling av så kallad industrihampa, med mindre än 0,2 % THC, tillåtet i Sverige igen (de Bruijn, 2012).

I Sverige används idag hampan främst som bäddfoder till boskap och som miljövänligt bränsle i form av olja och briketter. Eftersom miljötänket fått ett rejält uppsving undersöks det om hampa kan användas inom byggindustrin. En blandning av finhackade hampafibrer, kalkcement och vatten skapar ett värmeisolerande, fuktutjämnande och ljudisolerande material som kallas hampakalk. Den

huvudsakliga delen av hampaplantan som används till hampakalk är hampaskäven. Skävorna är träiga bitar från plantans kärna som blir över då fibrerna separerats. Ibland används även andra delar av hampaplantan.

De tidigaste bevisen för användning av kalk är omkring 10 000 år gamla, där kalken använts som murbruk i golv. Sedan dess har kalk sett många användningsområden, bland annat Egyptens pyramider, Romarnas vägar, blekning av textilier, målarfärg, garvning av läder, lim, glas, glasyr till keramik, läkemedel och även som vapen då det kastades i fiendens ansikten (Oates, 1998).

Kalk bränns i ugnar, idealt vid 900 °C, där den faller sönder i kalciumoxid och kolsyra. Efter bränningen släcks kalken med vatten, vilket skapar en reaktion som bildar kalciumhydroxid i en form av välling. Kalk som innehåller lermineraler härdar i kontakt med vatten efter släckningen är klar. Därför släcks den med erforderlig mängd vatten för att reaktionen som skapar kalciumhydroxid ska ske fullt ut, och produkten blir ett torrt pulver som kallas hydraulisk kalk. Släckt kalk härdas kemiskt genom att absorbera koldioxid långsamt. För att detta ska ske måste kalken vara exponerad till luft så den får tillgång till fritt koldioxid (h.n byggnadsvård, 2017).

Kalk i hampakalk är ofta en blandning av släckt kalk och hydraulisk kalk. Släckt kalk i mitten av hampakalken har inte kontakt med luften och härdas således inte fullt ut. Därför läggs hydraulisk kalk till i blandningen. Hydraulisk kalk härdar dels kemiskt på samma sätt som släckt kalk, men även genom reaktion med vatten. Genom en blandning av hydraulisk kalk och släckt kalk uppnår tjocka lager av hampakalk därmed en rimlig andel av sin arbetsstyrka snabbare (Magwood, 2016).

Hampakalk kan appliceras i en vägg- tak eller golvkonstruktion huvudsakligen genom sprutning, stampning eller med färdiga block. Sprutning sker mot en plywoodskiva som är fäst på ena sidan den bärande stommen. Stampning sker genom att temporära träskivor placeras på ömse sidor konstruktionen, som fylls med hampakalkblandningen och stampas för att eliminera större hålrum i materialet. För färdiga block placeras hampakalksblock med hål i över ett ramverk som precis fyller upp hålen i blocken (de Bruijn, 2012).

I ett examensarbete om hampakalks konstruktionsteknik och hållbarhet har Mariann Grundvall tagit fram priset 1512 kr/m<sup>3</sup> för hampakalk (Grundvall, 2016). Detta pris omfattar enbart materialkostnader. Som jämförelse kan nämnas att stenull kostar omkring 2650 kr/m<sup>3</sup>, och cellplast 1700 kr/m<sup>3</sup> (Beijer Byggmaterial, 2018).

#### 2.2.2.2 Mineralull

Mineralull är en beteckning som omfattar isoleringsmaterial tillverkat av icke-organiska mineralfibrer, och delas in i glasull och stenull. Denna ull tillverkas då glas eller sten smälts och spinns till tunna trådar, som besprutas med ett bindemedel och härdas i en ugn. Efter härdning beskärs ullen till det format som passar bäst (Swedisol, 2017).

#### 2.2.2.3 Cellplast (EPS)

Cellplast är ett samlingsnamn för expanderade plaster och har god isoleringsförmåga, hållfasthet och låg vikt. I detta arbete fokuseras det på expanderad polystyren (EPS), som i folkmun ofta kallas frigolit. EPS tillverkas av små plastkulor (granulat) som ångas och omrörs i en process som får granulaten att expandera av pentan. Beroende på vilken tryckhållfasthet cellplastskivorna ska ha avslutas processen vid rätt storlek på plastkulorna. Kulorna placeras sedan i en form där de utsätts för tryck, fukt och värme vilket får de att binda samman i varandra i ett homogent block. Därefter sker beskärning av blocket till önskade dimensioner på isoleringsskiva (Benders, 2017).



#### 2.2.2.4 Linullsisolering

Lin kan odlas från Skåne och upp till Gästrikland i Sverige. Efter skörd måste linet rötas för att pektinet (växtlim) som håller ihop fibrerna ska lösas upp. Rötning kan ske bakteriellt genom att blötlägga linet i 10-32 °C varmt vatten (vattenrötning), eller genom naturligt förekommande svampar som utvecklas då linet tillåts ligga kvar på marken (markrötning). Efter rötning torkas linet och sedan bråkas det, en mekanisk krossning av ytterhuden (barken och skävorna), så att linfibern friläggs. Skävorna separeras från linfibern genom skäktning, då ett blad dras över linet med en skrapande effekt. På industriell nivå sker skäktningen med hjälp av en turbin. Fibrerna sorteras i långfiber och kortare fiberknippen (häckeltow) genom häckling. Häcklingen går till så att fibrerna dras genom en uppsättning nålar där de korta fibrerna tovar sig och de långa dras parallellt med varandra (Hälsinglands Linförening, 2017). Det är de kortare fibrerna som används i linullsisolering, och binds med textilfiber (Isolina, 2017).

#### 2.2.2.5 Träfiberisolering

Träfiberisolering tillverkas genom defibrering av skövlat trä. Defibrering kan ske kemiskt eller mekaniskt (ångas och mals). Träfiber har använts som isoleringsmaterial sedan slutet på 1800-talet, men då i form av restprodukter från hyvling av timmer – spån (Isoleko, 2012). Den moderna träfiberisolering som används idag har funnits i Sverige sedan 1970-talet.

### 2.2.3 Värmetransport

Inom ramen för denna rapport har experiment utförts i konkalorimetern, där olika isoleringsmaterial utsatts för värmestrålning. För att förstå varför materialen reagerat som de gjort under försöken, behövs viss kunskap om hur värmetransport fungerar.

Värmetransport delas in i tre kategorier; ledning, konvektion och strålning. Vid försöken i konkalorimetern har en värmekälla bestrålat materialen med värmeenergi, som leds vidare in i materialet samtidigt som en del av det konvekterar bort med luften omkring kroppen.

#### 2.2.3.1 Ledning

Ledning är en form av värmeöverföring som associeras med fasta ämnen. Det förekommer även i vätskor, men döljs där i den konvektiva värmeöverföringen som sker som en omblandning på grund av densitetsskillnader. I värmeledning sker värmetransport som ett flöde från hög temperatur till låg temperatur (från hög energi till låg). Värmeledningen genom fasta material kan beskrivas med Fouriers lag:

$$\dot{q}'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ekvation 1}$$

Där:

$\dot{q}''$  = värmeenergi som leds [W/m<sup>2</sup>]

$k$  = materialberoende faktor, värmeledningstalet [W/m·K]

$T$  = temperaturen [K]

$x$  = avståndet in i materialet [m]

En tumregel är att material som är goda värmeledare även är elektriska ledare. Detta tack vare att värme kan överföras genom att fria elektroner interagerar. Material som saknar fria elektroner kan bara leda värme genom mekanisk vibration i det molekylära fackverket, vilket är mycket mindre effektivt (Drysdale, 2011).

#### 2.2.3.2 Konvektion

Konvektion är en form av värmetransport där värme förflyttas genom rörelse av en fluid (vätska eller gas). Konvektionstalet  $h$  är, till skillnad från värmeledningstalet  $k$ , inte materialberoende. Det beror istället på orienteringen och geometrin av det fasta ämnet samt egenskaper av fluiden såsom

flödesparametrar. Konvektion kan uppstå naturligt som konsekvens av temperaturskillnad i fluiden vilket skapar densitetsskillnader och därmed en lyftkraft. Det kan även uppstå genom mekanisk rörelse såsom en fläkt, och kallas då för påtvingad konvektion.

Newton beskrev empiriskt konvektion som följande:

$$\dot{q}'' = h\Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ekvation 2}$$

Där:

$\dot{q}''$  = värmeenergi som konvekterar [ $\text{W/m}^2$ ]

$h$  = konvektionstalet [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ]

$\Delta T$  = temperaturskillnad på kroppen och den omgivande fluiden [K]

Typiska värden på konvektionstalet  $h$  för naturlig konvektion i luft ligger i intervallet 5-25  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  och för påtvingad konvektion i luft 10-500  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  (Drysdale, 2011).

### 2.2.3.3 Strålning

Värme kan stråla med elektromagnetiska vågor. Värmestrålning sker med vågor inom spektrumet för synligt ljus och långt in i det infraröda. Våglängder som strålar värme ligger alltså i intervallet 0,4 – 100  $\mu\text{m}$ . Den strålande kroppens emissivitet kan beskrivas som följande:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ekvation 3}$$

Där:

$E$  = emissivitet, utstrålad energi [ $\text{W/m}^2$ ]

$\varepsilon$  = en faktor för effektiviteten av ytan som utstrålar, emissionstal [-]

$\sigma$  = Stefan Boltzmanns konstant =  $5,67\cdot 10^{-8}$  [ $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ]

$T$  = temperatur i strålningskällan (K)

För att finna strålningsintensiteten som infaller mot en kropp används konfigurationsfaktorn  $\phi$  som tar i beräkning den geometriska orienteringen av den strålande och den bestrålade ytan. Ekvationen blir då:

$$\dot{q}'' = \Phi\varepsilon\sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ekvation 4}$$

Där:

$\dot{q}''$  = infallande strålning [ $\text{W/m}^2$ ]

$\Phi$  = synfaktor som tar i beaktning avståndet mellan ytorna och den strålande ytans storlek (då den bestrålade punkten ligger i normalriktning från den strålande ytan) [-]

### 2.2.4 Massförlust och förbränning

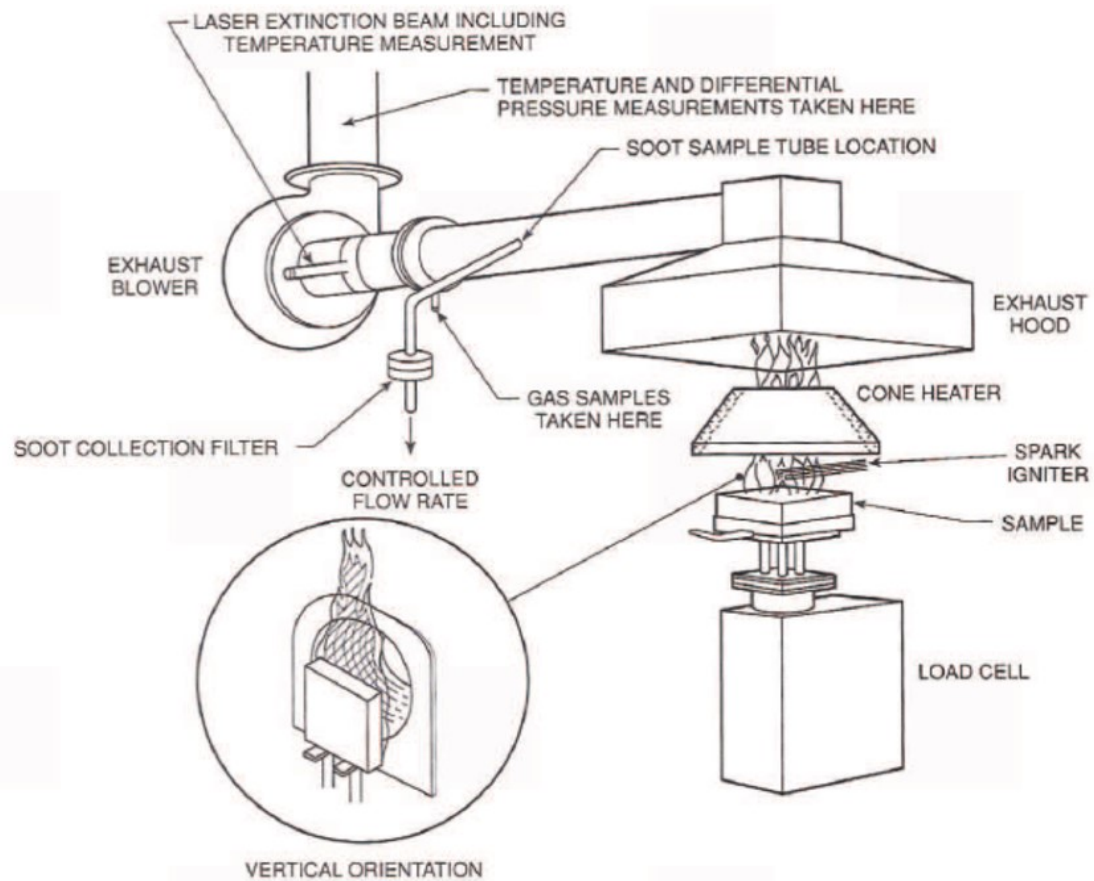
Massförlust är ett uttryck som beskriver den del av ett materials massa som försvinner i form av förbränning eller avdunstning. När ett material brinner sker en kemisk reaktion mellan bränsle, syre och värme som bildar produkter så som koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), syre, aska och sot. Gaserna som bildas beror på vilken typ av material (bränsle) som brinner. Oberoende av bränslesort är denna reaktion alltid exoterm, vilket betyder att energi avges i form av värme (Dunn, 2017). Det kan även ske en så kallad glödbrand vilket betyder att materialet förbränns utan att flammor bildas. Detta fenomen sker främst i porösa material där värmen gör att materialet producerar gaser som koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), kolmonoxid (CO) och pyrolysgaser, samt formar en stel förkolnad yta. Pyrolysgaserna som bildas kan i vissa fall, under rätt omständigheter, sedan antända. Även för glödbränder sker en exoterm reaktion då materialet förbränns (McLaggan, 2016).

### 2.2.5 Konkallorimeter

Konkallorimetern är ett instrument som uppfanns i början av 1980-talet av Dr. Vytenis Babrauskas. Med hjälp av en uppvärmd kon bestrålar konkallorimetern en  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  stor provkropp i antingen horisontell eller vertikal position. Detta instrument kan mäta provbitens brandtekniska egenskaper så som förbränningshastighet, förbränningsenergi vid fullständig förbränning, massförlust, antändlighet, giftiga gaser, rök och sot. Den data som tas fram används vanligen vid jämförelse av olika material, som indata vid simuleringar och beräkningar. Den kan också användas för att få reda på termiska egenskaper som ej går att ta fram med hjälp av beräkningar, till exempel förbränningshastigheten (Babrauskas, 2016).

Mätmetoden som konkallorimetern använder kallas "Oxygen Consumption Method". Detta är en metod baserad på Thorntons upptäckt, år 1917, som visade att de flesta organiska material släpper ifrån sig en konstant mängd värme per massenhet syre som använts till fullständig förbränning. Detta värde erhöles, efter flertalet experiment, till  $13,1 \text{ MJ/kg}$  för det förbrända syret och visar sig i praktiken stämma med en felmarginal på  $\pm 5 \%$  för de flesta organiska material. Det går alltså att mäta mängden förbränt syre för att ta reda på mängden värme som frigjorts (Janssens, 2016) (Babrauskas, 2016).

I Figur 1 nedan går det att se konkallorimeterens olika komponenter. Materialbiten som ska testas, Sample, placeras i en hållare som tillåter en storlek på  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  och ett djup på  $5 \text{ cm}$  och en exponerad yta på  $9,4 \times 9,4 \text{ cm}^2$ . Denna placeras sedan på vågen, Load cell, i antingen horisontell eller vertikalt läge, som båda visas i Figur 1, för att därefter bestrålas av konen, Cone heater. Konen använder så kallad direktverkande elvärme för att bestråla provkroppen och är uppbyggd av en lång tjock metalltråd som snurrats till en konform utan topp. Denna form har bevisats bra för att få en jämn strålning över hela provet. Hade toppen av konen inte tagits bort hade strålningen istället blivit högre i mitten av provet. Mellan konen och provkroppen är en elektrisk gnista, Spark igniter, placerad som kan antända eventuella brandgaser. Gaserna tas sedan upp av en huv, Exhaust hood, där de transporteras vidare genom ett rör. Här har det kopplats mindre rör och system som tar prover på gaserna. Det första röret, Soot sample tube, tar prover av gaserna för att sedan beräkna sotmängden (per gram förbränt material) med hjälp av ett filter placerat längre ut på röret, Soot collection filter. Soot sample tube och Soot collection filter finns dock inte på den konkallorimeter som använts vid experimenten i detta arbete. Därefter sitter ett ringformat provtagningsystem, Gas samples, som mäter mängden syre,  $\text{O}_2$ , kolmonoxid,  $\text{CO}$ , och koldioxid,  $\text{CO}_2$ . Detta är ett specialdesignat system där hålen som tar proverna är placerade i motsatt riktning mot luftflödet för att förhindra att de täpps igen av sot och smuts. Den optiska tätheten mäts sedan med hjälp av en helium-neonlaser och ett termoelement placerade innan utsuget, Laser extinction beam (Babrauskas, 2016).



Figur 1. Konkalorimeterns olika delar (Babrauskas, 2016)

### 2.2.6 Passivt brandskydd förr

I dagens samhälle finns det så många regler kring hur byggnader ska byggas på ett brandsäkert sätt att det finns personer som jobbar med detta på heltid. Dock har detta inte alltid varit fallet då det förr i tiden inte var helt ovanligt att hela byar brann ned. De första lagarna i Sverige gällande brandsäkert byggande kom på 1280-talet och gällde bara ett fåtal städer så som Stockholm och Nyköping. Denna lag behandlade skyddsavstånd och sa att avståndet skulle vara minst 2 fot (ca 60 cm) mellan hus och att vägarna skulle vara minst 8 alnar (ca 4,75 m) breda (Albinson, 2005).

År 1357 formulerades den första lagen kring brandskydd som gällde hela Sverige. Här går det att hitta regler angående släckning av bränder och försiktighet med eld. Men det finns även ett krav på passivt brandskydd gällande husen, dessa ska nämligen byggas med stengrund. Ungefär 200 år senare försökte Gustav Vasa få invånarna att bygga stenhus istället för trähus och byta sina brandvänliga halm- och vedtak mot det brandbeständiga materialet tegel. Detta fanns det dock inga lagar på. Efter ytterligare 100 år, 1694, kom en lag som gjorde att inga byggnader fick uppföras utan tillstånd, det krävdes alltså något liknande bygglov för att kunna bygga. Det var då även krav på att det skulle finnas en byggmästare som hade ansvaret för bygget och det var även denna som var ansvarig om byggandet inte gått rätt till. Det blev även förbud mot "eldfarliga byggnader och uppslag". Här fanns även regler om att städer skulle indelas i kvarter och att gator skulle vara 24 alnar (ca 15 m) breda och gränder skulle vara 16 alnar (ca 10 m) (Albinson, 2005).

Stadsbränder var ett stort problem under 1700-talet så år 1763 fastställdes en byggnadsordning för Stockholm som sedan blev ett föredöme åt andra byggnadsordningar. Denna behandlade återigen

gatubredden, men även vilka material husen skulle byggas i. Här skulle nämligen sten användas så mycket som möjligt och krav fanns på så kallad "riskfri takbeläggning". Det fanns även krav på brandfria vindar utan boningsrum, och om dessa skulle inredas var det krav på brandbotten. Eldfarliga byggnader skulle stå på säkert avstånd från boningshus, eldstäder skulle ha en betryggande skorstensrensning och placeras med avstånd till bjälkar och timmer (Albinson, 2005).

Mot slutet av 1700-talet påbörjades ett projekt gällande en allmän brandförsäkringsfond, för att ta del av denna skulle vissa krav ställas på brandsäkerheten av den gällande byggnaden. Exempel på några av dessa krav var att halmtak helt skulle förbjudas, byggnaderna skulle vara byggda och granskas ur ett brandskyddsperspektiv, skydd mot eldfarliga och explosiva ämnen skulle finnas och tillstånd skulle även krävas vid förvaring av dessa. Detta förslag gick dock aldrig vidare till att bli en lag, men hade trots detta stort inflytande på hur brandsäkerhetsfrågan i framtiden behandlades vid byggandet av nya byggnader (Albinson, 2005).

I början av 1800-talet utarbetade Allmänna Brandförsäkringsfonden direktorer för att öka brandsäkerheten för bebyggelsen. Dessa togs fram i ett samarbete mellan myndigheterna och försäkringsbolag. Det blev därefter krav på att alla städer skulle ha såväl byggnads- som brandordningar. Ny tomtreglering skulle även upprättas av landshövdingarna efter större eldsvådor och en plankarta skulle tas fram där vägarnas bredd skulle ligga på minst 20 alnar (ca 13 m). Det var även till viss del landshövdingarnas ansvar att reglera bebyggelsen i städerna (Albinson, 2005).

År 1874 kom en ny byggnadsstadga som inte längre dominerades av brandskyddskraven, nu ställdes det även krav på aspekter som hygien, estetik och kommunikation. Här får byggnadsfrågorna en egen stadga med stora anknytningar till brandstadgan. Byggnadsstadgan innehöll till exempel krav som att kvarter måste byggas på ett sätt som gör att inte släckningsarbetet försvåras vid brand, medan brandstadgan innehöll regler kring släckande brandskydd och sotning. Här var försäkringsbolag fortfarande medverkande vid beslutsfattandet och samarbetet mellan dessa och myndigheterna avtog inte förrän på 1950-talet då försäkringsbolagen inte längre medverkade (Albinson, 2009).

År 1931 kom den första uppdaterade versionen av byggnadsstadgan, efter det har denna samt brandstadgan under åren utvecklats i takt med att byggnadstekniken förändrats. Denna utveckling har sedan lett fram till den Plan och bygglag vi har idag (Albinson, Bygglagar, 2005) (Albinson, 2009).

### 2.2.7 Brandspridning mellan hus

En brand som startat i en byggnad kan spridas vidare till en annan på flera olika sätt, exempel på dessa är: strålning, konvektion och gnistor (Björnfot, 2008).

#### 2.2.7.1 Strålning

Vid en brand avger flammans från det brinnande objektet, och även de varma brandgaserna som bildas, värmestrålning. I Ekvation 4, avsnitt 2.2.3.3, går det att se att det är brandens temperatur, storlek och avstånd som bestämmer hur stor den infallande strålningen blir. Om avståndet till branden är litet blir den infallande strålningen högre och ju högre brandens temperatur är, desto högre blir strålningen (Glenting, 2002).

Antändning på grund av strålning är den vanligaste orsaken till brandspridning mellan byggnader. Här är den svaga punkten ofta fönster. Vid en rumsbrand i ett hus kan alltså fönsterna spricka och därmed släppa ut flammor som, beroende på fasadmaterial, kan antända fasaden ovanför fönstret. Grannhuset med fasaden mittemot det spruckna fönstret börjar bestrålas och beroende på material och om det regnar gnistor från den brinnande byggnaden kan detta hus också antändas. Gnistorna agerar nämligen som pilotlåga och gör att det inte krävs en lika hög strålning för att materialet ska

antända (Glenting, 2002). För trä krävs det till exempel en strålning på  $28 \text{ kW/m}^2$  för spontan antändning medan det endast krävs  $12 \text{ kW/m}^2$  om en pilotlåga finns (Drysdale, 2011).

#### 2.2.7.2 Konvektion

Som nämnts konvektionsavsnittet, avsnitt 2.2.3.2, är konvektion värmeöverföring genom rörelse av en fluid, vilket i detta fall är brandgaserna från det brinnande huset som värmer upp en närliggande byggnad. Här är vinden en faktor som har en stor påverkan då denna kan transportera brandgaserna till ett intilliggande hus och trycka in de genom otätheter i byggnaden. Är energiinnehållet i dessa gaser tillräckligt högt kan brännbart material i denna byggnad antända. Dock skulle strålningen från brandgaserna i detta fall ha en större påverkan på brandspridningen (Glenting, 2002).

#### 2.2.7.3 Gnistor

Små glödande partiklar kan stiga och spridas med hjälp av varma brandgaser och när dessa gaser sedan kyls kommer gnistorna falla ned igen och bilda ett så kallat Gnistregn. De glödande partiklarna kan då landa på horisontella ytor, så som tak, fönsterbleck eller trappsteg, på ett intilliggande hus och starta en brand. På samma sätt kan större brinnande föremål, så som takspån eller takstickor, transporteras. Detta fenomen kallas Flygbränder och kan sprida nya bränder på stora avstånd från originalbranden (Glenting, 2002).

### 3 Experiment i konkalorimetern

Nedan presenteras de experiment som använts för att ta fram data för jämförelser av brandegenskaper mellan hampakalk och övriga isoleringsmaterial.

#### 3.1 Metod

För att ta reda på hur bra materialet hampakalk mäter sig med andra isoleringsmaterial har försök valts att utföras i en konkalorimeter. Detta eftersom det då, med hjälp av en våg och termoelement, går att få ut data om materialets värmeisoleringsförmåga, massförlust, koldioxid- och kolmonoxidhalterna i eventuella brandgaser. Konen och provkroppen placeras vertikalt för att kunna bestråla materialet från sidan och bättre likna förhållanden som uppstår mellan fönster och vägg på två byggnader mitt emot varandra.

Provkropparna som ska bestrålas har en area på  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  och är 5 cm tjocka. I dessa placeras tre termoelement på djupen 2, 3 och 4 cm från materialets bestrålade yta. Hålen som termoelementen placeras i förborrades med handborrmaskin, med maskeringstejp på borren för att markera djupet som hålet skulle vara. Markeringar gjordes även på termoelementen för att dessa skulle placeras på ett korrekt djup. För att få rätt storlek på provkropparna fick de skäras ut ur de större format de införskaffades i. Kanterna av provkroppen kläs i aluminiumfolie för att minska randeffekter innan den placeras i en stålform. Stålformen begränsar den yta av provkroppen som bestrålas till  $9,4 \times 9,4 \text{ cm}^2$ . När konen nått önskad strålning placeras stålformen på vågen 2,5 cm från konen och experimentet startar. Mellan provkroppen och konen finns även en gnisttändare som är igång under hela experimentet för att antända eventuella pyrolysgaser.

I Figur 2 nedan syns en provbit som förberetts och fästs i hållaren innan försök i konkalorimetern. Bilden till vänster visar provbiten, i detta fall stenullsisolering, framifrån. Här går det att se stålformen provet placerats i, provets exponerade yta samt lite av den aluminiumfolie som provets kanter klätts. I mitten syns provets baksida, här har termoelement först placerats, sedan ett par tunna lager isolering för att minska värmeförluster till baksidan och till sist en stenskiva som spänns fast med hjälp av ståltråd och en mindre stenskiva. Det går även att se de tre termoelementen som kommer ut under stenskivan i botten av formen. Till höger visas en bild över termoelementens olika placeringar i sidled i kroppen



Figur 2. Provbiten placerad i formen och förberedd inför experiment i konkalorimetern, samt schema över termoelementens placering sett framifrån



Två försök genomfördes med varje material, ett för varje strålningsintensitet. Strålningen från konen mot provkroppen ställs in på 10 kW/m<sup>2</sup> vid ena försöket och 20 kW/m<sup>2</sup> vid andra. Försöken pågick i 30 minuter där mätningar från konkalorimetern och mätningar från termoelementen loggades varje sekund.

Kristin Balksten är delaktig i Spara och Bevara, Energimyndighetens forskningsprogram för energieffektivisering i kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Kristin tillhandahöll en lista med material som är intressanta att jämföra hampakalk med, och de material som testas i arbetet valdes utifrån listan. Här valdes de material som gick att få tag på och använda inom tidsramen av detta projekt. Materialen som valts, provbitarnas vikt och materialegenskaper finns i Tabell 1 nedan. Här syftar "Provbit 1" på den provbiten som används vid experimentet med strålningen 10 kW/m<sup>2</sup> och "Provbit 2" på den som används vid 20 kW/m<sup>2</sup>.

Tabell 1. Massan för provbitarna av de olika materialen, samt materialens densitet och värmekonduktivitet

Material	Massa Provbit 1 [g]	Massa Provbit 2 [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Värmekonduktivitet (λ) [W/m*K]
Träfiberisolering	19,5	18,7	40* a)	0,038* a)
Linullisolering	20,1	24,8	45 b)	0,038 b)
Cellplast (EPS)	6,2	7,2	13**	0,038 c)
Stenullisolering	62,1	69,4	130**	0,037* d)
Hampakalk	179,4	180,5	360**	-

\* - På grund av informationsbrist från leverantör har värden tagits från den mest troliga källan

\*\* - Ungefärligt värde

a – (Pavatex, 2018)

b – (Isolina, 2018)

c – (Beijer Byggmaterial, 2018)

d – (Rockwool, 2018)

Det finns flera material som kan användas vid blandning av hampakalk. Dels kan flera olika delar av hampan eller bara skäven användas, dels kan kalk framställt på olika sätt användas. Dessutom kan olika proportioner av de ingående materialen användas, och olika tillsatser kan blandas i (de Bruijn, 2012). Hampakalken som används i detta arbete har tidigare använts i ett examensarbete om akustik och blandades med följande proportioner och ingredienser:

7 delar hampaved

4 delar torrsläckt kalk

4,25 delar vatten

Då bulhusen i Visby har en stomme av trä bestäms strålningsnivåer från konen utifrån antändningsvärden av trä. Prover görs med två strålningsnivåer, ett över och ett under. Trä antänder generellt vid en infallande strålning på 12 kW/m<sup>2</sup>, vid närvaro av en pilotlåga och då yttemperaturen på träet uppnår 350 °C. För att trä ska antända spontant (utan inverkan av pilotlåga) krävs 28 kW/m<sup>2</sup> infallande värmestrålning och 600 °C yttemperatur (Drysdale, 2011). Eftersom konkalorimetertesterna genomförs med en gnisttändare sätts värmestrålningen till 10 och 20 kW/m<sup>2</sup>, för att se hur materialen står emot dels en strålning lägre än vad som krävs för att antända trä, men även en som är högre. Gnisttändaren motsvarar en pilotlåga.

Strålningsnivån 10 kW/m<sup>2</sup> motsvarar värmestrålningen 3 m från en flamma som är 2,2 m hög, 0,8 m bred och har en flamtemperatur på 1050 °C, se Bilaga F för uträkning. Den högre strålningen motsvarar samma storlek på flamma men på 2 m avstånd och med en flamtemperatur på 1090 °C, se Bilaga F för



uträkning. Bränder i fönster kan uppnå temperaturer av 1100 °C (Drysdale, 2011). Syftet med dessa beräkningar är att kvantifiera strålningsnivåerna som valts, inte att motivera de. Däremot kan avstånden i beräkningarna tänkas förekomma i Visby, där reglerna som fanns när husen byggdes inte verkar ha följts. Reglerna ställde krav på en gatubredd på 10 m, men som det går att se i Figur 3 nedan är detta inte alltid fallet.



*Figur 3. Bild tagen på Hästgatan i Visby innerstad , här går det tydligt att se att avståndet mellan husen avviker från breddkravet på 10 m (Foto: Stefan Svensson)*

## 3.2 Resultat

I denna del introduceras de resultat som erhållits efter försöken i konkalorimetern.

### 3.2.1 Materialpåverkan

Nedan presenteras bilder som tagits före och efter experimenten för de olika materialen och strålningsintensiteterna, för att ge en uppfattning av hur dessa påverkats visuellt av försöken.

#### 3.2.1.1 Stenull

Vid båda experimenten med stenullsisoleringen syntes ingen större reaktion i konkalorimetern, det syntes varken rök eller flammor. Bilder från experimenten visas i Figur 4 nedan. Här går det i bilden längst till vänster att se hur provkroppen såg ut innan experimentet. På bilden i mitten syns kroppen som bestrålats med  $10 \text{ kW/m}^2$  och på bilden till höger syns kroppen som bestrålats med  $20 \text{ kW/m}^2$ , i 30 minuter vardera. Det går att se att båda kropparna efter bestrålning fått en något gråare nyans på ytan. Detta gäller dock enbart den yta som exponerats för strålningen då det går att se att kanterna, på den högra bilden, fortfarande har samma färg som stenullen hade innan experimentet påbörjades. Det går även att se att den kropp som utsatts för den högre strålningen har fått en tätare grå färg än kroppen som utsatts för den lägre, som är lite melerad med sin ursprungliga gulaktiga färg.

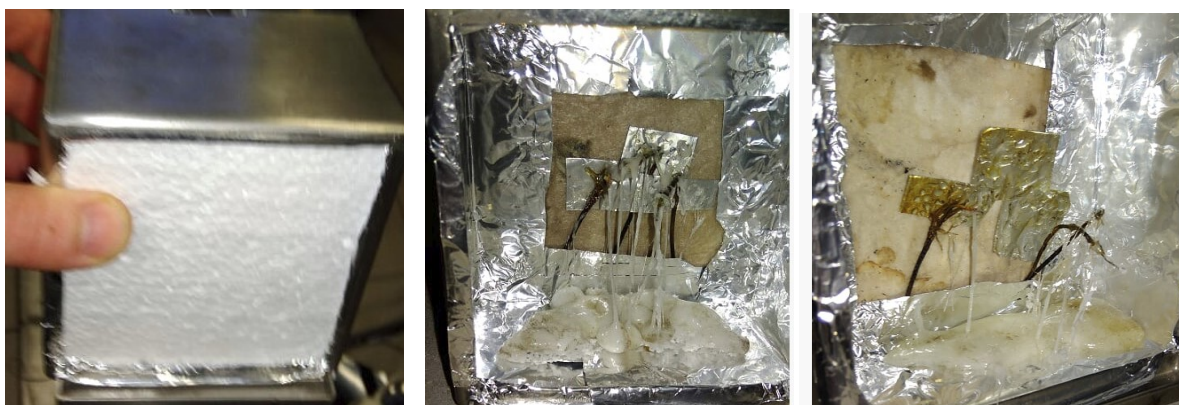


Figur 4. Stenullsisolering innan värmestrålning, efter försök med  $10 \text{ kW/m}^2$  och efter försök med  $20 \text{ kW/m}^2$

#### 3.2.1.2 EPS

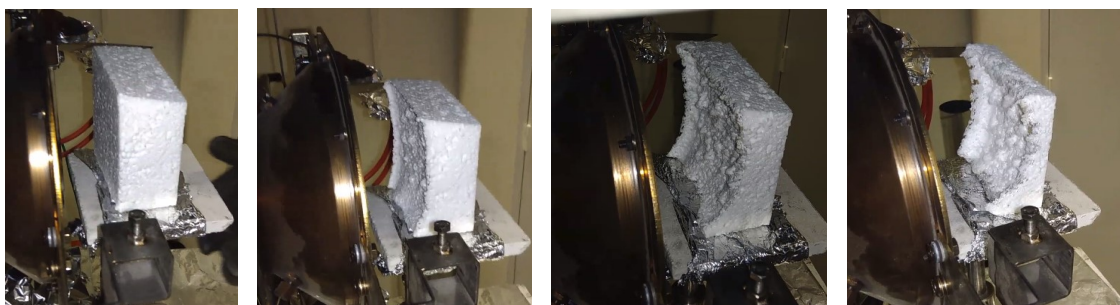
Vid experimenten med EPS smälte materialet inom de första minuterna vid båda försöken. Det gick även att se lite rök som sedan avtog i båda fallen, där röken var till synes något tätare i experimentet med  $20 \text{ kW/m}^2$ . I Figur 5 nedan går det att se hur provbitarna såg ut före och efter de två experimenten. På bilden längst till vänster visas provkroppen innan den placeras i konkalorimetern och bestrålas. På bilden i mitten syns provkroppen som exponerats för  $10 \text{ kW/m}^2$  och till höger syns kroppen som utsatts för  $20 \text{ kW/m}^2$ . Som det går att se har båda provkropparna smält till en klump av hård plast med tunna trådar av plasten som hänger från de termoelement som placerats i materialet. Det går även att se att plasten som utsatts för den högre strålningen är en mer jämn klump och något gulare än den som utsatts för lägre strålning, som ser något fluffigare och ljusare ut. Här går det även att se att termoelementen blivit mörkare och bränts mer vid  $20 \text{ kW/m}^2$  än  $10 \text{ kW/m}^2$ . Det silvriga som syns runt kanterna är den aluminiumfolie som provets kanter klätts i för att minska randeffekter i provkroppen. Det syns även silvrig tejp som använts för att fästa termoelementen i provbiten.





Figur 5. Expanderad Polystyren (cellplast) innan exponering, efter försök med 10 kW/m<sup>2</sup> och efter försök med 20 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 6 illustreras hur EPS biten smälter ihop då det placeras framför konen och bestrålas med 20 kW/m<sup>2</sup>. Här har biten inte placerats lika nära konen som i experimenten, den har inte heller placerats i formen och klätts med aluminiumfolie, detta för att lättare kunna se provbiten och bättre visa hur kroppen smälter. Bilderna är tagna 0, 5, 20 respektive 40 s efter materialet placerats framför konen.



Figur 6. Synlig sekvens av hur EPS reagerar vid direkt värmestrålning på 20 kW/m<sup>2</sup>

### 3.2.1.3 Hampakalk

För hampakalken gick det vid experimentet med den lägre strålningen inte att se varken rök eller lågor. Däremot gick det att se rök, som mot slutet av experimentet avtog, från materialet vid experimentet med högre strålning. I Figur 7 nedan syns bilder från experimenten. På bilden längst till vänster syns provkroppen innan experimentet utförts. På bilden i mitten syns kroppen efter att ha bestrålats med 10 kW/m<sup>2</sup> och på bilden till höger visas kroppen efter att ha bestrålats med 20 kW/m<sup>2</sup>. Provkroppen som utsatts för den lägre strålningen har fått en något gulare färg än materialet hade innan experimentet, medan kroppen som utsatts för den högre strålningen fått en svart sotig yta. På bilden till höger går det även att se att soten har samlats i de hål och ojämnheter som finns på materialets yta.



Figur 7. Hampakalken innan exponering, efter försök med 10 kW/m<sup>2</sup> och efter försök med 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning

I Figur 8 nedan går det att se en bit hampakalk med ett "skadat" ytterskikt. När hampakalken sågades i rätt storlek smulade mycket av kalken bort i sågsnittet. I försöken i Figur 7 ovan exponerades en yta som torkat mot en temporär form som byggs upp vid installation av hampakalk i väggar. Den skadade biten har sedan placerats med den avsågade sidan mot konen som här strålar med 20 kW/m<sup>2</sup>. Eftersom biten sågats av täcktes inte all hampaskäv av kalk, och var därmed inte skyddade mot strålningen. Delar av den exponerade skäven började därmed glöda vilket syns på bilden. Inga mätningar gjordes i detta försök eftersom anledningen till det var att försöka få en bättre bild av vad som händer i ytan på hampakalken. Ytan var inte särskilt synlig vid originalförsöken.



Figur 8. Hampakalk där yttersta kalkskiktet tagits bort och sedan utsatt för 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning

#### 3.2.1.4 Linull

Vid experimenten med linullsisoleringen började materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> att ryka något. Vid 20 kW/m<sup>2</sup> började det att producera stora mängder rök och antände sedan efter ca 30 s och fortsatte att brinna i ungefär en minut. Därefter slutade det att brinna men det fortsatte att ryka från provkroppen. I Figur 9 nedan går det att se hur provkroppen såg ut. På bilden längst till vänster går det att se hur materialet såg ut innan experimenten. På bilden i mitten syns materialet efter experimentet med 10 kW/m<sup>2</sup> och till höger syns materialet efter det bestrålats med 20 kW/m<sup>2</sup>. På biten som utsatts för den lägre strålningen går det att se hur materialet förkolnat och blivit svart på den delen av biten som



exponerats för strålningen. Det förkolnade lagret sträcker sig ungefär en centimeter in i materialet. Den bit som utsattes för den högre strålningen började brinna och lämnade därför bara kvar en ljusgrå hög med aska.



Figur 9. Linullisolering innan exponering, efter försöket med 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning och efter försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>

#### 3.2.1.5 Träfiber

Vid försöken med träfiberisoleringen började materialet i båda fallen producera stora mängder rök men aldrig brinna, se Figur 10 nedan. I bilden till vänster visas rökbildning vid försöket med 10 kW/m<sup>2</sup> som bildade mindre rök per tidsenhet än försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>, bilden till höger. Rökproduktionen pågick under en längre tid vid den lägre strålningsnivån.



Figur 10. Rökbildning vid försöken med träfiberisolering, där 10 kW/m<sup>2</sup> visas till vänster och 20 kW/m<sup>2</sup> till höger

I Figur 11 nedan syns materialet före och efter experimenten i konkalorimetern. Bilden längst till vänster visar materialet innan det bestråls, bilden i mitten visar materialet efter experimentet med 10 kW/m<sup>2</sup> och bilden till höger visar materialet efter experimentet med 20 kW/m<sup>2</sup>. Det går direkt att se att materialet i båda fall gått från en ljus gul/orange färg till att vara helt svart, provbiten har även dragit ihop sig och förkolnat. Provkroppen som utsattes för den högre strålningen krympte något mer än den som utsattes för den lägre strålningsnivån.



Figur 11. Träfiberisolering innan exponering, efter försök med 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning och efter försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>

### 3.2.2 Temperaturmätning

Nedan presenteras den data som tagits fram med hjälp av termoelementen, som vid experimenten placerats på olika djup i materialen. Här går det att följa materialens temperatur vid djupen 2 och 4 cm, vid värmestrålningen 10 kW/m<sup>2</sup> och 20 kW/m<sup>2</sup>. För att begränsa resultatavsnittets längd redovisas temperaturmätningarna på 3 cm djup i Bilaga A-E. För att bilda en uppfattning om hur temperaturen utvecklas genom materialen räcker det att titta på två mätpunkter i varje material.

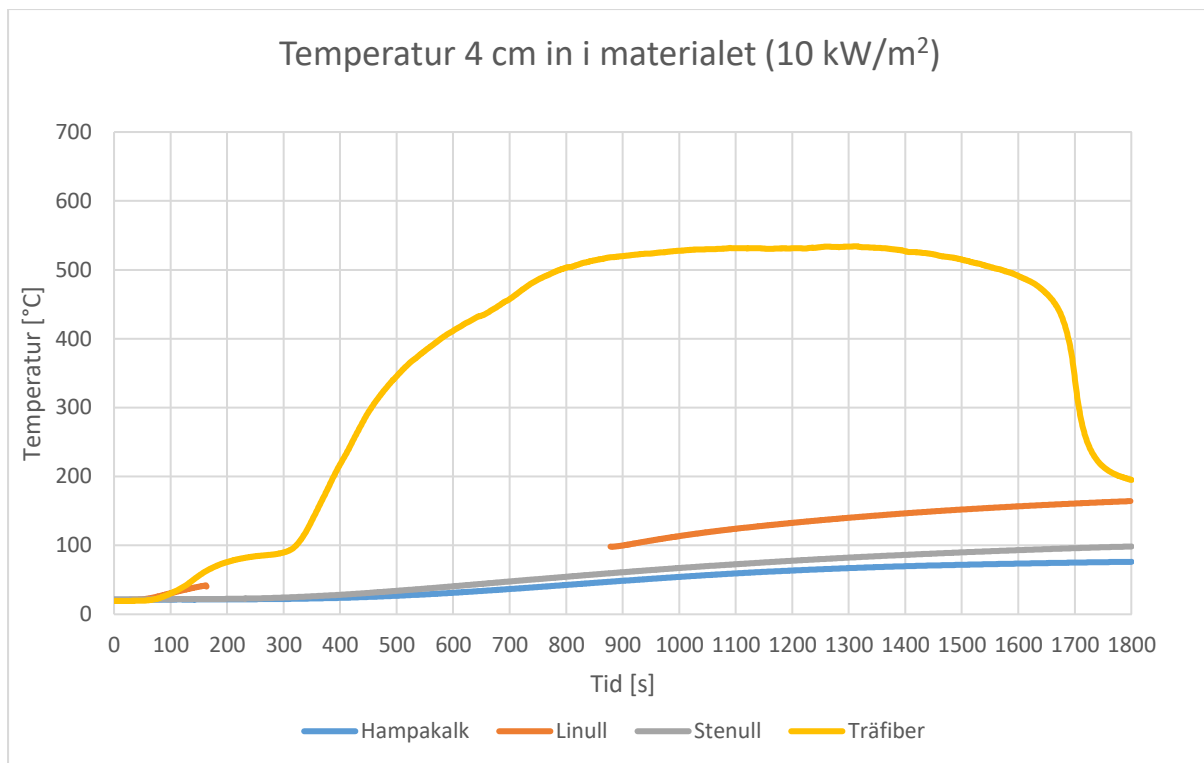
Eftersom materialet EPS smälte i början av försöket mätte termoelementen temperaturen i luften istället för materialet. Därför har datan för EPS inte inkluderats i graferna rörande temperaturen i resultatavsnittet. För resultat vid varje enskilt försök, se Bilaga A-E.

För att lättare kunna jämföra materialens temperaturökning vid de olika djupen har datan samlats i grafer baserat på termoelementets djup och konens strålningsintensitet. I Figur 12 nedan visas temperaturen för de olika materialen som uppmätts längst in i provkroppen, 4 cm från den bestrålad ytan, vid den lägre av strålningsintensiteterna 10 kW/m<sup>2</sup>.

Det går att se att det material som blir varmest är träfiberisoleringen som når en temperatur på över 500 °C. Det går att se att materialets temperatur snabbt ökar i början av experimentet tills materialet når en temperatur på ca 70 °C där ökningen minskar för att sedan drastiskt öka igen då materialet nått en temperatur runt 90 °C. Temperaturökningen ökar sedan och avtar när materialet når cirka 500 °C. Efter att ha hållit denna temperatur i ca 800 s sjunker materialets temperatur igen, först snabbt och sedan långsammare, för att hamna på en temperatur på cirka 200 °C.

Något gick fel i loggningen av data för termoelementet 4 cm in i linullsisoleringen, så kurvan är kapad mellan 150 s och 900 s. Det går därför bara att se att detta material efter att ha nått 100 °C har en stadig temperaturökning, som är något snabbare i början, och hinner nå en temperatur på 160 °C då experimentet avslutas. Eftersom detta arbete fokuserar på hampakalk, och andra mätpunkter finns för linullsisoleringen, nedprioriterades att göra om testet och i slutändan fanns inte tid.

Graferna för stenullen och hampakalken följer samma mönster med långsam och relativt konstant temperaturökning. Hampakalkens temperatur som ligger runt 75 °C vid experimentets slut, är något lägre än stenullens som ligger runt 100 °C.



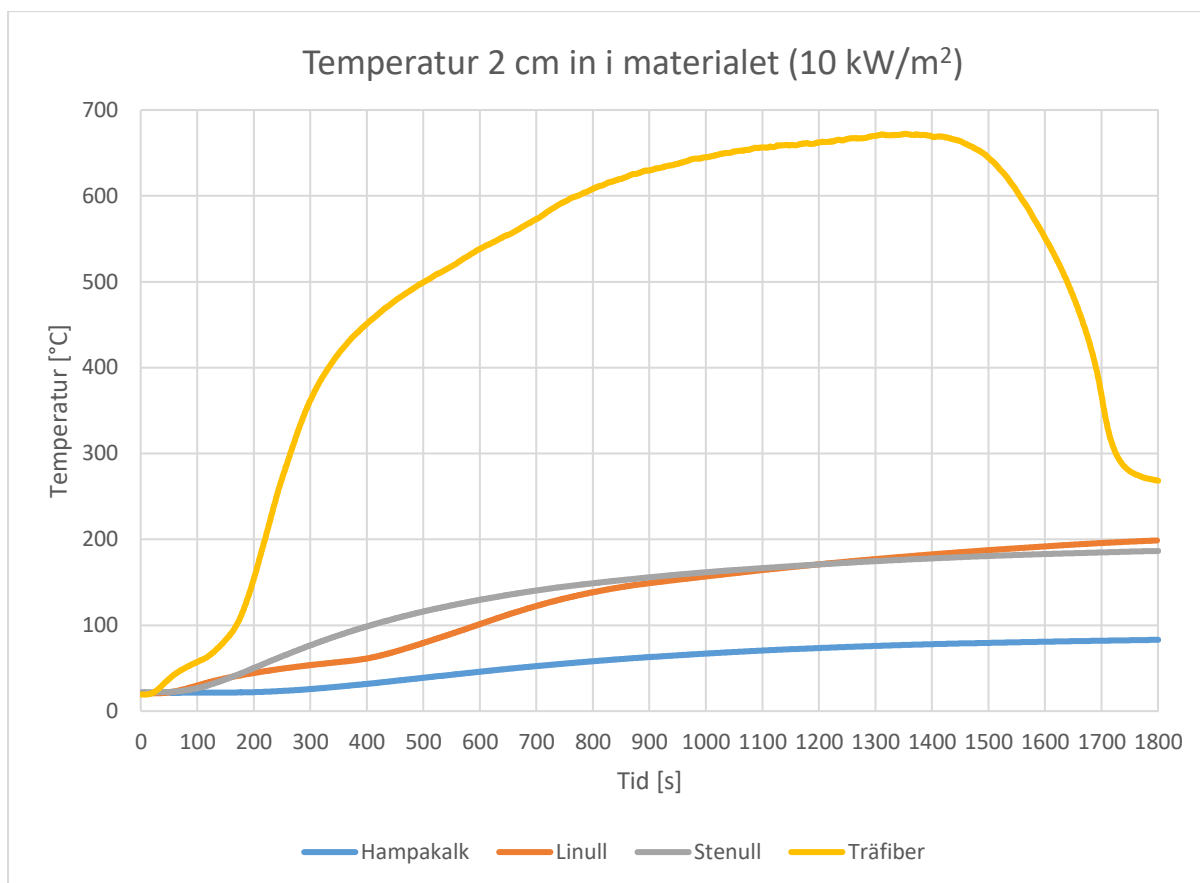
Figur 12. Temperaturen 4 cm in i provkroppen, vid en värmestrålning på 10 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 13 nedan visas resultaten för termoelementet som placerats närmst den bestrålade ytan, 2 cm in, vid samma experiment som ovan, 10 kW/m<sup>2</sup>. Här ser kurvan för träfiberisoleringen till en början ut på samma sätt som i Figur 12, men med en högre temperaturökningshastighet. Den har en konstant temperaturökning efter 150 s upp till ca 400 °C där ökningen avtar något. Materialet ökar sedan långsammare i temperatur upp till en maximal nivå på ungefär 670 °C innan kurvan vänder ner igen och temperatursänkningen avtar för att gå mot 270 °C.

Linullen visar sig ha en avtagande böjning, på samma sätt som träfiberisoleringen, i början av experimentet. Temperaturökningen avtar mot 70 °C för att sedan få en ökning mellan mot 140 °C som sedan avtar. Linullisoleringen når en maximal temperatur på cirka 190 °C innan experimentet avslutas.

Kurvan för stenullen beter sig ungefär som kurvan i Figur 12. Den värms upp långsamt men med en tydligare avtagande temperaturökningshastighet, och går mot en temperatur på cirka 190 °C.

Hampakalken beter sig även denna på samma sätt som i Figur 12. Temperaturen ökar även här med en avtagande hastighet, och slutar på cirka 80 °C. Hampakalken är det material som håller lägst temperatur vid 10 kW/m<sup>2</sup> och har därmed även den mest långsamma värmeledningen.



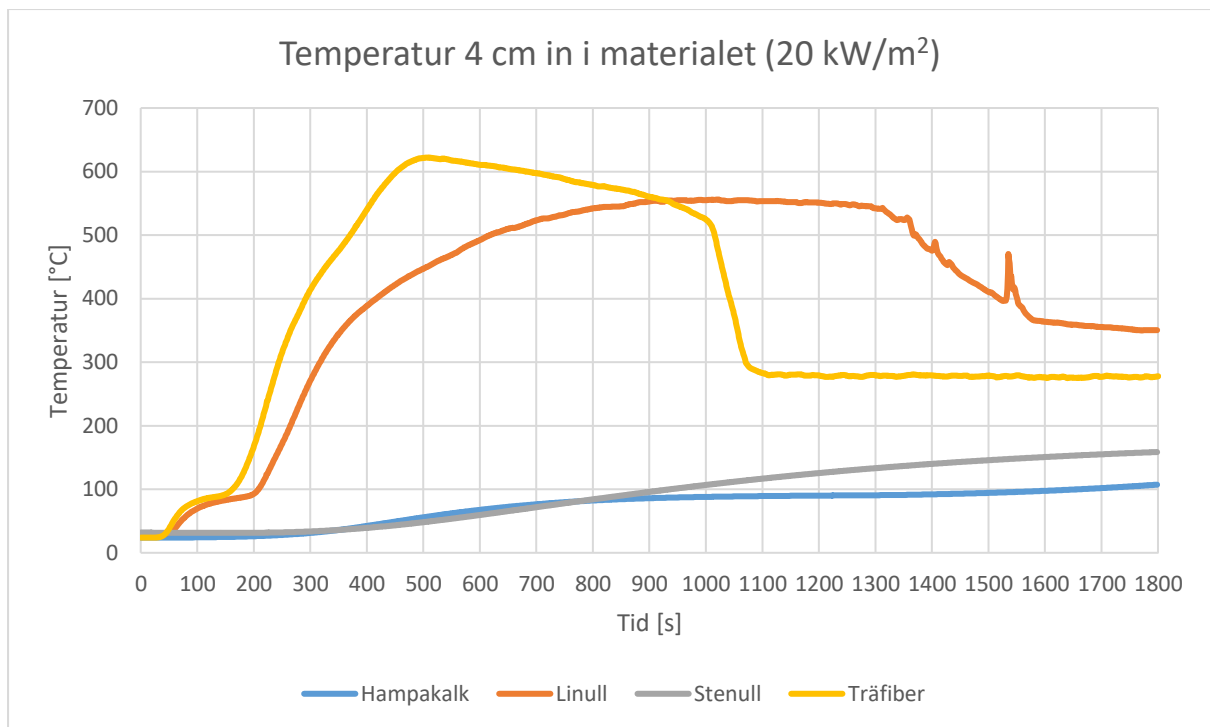
Figur 13. Temperaturen 2 cm in i provkroppen, vid en värmestrålning på 10 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 14 presenteras resultaten från termoelementen som placerats längst in i materialen, 4 cm från den exponerade ytan, som utsatts för en värmestrålning på 20 kW/m<sup>2</sup>. Kurvorna för träfiberisolerings och linullisolerings har liknande temperaturutveckling i början av experimentet. Temperaturen ökar avtagande mot cirka 90 °C för att sedan öka väldigt hastigt. Träfiberisolerings når snabbare sin maximala temperatur på ca 620 °C för att sedan långsamt bli svalare och vid cirka 500 °C snabbt svalna av och stabiliseras på runt 280 °C. Linullisoleringsens temperatur ökar även denna snabbt till en början men med avtagande hastighet mot sin maximala temperatur på ungefär 560 °C. Linullisolerings antände vid 30 s och sloknade vid 90 s.

Temperaturen för stenullen ökar långsamt och når sin högsta temperatur på 160 °C innan experimentet avslutas.

Temperaturen för hampakalk ökar på ett liknande sätt som för träfiberisolerings och linullen, men betydligt långsammare. Den har en avtagande temperaturökning mot lite under 100 °C, men börjar öka igen under de sista minuterna på försöket och hinner nå en temperatur på cirka 110 °C innan experimentet avslutas.



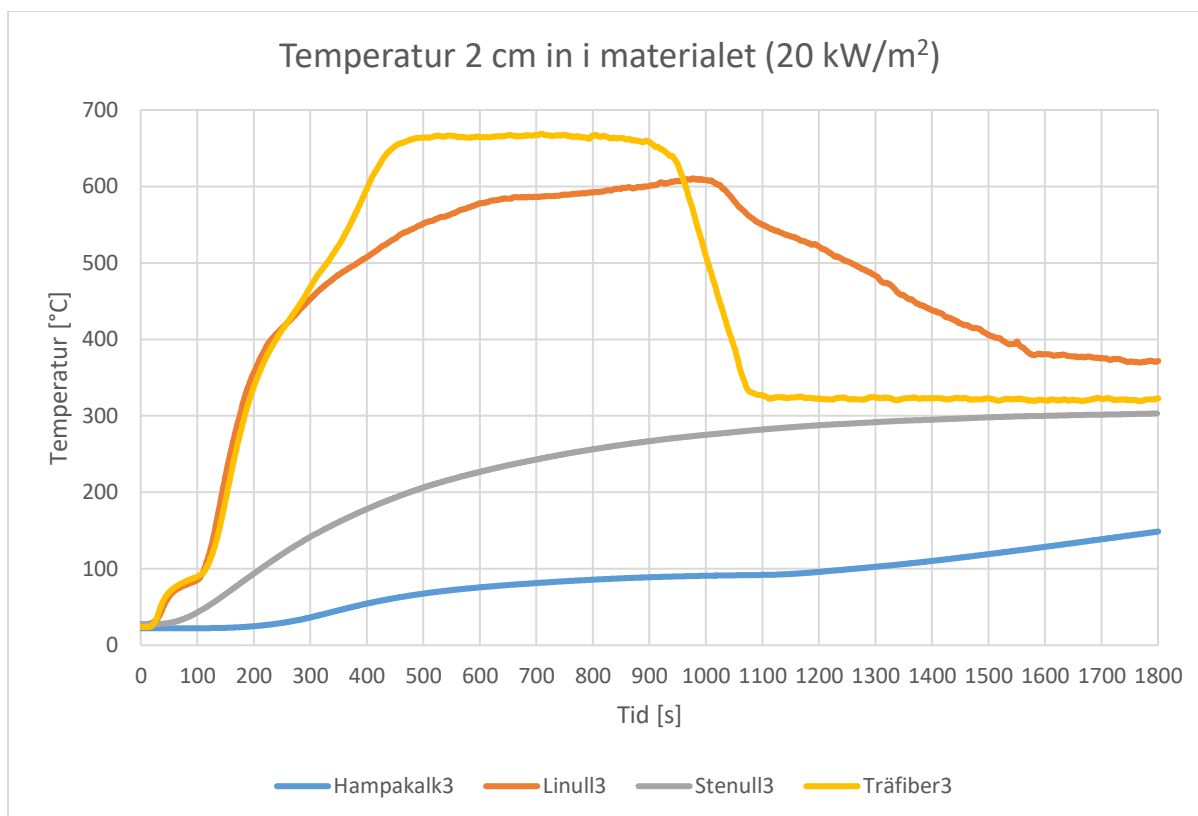


Figur 14. Temperaturen 4 cm in i provkroppen, vid en värmestrålning på 20 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 15 nedan visas resultaten från termoelementen som placerats närmst den bestrålade ytan, 2 cm in, för de olika materialen då de utsatts för en strålning på 20 kW/m<sup>2</sup>. Här följer träfiberisolerings och linullisolerings nästan exakt samma kurva de första 300 s. Temperaturen ökar här mycket snabbt förutom inledningen av kurvan som är avtagande mot cirka 90 °C. Efter de 300 s fortsätter träfiberisoleringsens temperatur öka i samma takt till den når en maximal temperatur på cirka 670 °C. Materialet håller denna temperatur i cirka 500 s innan temperaturen sedan snabbt sjunker och slutar på ungefär 320 °C. Temperaturen för linullisolerings ökar upp till ungefär 600 °C för att sedan avta ner till omkring 380 °C.

Stenullen beter sig på samma sätt som i föregående experiment och ökar långsamt i temperatur, med en avtagande hastighet mot ungefär 300 °C.

Temperaturen för hampakalken beter sig på samma sätt som i Figur 14, med en avtagande ökning mot cirka 100 °C varpå den ökar nästan konstant till cirka 150 °C i slutet på experimenttiden.



Figur 15. Temperaturen 2 cm in i provkroppen, vid en värmestrålning på 20 kW/m<sup>2</sup>

### 3.2.3 Massförlust

Här presenteras resultaten för massan som förlorats för de olika materialen vid experimenten, som tagits fram med hjälp av en våg. Här går det att se hur mycket av provbitens massa som försvunnit i form av gaser då materialet utsatts för värmestrålning.

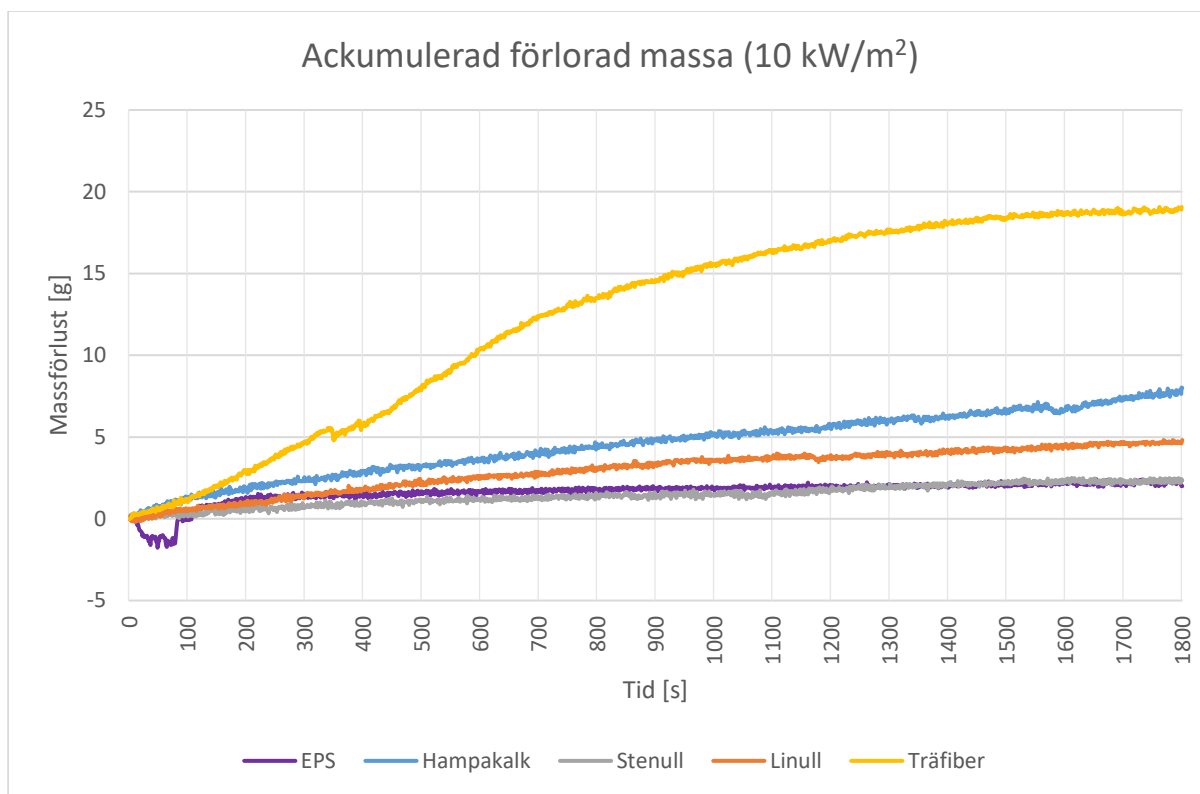
I Figur 16 nedan visas den ackumulerade massan som förlorats för de olika materialen vid strålningen 10 kW/m<sup>2</sup>. Här går det att se att träfiberisoleringen är det material som har högst massförlust och därmed avger mest gas. Hastigheten är ganska jämn de första 700 s för att sedan avta med tiden och få en total massförlust på cirka 19 g (97 %) när experimentet avslutas.

Massförlusten för linullisoleringen är något snabbare i början, men avtar sedan med tiden och får en total förlorad massa på 5 g (23 %).

Kurvan för EPS:en går under noll och blir negativ i början vilket antyder att massan här har ökat. Eftersom det inte är rimligt att ett material ökar i massa vid uppvärmning, antas dippen i grafen bero på mättekniska fel. Efter detta sker en snabb ökning i massförlust mellan 100-200 s för att sedan avta och få en konstant ökning resten av tiden. Den totala förlorade massan för EPS:en blir i slutändan 2 g (34 %).

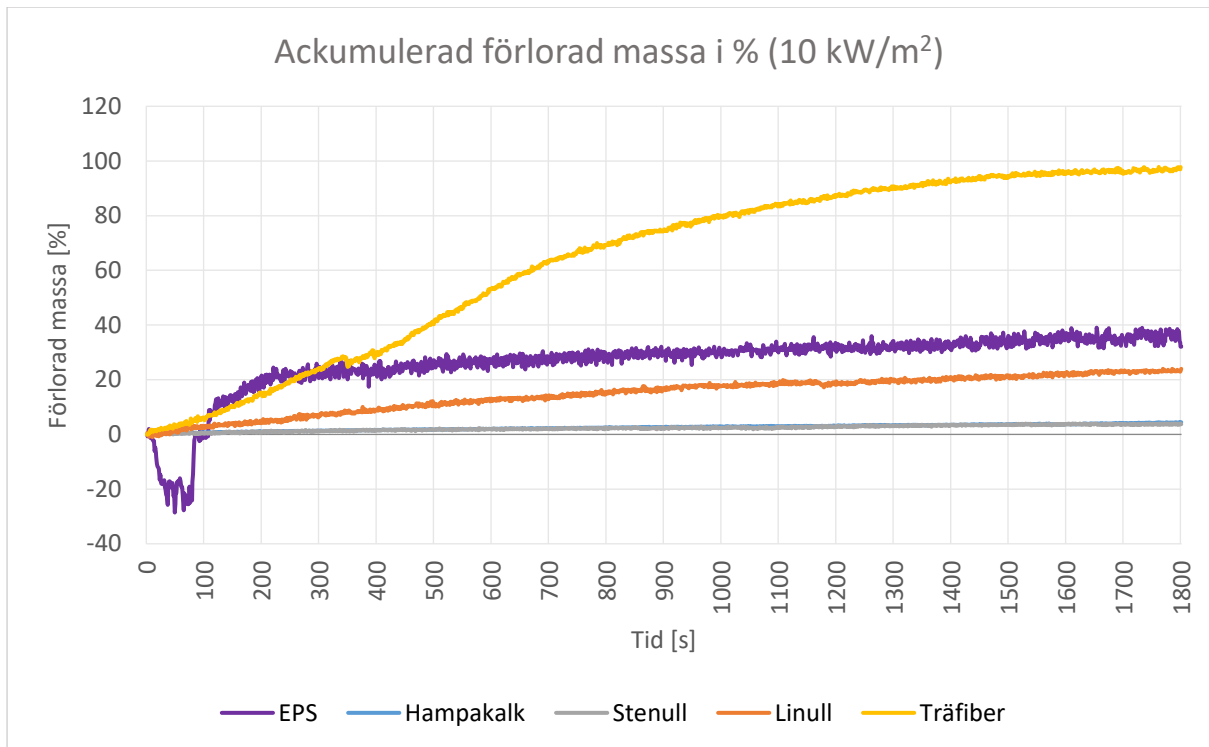
Stenullisoleringen har en konstant massförlust under experimentet och resulterar i en total förlorad massa på 2 g (4 %).

Massförlusten för hampakalk är konstant i stort sett hela tiden, och når i slutet av experimentet en total förlorad massa på nästan 8 g (4 %).



Figur 16. Uppmätt ackumulerad massa som förlorats vid varje sekund för de olika materialen vid 10 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 17 nedan visas samma data som i föregående figur, fast här representeras varje materials förlorade massa i form av procent av dess ursprungliga massa. Det går att avläsa att träfiberisoleringsen reduceras till runt 97 % av sin ursprungliga massa mot slutet av experimentet. Linullisoleringsen tappar 23 % av sin massa medan EPS:en, som bara tappade 2 g, tappar 34 % av sin startmassa. Hampakalkens kurva följer stenullens kurva väldigt nära, och vid slutet har båda tappat runt 4 % av sin startvikt.



Figur 17. Uppmätt ackumulerad massa som förlorats i procent av startvikt för de olika materialen vid 10 kW/m<sup>2</sup>

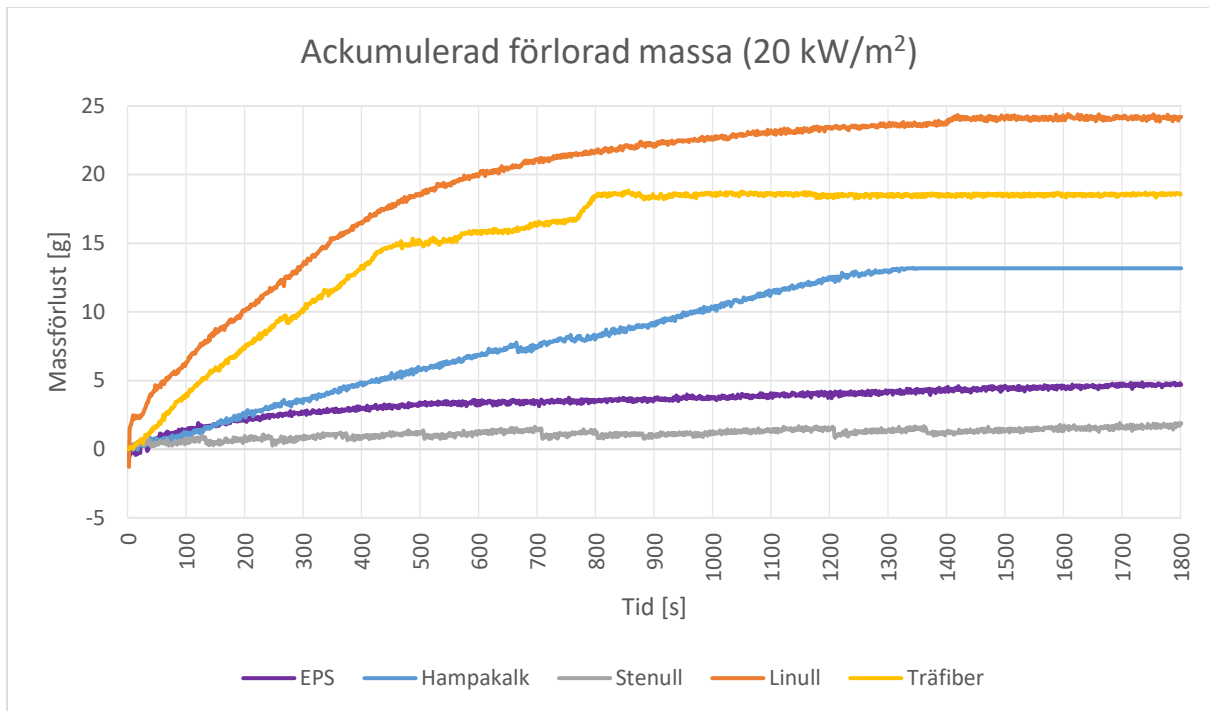
I Figur 18 nedan går det att se den ackumulerade massan som förlorats för de olika materialen vid strålningen 20 kW/m<sup>2</sup>. Träfiberisoleringen har en hög massförlusten i början av experimentet som sedan tydligt saktar av vid 430 s. Massförlusten stanna is stort sett av helt vid 800 s. Den totala förlorade massan blir här samma som i föregående experiment, ungefär 19 g (99 %), men uppnås tidigare vid 20 kW/m<sup>2</sup>.

Linullisoleringens massförlust är störst de första 400 s för att sedan minska med tiden och få en total förlorad massa på 24 g (97 %), vilket är nästan 20 g mer än vid försöket med 10 kW/m<sup>2</sup>.

Massförlusten för EPS:en är högst de första 100 s för att sedan avta med tiden och få en total förlorad massa på 5 g (64 %), vilket är lite mer än dubbelt så mycket som vid 10 kW/m<sup>2</sup>.

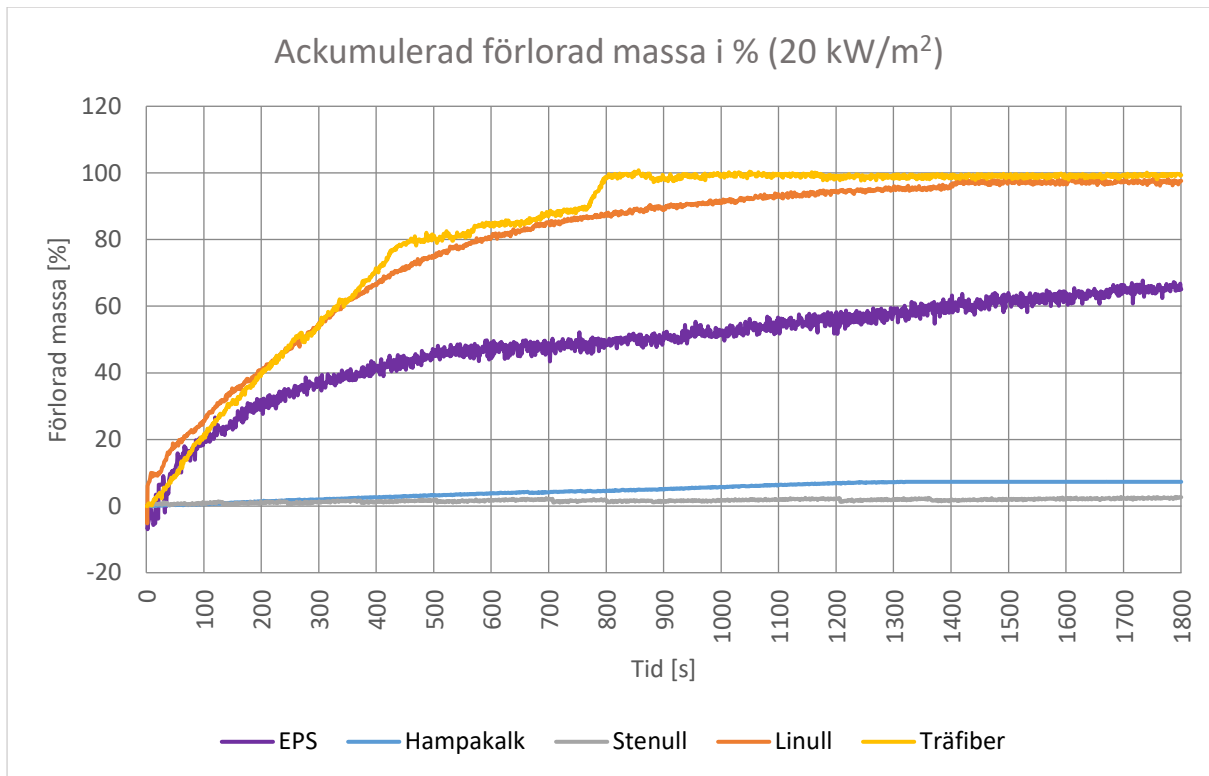
Stenullen tappar massa långsamt under hela försöket och har i slutet tappat runt 2 g (3 %) vilket är samma som vid den lägre strålningsnivån.

Hampakalken har en jämn massförlust fram till 1300 s för att sedan stanna av helt och totalt tappa 13 g (7 %) av sin massa, vilket är 5 g mer än vid 10 kW/m<sup>2</sup>.



Figur 18. Uppmätt ackumulerad massa som förlorats vid varje sekund för de olika materialen vid 20 kW/m<sup>2</sup>

I Figur 19 nedan går det att se samma data som i föregående figur men nu i form av procent av dess ursprungliga massa. Precis som i försöken med 10 kW/m<sup>2</sup> tappar träfiberisoleringsen störst andel av sin ursprungliga vikt, strax över 99 %. Linullen, som började brinna, tappar även den mycket av sin massa, över 97 %. EPS:en fluktuerar mest, och har efter 1800 s tappat runt 64 % av sin startvikt. Stenullen tappar runt 3 % och hampakalken 7 % av sina ursprungliga massor.



Figur 19. Uppmätt ackumulerad massa som förlorats i procent av startvikt för de olika materialen vid 20 kW/m<sup>2</sup>

## 4 Analys och diskussion

Som nämnts i teoriavsnittet antänds trä vid inverkan av pilotlåga då den infallande strålningen uppnår  $12 \text{ kW/m}^2$  och  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Det vore därför intressant att jämföra hur väl isoleringsmaterialen kan tänkas beskydda en trästomme från dessa förhållanden. Eftersom inga försök gjordes med en täckyta av fasadputs sker diskussionen utifrån ett scenario då fasaden på något sätt tagit skada i den utsträckningen att delar av bakomliggande isolering exponeras för direkt värmestrålning. Värmestrålningskällan i scenariot antas vara en brand från ett fönster i en byggnad mittemot.

Under tiden som husen i Visby byggdes, år 1720-1830, fanns det regler i Sverige om att gator skulle vara ca 15 m breda och gränder skulle vara 10 m. Tittar man däremot på hur husen faktiskt är byggda går det att se att detta inte alltid är fallet, i staden finns det nämligen många smala gränder runt 2-3 m breda. Det är därför ganska tydligt att lagarna från Stockholm inte tagits hänsyn till vid konstruktion av bulhusen i Visby. Detta innebär även att de strålningsnivåer som använts i experimenten kan förekomma vid en eventuell brandsituation här.

### 4.1 Materialpåverkan

Träfiberisoleringen krympte vid exponering av direkt värmestrålning, se Figur 11. Även om de gaser som bildades aldrig antände (Figur 10), kan krympningen av isoleringen tänkas exponera annat material i väggkonstruktionen. Dessutom kan luftspalter skapas intill stommaterialet, vilket ökar risken för spridning av brand. Krympningen inträffade betydligt snabbare vid den högre strålningen, men inte med en gång, så det kan antas ge skydd åt konstruktionen i alla fall en viss tid. Eftersom det inte gick att se in i provet särskilt bra har inga anteckningar gjorts för när krympningen kan skapa en luftspalt i försöken. Krympningen skedde till en mindre men sammanhängande kropp, men inga slutsatser kan dras om hur en större bit kan tänkas krympa, och inte heller hur den krymper om en liten del av den exponeras till strålning medan andra delar förblir oexponerade. Det går därför inte att avgöra om träfiberisolering kan skydda en konstruktion från brandspridning, utifrån resultaten från experimenten.

Linullen förkollade en bit in i materialet men genomgick ingen deformation vid försöket med  $10 \text{ kW/m}^2$ , se Figur 9. Vid försöket med den högre strålningen antände linullsisoleringen. Skulle en väggkonstruktion med linullsisolering få en fasadskada som exponerar linullen mot värmestrålning, kan det tänkas att konstruktionen står emot brand i minst 30 minuter vid tillräckligt låg infallande strålning. Antändning av linullen inträffade tidigt i försöket med den högre strålningen, så är fasaden skadad så att linullsisoleringen exponeras för värmestrålningsnivåer över  $20 \text{ kW/m}^2$  kan en brand spridas mellan byggnader på kort tid.

Den expanderade polystyrenen, EPS:en, smälte vid exponering till värmestrålningen i båda försöken, men antände ej. Det kan tänkas att den reagerar likadant även vid ännu lägre strålningsnivåer. Smältningen sker relativt snabbt, och skapar en luftspalt vilket ökar risken för brandspridning och antändning i stommaterialet. Gaserna som producerades vid försöken i konkalorimetern antände inte.

Stenullen genomgick ingen deformation under inverkan av någon av värmestrålningsnivåerna i försöken. Det kan förväntas reagera på ett liknande sätt i ett brandscenario där stenullen exponeras för direkt värmestrålning från en brand i motstående byggnad. Därmed kan stenull utgöra ett pålitligt skydd mot bildning av luftspalt, och antändning av stommaterial under minst 30 minuter.

Hampakalkens kropp förändrades inte under försöken, se Figur 7 på sida 16. Ingen krympning och inget sönderfall innebär att hampakalk förmodligen kan skydda bakomliggande väggkonstruktion från antändning och bildning av luftspalter, vid exponering till värmestrålning under minst 30 minuter.

Figur 8 visar en bild på när hampaskäven i en hampakalkbit glöder vid exponering för 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning. I fallet i Figur 8 exponeras en yta av hampakalken från ett sågat snitt. Då biten sågades smulades mycket av den torra kalken bort och lämnade hampaskävsändar stående fritt i luften. Under de aktuella försöken exponerades en yta av hampakalk som stelnat mot en temporär formskiva, och förekom inte fria hampaändar i den direkta ytan. Dock syns gropar i ytan vid försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>, bilden till höger i Figur 7 sidan 16, där sot har samlats. Det tyder på att förbränning har skett i groparna, och eftersom installationsformen inte haft kontakt med hampakalken i dessa, kan fria ändar av hampa förekommit här. Det skulle även förklara varför sotet samlats i håligheter. Anledningen till försöket med den sågade ytan var enbart för att observera synliga effekter på hampakalken, och således gjordes inga mätningar av temperatur eller massa.

Då hampakalk installeras i en byggnad kan det antas att det torkar till ett liknande resultat som de provbitar som användes under de aktuella testerna. Det kan dock också antas att om fasaden till en hampakalkisolerad byggnad skadas så att hampakalken blottas, så smulas kalken delvis bort och skapar en liknande yta som den i Figur 8. Det vore därför intressant att veta hur glödande hampaskäv bidrar till brand och brandspridning, det kan tänkas att glödande hampaskäv bildar oförbrända gaser som kan antändas av en pilotlåga vid tillräckligt höga koncentrationer av bränsle. Men för att de oförbrända brandgaserna ska nå en tillräckligt hög koncentration för att kunna antändas antas det behövas en relativt stor mängd exponerad hampaskäv. Det skulle därmed krävas att en stor del av väggens yta skadats. Det skulle även krävas att de oantända brandgaserna samlas på samma ställe vilket betyder att de alltså inte får transporteras bort av till exempel vinden. Detta anses därför vara ett osannolikt scenario som inte har speciellt stor inverkan vid brandspridning.

Gnisttändaren var, till skillnad från de aktuella försöken, inte närvarande vid situationen i Figur 8, dessutom är det möjligt att den gas som bildats vid det korta försöket inte haft tillräckligt hög koncentration för att bilda en brännbar blandning med luften.

## 4.2 Temperaturmätning

Som det går att se i Figur 12 - Figur 15 i resultatdelen, ökade temperatur mest i träfiberisoleringen där det uppmättes temperaturer över 600 °C vid båda strålningsnivåer. Då strålningen som använts i experimenten valts med avseende på när husens trästomme kan antändas var det troligt att även träfiberisoleringen skulle antändas under dessa förhållanden. Träfiberisolering impregneras dock ofta med ammoniumpolyfosfat eller borsalter för att stå emot antändning (Nord, 2013). Detta verkar vara fallet med provbitarna i experimenten, eftersom de inte antände trots kraftig rökutveckling. Provbiten förkolnade utan flammor i en glödbrand (dock utan synlig glöd). Denna reaktion är som innan nämnt exoterm vilket betyder att energi frigörs och leder därmed till att temperaturen kan bli högre än strålningskällan. Liknande gäller för linullen vid strålningen 20 kW/m<sup>2</sup> där materialet, efter det slocknat vid 90 s, lär ha fortsatt som glödbrand och producerat värme.

Träfiberisoleringens temperatur blir nästan konstant i slutet på försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>, Figur 14 och 15. Detta beror troligtvis på att träfibern slutat förbrännas och det som är kvar av materialet når en jämvikt i temperatur. Eftersom temperaturen är högre vid 2 cm (ca 325 °C) än vid 4 cm (ca 280 °C), bibehåller det som är kvar av träfiberisoleringen en isolerande förmåga.

Linullen mätte under 100 °C vid 100 s i försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>, i Figur 15, och brann mellan 30 s och 90 s. Det sker alltså inga drastiska förändringar av temperaturen inne i materialet under denna tid, trots att det antände vid 30 s, vilket delvis kan bero på materialets vatteninnehåll. Dessutom antände inte pyrolysgaserna förrän de lämnat stålformen, eftersom huvens fläkt var igång ovanför provkroppen hela tiden och därmed ventilerade bort gaserna från denna. Den låga temperaturen inne i materialet tyder alltså på att pyrolysen i huvudsak ägde rum precis vid materialets bestrålade yta.



Detta innebär att det fanns material kvar som isolerade termoelementen som satt längre in, och som inte pyrolyserade, vilket förklarar de låga temperaturerna i inledningen av försöket.

Det går dessutom att se att det fortfarande fanns material kvar efter att linullen slutat brinna. Dels eftersom temperaturen i materialet utvecklas på ett liknande sätt som i träfiberisoleringen, och dels eftersom provkroppen fortfarande tappar massa.

Linullisoleringens kurva i Figur 12 har kapats mellan punkterna 140 s och 882 s, på grund av att temperaturdata "hoppas" och bildar dels osammanhängande punkter, dels partier av sammanhängande linje längs med nollgradersstreck och även ett antal punkter där ingen mätning skett. Anledning till detta skulle kunna vara signalfel mellan dataloggern och termoelementet alternativt att termoelementet tagit skada vid tidigare försök och därmed inte fungerat som förväntat. Pålitligheten av temperaturdata för linullen som presenteras i Figur 12 anses god, då den följer någorlunda parallellt kurvan för temperaturen 2 cm in, se Figur 13, och även för 3 cm. För fullständig data på den kapade kurvan, se Bilaga C.

I början på kurvorna för linull och träfiber syns en lokal konvergering mot 100 °C, tydligt i Figur 15 på sida 22. Vid en närmre titt på hampakalkens kurva verkar samma sak ske, om än betydligt långsammare. I Figur 15, temperatur vid 2 cm och 20 kW/m<sup>2</sup>, verkar utjämningen mot 100 °C vara över vid runt 110 s för linull och trä, medan hampakalken fortsätter till runt 1200 s. Eftersom temperaturökningen avtar mot 100 °C, vattnets kokpunkt, antas detta bero på vatteninnehållet i kropparna, som innehåller organiskt material. När vatten tar upp tillräckligt med energi görs en fasomvandling från vätska till gas (vattenånga), och detta kräver mycket mer energi än för att öka vattnets temperatur med 1 °C. Det kan innebära att mindre energi finns kvar att värma upp det fasta materialet och skulle förklara utjämningen som skett. Vid jämförelse av temperaturen och massförlusten vid 20 kW/m<sup>2</sup>, kan man se att temperaturen i hampakalken börjat stiga igen efter 1300 s, vilket är ungefär samma tid som massförlusten avstannat på, Figur 18 och 14. Antagandet att vattenavdunstning står för massförlusten i hampakalken, stärks teorin om att temperaturutjämningen beror på fasomvandling av vatten, eftersom temperaturen ökar igen när vattenavdunstningen (massförlusten) avstannat. Samma koppling till massförlusten är inte lika tydlig i linulls- och träfiberisoleringen, eftersom dessa vid 20 kW/m<sup>2</sup> bildat andra gaser samtidigt.

Hampakalkens långsamma temperaturökning ser alltså ut att bero till stor del på vatteninnehållet. Var kommer då vattnet ifrån och är det säkert att det alltid finns vatten närvarande i materialet? Hampakalk har en hög porositet, över 70 % för blandningar som används i väggar (Arnaud & Gourlay, 2012). Porerna kan samla vatten genom att fukt i inomhusluft transporteras genom hampakalken i en vägg, där andelar av det kondenserar på grund av den lägre temperaturen längre ut. För att detta ska ske krävs att temperaturen och den relativa fuktigheten utomhus är lägre än inomhus. Hampakalk har visat sig ha goda egenskaper för fukttransport, och har höga värden jämfört med liknande material (de Bruijn, 2012).

Att materialet har goda egenskaper för fukttransport betyder att fukt lätt kan transporteras genom materialet och snabbare kan hamna i jämvikt med det omgivande klimatet. Ett material tar upp fukt från omgivningen tills det är i jämvikt, eller tills materialets porer fyllts med fukt (Wängdahl, 2013). Detta betyder att fuktinnehållet i hampakalken i en yttervägg kan variera mycket beroende på utomhus- och inomhusklimatet och därmed även årstiden. Den hampakalk som användes vid experimenten i denna rapport hade legat inomhus under en längre tid innan testen utfördes. Provkropparna antas därför ha nått en jämvikt med inomhusluften och lär därmed ha ett högre fuktinnehåll än en yttervägg. Detta kan ha påverkat resultaten med en ökad massförlust eftersom mer vatten kan förångas, det kan även tänkas att materialet värms upp något långsammare tack vare detta.

Kalken i hampakalk innehåller även kemiskt bundet vatten (Moropoulou, Bisbikou, & Bakolas, 1999). Hur mycket vatten som finns bundet kemiskt i hampakalk finns inte information om. Det kemiskt bundna vattnet tar upp energi och fasomvandlas, och bidrar således precis som det fria vattnet i materialet, till långsammare värmetransport.

Hampakalken är det material som tagit längst tid att värma upp. Det har konsekvent hållit lägre temperatur än övriga material i försöken. Däremot verkar temperaturökningen ske nästan homogent genom materialet. Skillnaden mellan 2 och 4 cm djup vid 900 s i försöket med 10 kW/m<sup>2</sup> i Figur 12 och 13, var enbart ca 13 °C för hampakalk, medan linullen skiljde 50 °C och stenullen 65 °C. Vid slutet på experimenttiden var skillnaderna 7 °C för hampakalken, 34 °C för linullen och 82 °C för stenullen.

### 4.3 Massförlust

I Figur 16 - Figur 19 i resultatkapitlet går det att se de olika materialens massförlust och därmed gasproduktion vid de olika experimenten. Vid experimentet med den lägre strålningen, 10 kW/m<sup>2</sup>, går det att se att det material som producerat störst mängder gas är träfiberisoleringen. Detta gäller både för den totala massan och procentuellt då materialet nästan tappade hela sin startmassa. Förklaringen till detta kan vara samma som för den förhöjda temperaturen, nämligen att materialet förbränns utan flammor och det blir en så kallad glödbrand. Denna sprider sig in i materialet från den bestrålade ytan och förbränner det med en jämn hastighet som avtar mot slutet då mängden oförbränt material minskar. Detta sker i båda experimenten med träfiberisoleringen men går snabbare för experimentet med 20 kW/m<sup>2</sup>. Här får massförlusten även en mer abrupt minskning vid ca 430 s för att sedan öka igen mellan 770-800 s. Det antas bero på att material som inte lyckats förbrännas tidigare plötsligt börjar förbrännas.

Massförlusten för linull är relativt jämn under hela experimentet vid strålningen 10 kW/m<sup>2</sup> och släpper inte ifrån sig så mycket rök, 5 g. Vid experimentet med 20 kW/m<sup>2</sup> börjar materialet däremot brinna, och i förbränningen bildas restprodukter i form av sotpartiklar och gaser. I Figur 18 går det att se en liten förändring i grafen för linull mellan 30-90 s då materialet brann. Detta skulle kunna bero på att pyrolysgaser har bildats under tiden materialet bestrålats för att efter 30 s nå en tillräckligt hög koncentration för att antändning ska ske, baserat på att grafen i början är mycket brant. Vid 90 s antas koncentrationen sedan vara för låg och en glödbrand antas fortsätta i materialet för att förbränna resterande material på samma sätt som för träfiberisoleringen.

I Figur 16 har EPS:en en märklig kurva som visar en negativ förlorad massa vid 10 kW/m<sup>2</sup>. Det verkar som att den ökar i massa med runt 2 g under de första sekunderna, håller den massan en stund för att vid 85 s åter tappa dessa 2 g. Någon tydlig förklaring för detta saknas, men det kan tänkas att det skett något fel i antingen hårdvaran eller mjukvaran inblandad i mätning och loggning av massan. Fel orsakat av de laborerande individerna anses inte kunna orsaka en så liten skillnad på vågen som 1,5 g, någorlunda stabilt under en så lång tid som 80 s, men kan inte helt uteslutas. Vid jämförelse med försöket på 20 kW/m<sup>2</sup>, Figur 18, så har EPS:en enligt kurvan för 10 kW/m<sup>2</sup> tappat nästan hälften så mycket av sin massa. Huruvida det är ett rimligt resultat, eller om den förlorade massan under de första 85 s i 10 kW/m<sup>2</sup>-försöket inte lyckats ingå i datan är svårt att säga utan att göra fler försök i konkalorimetern. Vid tiden för försöken var laboratoriet fördelat mellan olika projekt och tid fanns inte att göra om experimentet.

Utöver avvikelserna i början av kurvan för EPS:en vid 10 kW/m<sup>2</sup>, beter sig materialet på ungefär samma sätt vid de båda försöken med en något högre förlorad massa vid experimentet med den högre strålningen. Här försvinner lite mer än hälften av materialet med en snabbare hastighet de första 300 s för att sedan få en konstant massförlust resten av tiden. Dock går det inte att lita helt på resultaten för detta material vid 10 kW/m<sup>2</sup> eftersom vi inte riktigt vet vad som händer de 100 första sekunderna.

Stenullen tappar en ungefär lika stor mängd massa vid båda försöken, dock blir procenten av den högre i försöket med 10 kW/m<sup>2</sup>. Detta beror på att biten som använts i detta försök vägde något mer än i försöket med den högre strålningen. Det kan därför antas att massa bara förlorats precis vid materialets bestrålade yta eftersom ytan som exponerats är lika stor i båda försöken.

Hampakalken förlorar vid 20 kW/m<sup>2</sup> mer massa än stenull och EPS, men mindre massa än linull och träfiberisolering. Dock, som nämnts i diskussionen om temperaturmätningarna, verkar massan som tappas till största del vara vatten vilket tyder på att det inte bildas en stor mängd brandgaser som kan sprida branden vidare.

Eftersom massan som förloras från hampakalken till störst del antas vara vatten kan det tänkas att materialets hållfasthet påverkas. Materialet har dock ingen bärande funktion utöver att bära upp sin egenvikt och det deformeras inte heller så att trästommen exponeras. Eventuell minskning i hållfasthet antas inte försämra brandbeständigheten, så länge hampakalken klarar av att bära upp sig själv.

#### 4.4 Övrigt

De isoleringsmaterial som undersökts kan installeras i samma typ av trästomme, med undantag för hampakalkblocken och hampakalksprutning. Hampakalkblocken kräver tätare vertikala stolpar att trä över, medan sprutning får en träskiva på någon sida av väggen som hampakalken sprutats på (de Bruijn, 2012). För stampning av hampakalk och för de övriga materialen i rapporten tillkommer inget extra material i fasadväggarna och därmed ingen ökad brandbelastning, bortsett från själva isoleringsmaterialet. Visbys bulhus är troligtvis stampning eller sprutning de mest lämpliga metoderna för installation av hampakalk, eftersom den befintliga trästommen då kan behållas.

Det har i laboratorieförsöken eftersträvat att få samma geometri på provbitarna, 10x10x5 cm<sup>3</sup>. Det har i praktiken varit svårt att genomföra detta. Träfiberbitarna kunde beskäras enkelt med en isoleringskniv, men korvade sig lite vid placering i stålformen. Linullen hade sämre hållfasthet än träfibern, och fransades något vid beskärning med isoleringskniv. Cellplasten smulade jämförelsevis lite vid beskärning. Stenullen var enklast att skära i och höll ihop utan smulning. Hampakalken smulade väldigt mycket vid beskärning, vilket ledde till att kanterna blev något rundade. En effekt som kan tänkas ha uppstått vid kanter som inte fyllt ut formen ordentligt, är att luftfickan mellan materialet och stålformen inneburit mindre värmeförlust från provkroppen, än i de material som fyllde ut formen helt. Detta eftersom värme inte transporteras lika snabbt genom luft som det kan tänkas ledas ut i metallen från en provkropp. Aluminiumfoliet som beklätt kanterna på provkropparna minskar dessa olikheter något.

Hampakalken fick en något svärtad yta i hålrummen på ytan av provkroppen vid försöket med 20 kW/m<sup>2</sup>. I försöket med 10 kW/m<sup>2</sup> blev färgen enbart lite mörkare gul. I övrigt påverkades inte hampakalkprovet synbart. Temperaturmässigt mäter sig hampakalken bra med de andra isoleringsmaterialen i testet. Hampakalken har konsekvent visat sig öka i temperatur långsammast, se Figur 12 – 15, förmodligen tack vare vatteninnehållet som diskuterats på sida 29. Med tanke på resultaten och den täta bebyggelsen i Visby verkar hampakalk kunna vara ett bra alternativ som isoleringsmaterial. Den låga massförlusten kan tyda på att hampakalk inte bidrar avsevärt till ett brandförlopp, speciellt då det tyder på att vattenavdunstning står för mycket av materialets förlorade massa.

Vid en kostnadsjämförelse bör det vägas in att puts kan appliceras direkt på hampakalken, både på fasad och på insida. I Schweiz lämnas ofta hampakalken oklädd på fasaden (Benhaim & Marosszeky, 2011). Mariann Grundvall nämner att användning av hampakalk som isoleringsmaterial förminskar

komplexiteten av väggsystemet. Mängden olika material och återförsäljare inblandade i projektet blir mindre, och därmed kan kostnader förknippat med detta minska (Grundvall, 2016).

Hur arbetskostnaden för hampakalk jämför sig är svårt att säga, det har inte gått att få tag i information om detta. Jämför man enbart arbetskostnaderna för isoleringsmaterialet blir det nog högre för hampakalk, då installationen här tar längre tid, men en mer rättvisande jämförelse vore att titta på hela väggsystemet, med stomme och olika skikt (luftspalt, vindskydd, fasadmateriäl). Det kan tänkas att den totala kostnaden för att isolera med hampakalk inte skiljer sig avsevärt från mer konventionella isoleringsmaterial, vid en mer heltäckande jämförelse.

Den hampakalk som använts i denna rapport skiljer sig något från de blandningar som undersöks för Visby. Blandningen som värmestrålningsnivå består av 7 delar hampaved, 4 delar torrsläckt kalk och 4,25 delar vatten, vilket i runda slängar ger ett förhållande av 7:8 hampa/kalk. För Visby undersöks blandningar med 1:2 och 1:3. I och med den högre andelen kalk i dessa blandningar kan brandbeständigheten tänkas vara bättre, eftersom det är i kalken som det kemiskt bundna vattnet finns. Detta bör dock styrkas med tester.

#### 4.5 Felkällor

Materialen har endast testats en gång per värmestrålningsnivå, 10 och 20 kW/m<sup>2</sup>. Detta innebär att resultaten från testerna inte med säkerhet reflekterar materialets egenskaper. Hampakalken är en blandning av hampaskäv, vatten och torrsläckt kalk. Skåven varierar i storlek vilket i sig kan innebära att egenskaper varierar i olika punkter i materialet. Dessutom finns ingen garanti att skåven fördelats jämnt och i samma riktning i kalken, vilket också skulle kunna påverka resultaten. Samma sak gäller de andra materialen, där fördelning och storleken på håligheterna kan variera. Störst inverkan tros detta kunna ha på temperaturmätningarna, som består av tre termoelement som placerats i var sin punkt i provkroppen. Fler försök på varje material och strålningsnivå hade krävt betydligt mer tid i laboratoriet, samt tillgång till mer material, än vad som var tillgängligt inom tidsramen för arbetet.

Termoelementen placerades i de flesta fallen hål som förborrats med en handborrmaskin. Borren markerades med maskeringstejp för att rätt djup skulle uppnås. Det finns dock ingen garanti för att hålen gått till exakt rätt djup, utan troligtvis kan de variera. Detta fel ökas dessutom av att då termoelementen trädde in i hålen, kan de ha trängt sig än djupare in i materialet, alternativt inte nått hela vägen in. För att få in termoelementen i linullisolerings och träfiberisolerings fick termoelementen tryckas in utan förborring, vilket ytterligare minskar säkerheten på djup, samt omfördelar materialet i direkt anslutning vilket kan påverka resultatet. Det kan även tänkas att linullen och träfibern packades något vid placering i stålformen, trots beskärning, och således ha fått en annorlunda täthet än tänkt.

Termoelementen placerades på olika djup, men även i olika hål i provkroppen. Sett ifrån ytan som exponeras för strålning borrades hålen 1 cm i sidled ifrån mittpunkten, åt vänster, höger och upp. Således anses avståndet vara tillräckligt långt ifrån kanterna för att inte påverkas i någon anmärkningsvärd utsträckning av randeffekter, utöver de som skapas av provkroppens egen deformation.

Avståndet till konen bestämdes med hjälp av en mätpinne med 25 mm tjocklek. Innan värmen till konen sattes igång ställdes avståndet till provkroppen in. Detta genomfördes genom att vågen, som höll stålformen, placerades på rätt avstånd från konen. Eftersom vågen var rörlig finns det en risk att avståndet ändrats då stålformen flyttas bort från vågen, eller placerats dit när testet skulle startas. Linullen och träfibern buktade ut ur stålformen vilket innebär att ytan på buktningen kan ha kommit närmre värmekällan än avsett (25 mm). Det skulle resultera i att den infallande strålningen i ytan blivit

större än för de material som inte buktade. Avståndet kontrollerades vid försöken och ingen avvikelse uppmärksammades, men avståndet som kontrollerades var mellan framkanten på konen och kanten på stålformen.

Provkropparna skars ut ur större skivor av materialen i laboratoriet. På grund av att detta gjordes för hand, varierar de exakta dimensionerna på kropparna och därmed även massan. Exempelvis vägde cellplastbiten vid  $10 \text{ kW/m}^2$  nästan  $1/7$  mindre än den som användes vid den högre strålningen. Att mängden material varierar kan innebära att resultatet påverkas något.



## 5 Slutsatser

- Värmetransportmässigt mäter sig hampakalken bra med de andra isoleringsmaterialen i testet. Hampakalken har visat sig ha långsammast temperaturökning i samtliga försök.
- Med tanke på resultaten och tätheten i bebyggelsen i Visby, verkar hampakalk vara ett bra alternativ som isoleringsmaterial där.
- Den låga massförlusten tyder på att hampakalk inte bidrar nämnvärt till ett brandförlopp vid de testade strålningsnivåerna.

### 5.1 Förslag till fortsatt forskning

Nedan ges förslag på forskning som kan göras för att utöka kunskapen om hampakalks beteende vid brand.

- För att få ordentlig förståelse för hampakalks brandegenskaper krävs försök på fullskalig nivå, med en hel väggkonstruktion uppbyggd med träregelstomme och putsfasad.
- Det skulle även vara bra att göra flera försök liknande de experiment som utförts i detta arbete, med olika bitar från samma vägg. Detta för att se hur hampakalkens värmeledningsförmåga varierar, med tanke på de olika proportionerna som kan finnas lokalt i materialet.
- Hampakalk kan blandas med olika proportioner av hampa, kalk och vatten, men även med olika tillsatser. Det vore därmed bra att göra experiment på variationer av dessa blandningar, för att åskådliggöra avvikande brandbeteenden mellan blandningar.
- Det skulle vara intressant att veta hur hampakalk beter sig då det skadats på något sätt, om det till exempel uppstått en spricka eller en bit av ytan fallit bort och gjort den underliggande ytan ojämn.
- Med tanke på att hampakalk kan täckas med en fasadputs, bör det undersökas om putsen klarar av de inre spänningar som kan uppstå på grund av värmebetingade rörelser (expanding). Detta undersöks ofta för användning under normala förhållanden, men bör även undersökas för att täcka temperaturer som kan uppstå vid brand.
- Försök med högre strålningsnivåer bör göras för att få en större säkerhetsmarginal, i brandscenarier liknande de som täckts av denna rapport. Det skulle även täcka in fler brandscenarier än bara brandspridning mellan byggnader på var sin sida en gata.
- I denna rapport behandlas byggnader som är aktuella för hampakalk, men enbart byggnader med fasader av puts. Det kan vara intressant att även titta på hur hampakalk beter sig då det ligger under en brännbar fasad.





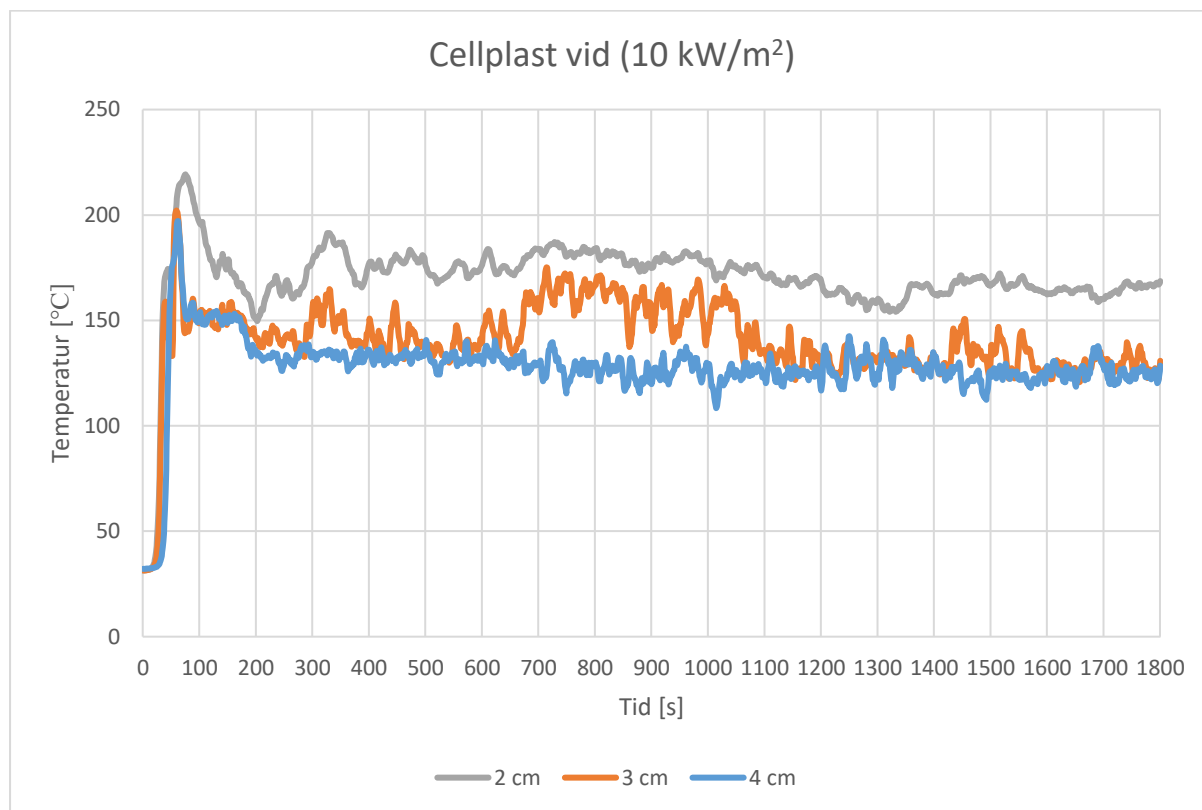
## 6 Referenser

- Albinson, B. (2005). *Bygglagar*. Hämtat från Kortfattad sammanställning om brandskydd i historisk bygglagstiftning inkl. några Värmländska lokala föreskrifter: <http://www.brandhistoriska.org/bygglagar.html> den 21 November 2017
- Albinson, B. (Februari 2009). Brandskyddet sedan medeltiden. (S. Dahlin, Red.) *Bygg & Teknik*.
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). *Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes*. Lyon: Elsevier.
- Babrauskas, V. (2016). The Cone Calorimeter. i M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 952-977). Greenbelt: Springer .
- Beijer Byggmaterial. (den 25 02 2018). *Beijer Bygg Store*. Hämtat från BeijerBygg.se: <https://www.beijerbygg.se/store/privat/byggmaterial/isolering/cellplast-eps/cellplast-eps-100-kpa-2400mm?artikel=521059>
- Beijer Byggmaterial. (den 04 03 2018). *Beijerbygg store*. Hämtat från Beijerbygg.se: <https://www.beijerbygg.se/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10551&langId=46&productId=150461&storeId=10201&krypto=VnUk0mxl3LxdzjQu3H5%2FJ09xG%2FdXTzVMJI6b6wZDwV1Wi2qarUVcgY3rqo7aKwN4UVsDL%2BYE3Ks%3D&ddkey=http:privat/cellplast-therm-plus->
- Benders. (2017). *benders.se*. Hämtat från <http://www.benders.se/benders/artikelarkiv/2015/tillverkningsprocess-av-eps-cellplast/> den 27 11 2017
- Benhaim, P., & Marosszeky, K. (2011). *How to build a HEMP HOUSE*. E-book.
- BEWI. (2017). *bewi.com*. Hämtat från <http://bewi.com/sv/om-oss/vad-aer-cellplast/> den 15 11 2017
- Björnfot, J. (2008). *Skyff mot brandspridning mellan småhus*. Karlskrona: Boverket.
- de Bruijn, P. (2012). *Material Properties and Full-Scale Rain Exposure Of Lime-Hemp Concrete Walls*. Alnarp: Swedish University Of Agricultural Sciences.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics* (Third Edition uppl.). West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Dunn, V. (Juli 2017). Fire spread basics for rookies. *Firehouse*, ss. 22-25.
- Glenting, M. (2002). *Brand i äldre trähusbebyggelse*. Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden.
- Gregor, L. (2014). *Performance of hempcrete walls subjected to a standard time-temperature fire curve*. Melbourne: Centre for Environmental Safety and Risk Engineering, College of Engineering and Science, Victoria University.
- Grey, L. (2013). *Träfiberisolering - en livscykelanalys*. Västra Götalandsregionen: Slöjd & Byggnadsvård.
- Grundvall, M. (2016). *Hemp Built*. Göteborg: Department of Architecture, Chalmers University of Technology.

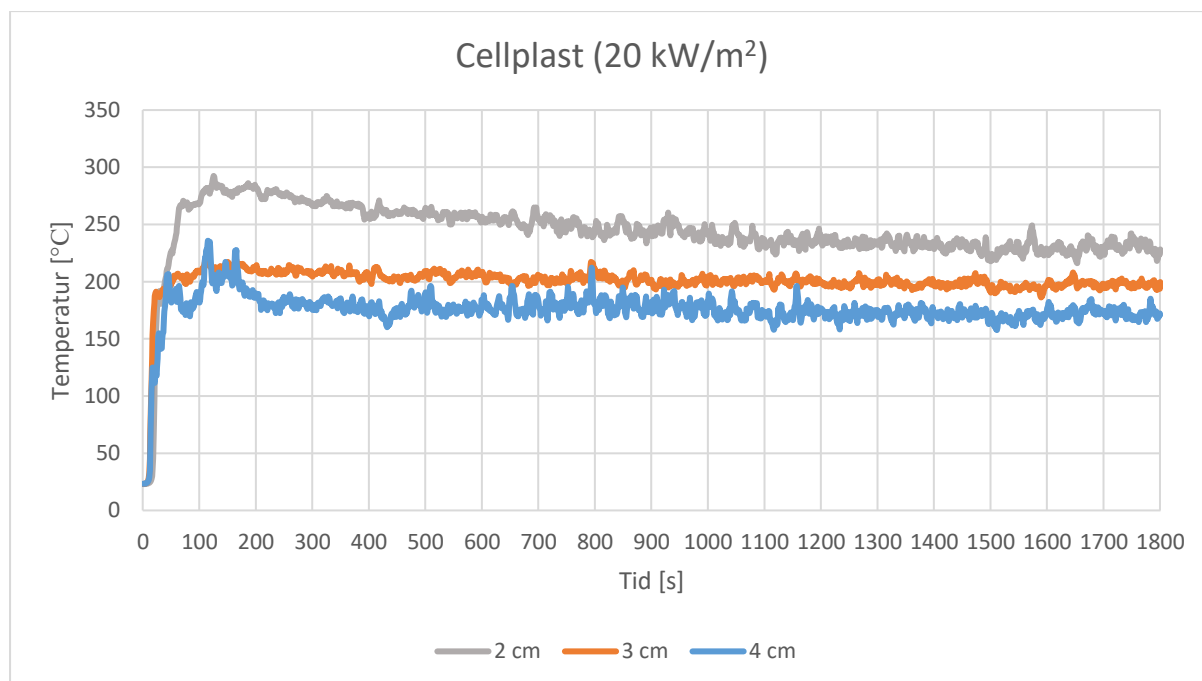
- h.n byggnadsvård. (2017). *hnbyggnadsvård*. Hämtat från <http://www.hnbyggnadsvard.se/kunskap/> den 14 11 2017
- Hallberg, M., Grönberg, L., Renström, J., Sellin, E., Dahlström, M., & Andersson, B. (2010). *Byggnadsordning för Visby innerstad*. Visby: Samhällsbyggnadsförvaltningen region Gotland.
- Hälsinglands Linförening. (2017). *Linlandet.com*. Hämtat från <http://www.linlandet.com/linets-vag/> den 23 11 2017
- Isoleko. (2012). *Isoleko.se*. Hämtat från <http://www.isoleko.se/historia/> den 16 11 2017
- Isolina. (2017). *Isolina.com*. Hämtat från <http://www.isolina.com/se/isolering-FAQ.cfm> den 23 11 2017
- Isolina. (den 04 03 2018). *Isolina isolering*. Hämtat från Isolina.com: <http://www.isolina.com/se/isolering.cfm>
- Janssens, M. (2016). Calorimetry. i M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 905-946). Greenbelt: Springer.
- Magwood, C. (2016). *Essential Hempcrete Construction: The Complete Step-by-Step guid* (ISBN: 978-1-55092-613-2 uppl.). Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.
- McLaggan, M. S. (2016). *Novel fire testing frameworks for Phase Change Materials and hemp-lime insulation*. Edinburgh: The University of Edinburgh.
- Moropoulou, A., Bisbikou, K., & Bakolas, A. (1999). *Investigation of the technology of historic mortars*. Athens: Department of Chemical Engineering, Materials Science and Engineering Sector, National Technical University of Athens.
- MSB. (2016). *Olycksutredning Brand i Gamla stan, Eksjö 2015-08-16*. Jönköping: MSB.
- Nord, J. T. (2013). *Cellulosa - en alternativ isolering med hänsyn till brand och fukt?* Karlstad: Avdelningen för enrig-, miljö- och byggteknik, Karlstads Universitet.
- Oates, J. (1998). *Lime and Limestone - Chemistry and Technology, Production and Uses* (ISBN: 3-527-29527-5 uppl.). Buxton: WILEY-VCH.
- Pavatex. (den 04 03 2018). *Pavaflex Light*. Hämtat från [miljobyggsystem.se](http://www.miljobyggsystem.se): [http://www.miljobyggsystem.se/assets/150904\\_Pavaflex\\_light\\_se.pdf](http://www.miljobyggsystem.se/assets/150904_Pavaflex_light_se.pdf)
- Rockwool. (den 04 03 2018). *Rockwool produkter*. Hämtat från [Rockwool.se](http://www.rockwool.se): <http://www.rockwool.se/produkter/markskiva/>
- Strandberg, P., Balksten, K., & Donarelli, A. (2017). Sustainable insulation of historical wooden and stone buildings with lime-hemp. i S. Amziane, M. Sonebi, & K. Charlet (Red.), *ICBBM 2017 Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-Based Building Materials* (ss. 651-655). Paris: RILEM Publications s.a.r.l.
- Swedisol. (2017). *Swedisol.se*. Hämtat från <http://swedisol.se/isolering/produktion-och-ravaror> den 15 11 2017
- Wängdahl, T. (2013). *Inomhusklimat i ett statligt byggnadsminne*. Linköping: Institutionen för teknik och naturvetenskap.

## 7 Bilaga A - Resultat från temperaturmätningar i Cellplast (EPS)

Här presenteras resultaten från konkalorimeterförsöket med cellplast, både för 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning.



Figur 20. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på cellplast (EPS)

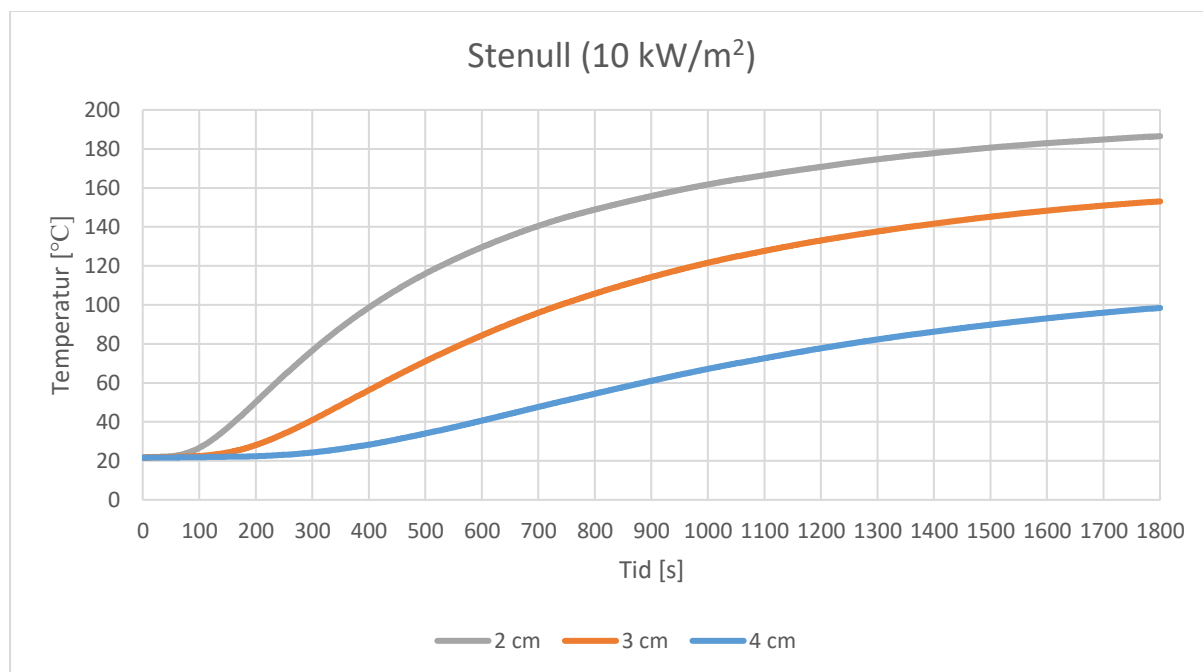


Figur 21. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på cellplast (EPS)

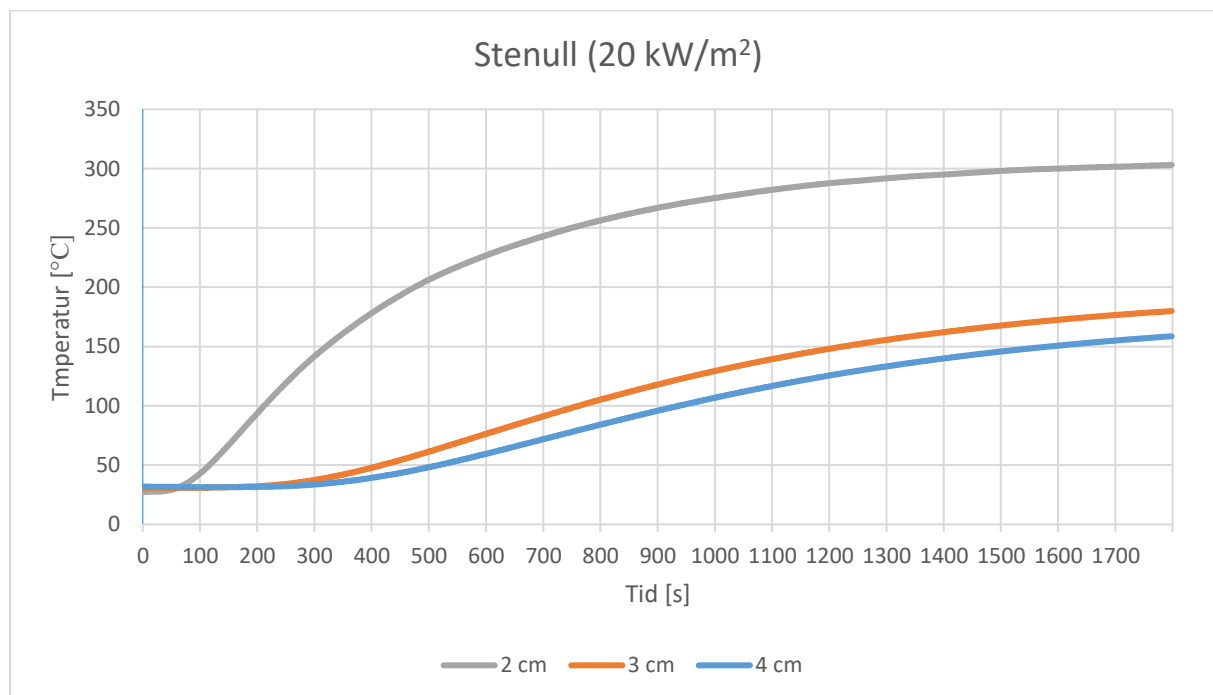


## 8 Bilaga B - Resultat från temperaturmätningar i Stenull

Här presenteras resultaten från konkalorimeterförsöket med mineralull (stenull), både för 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning.



Figur 22. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på stenullisolering

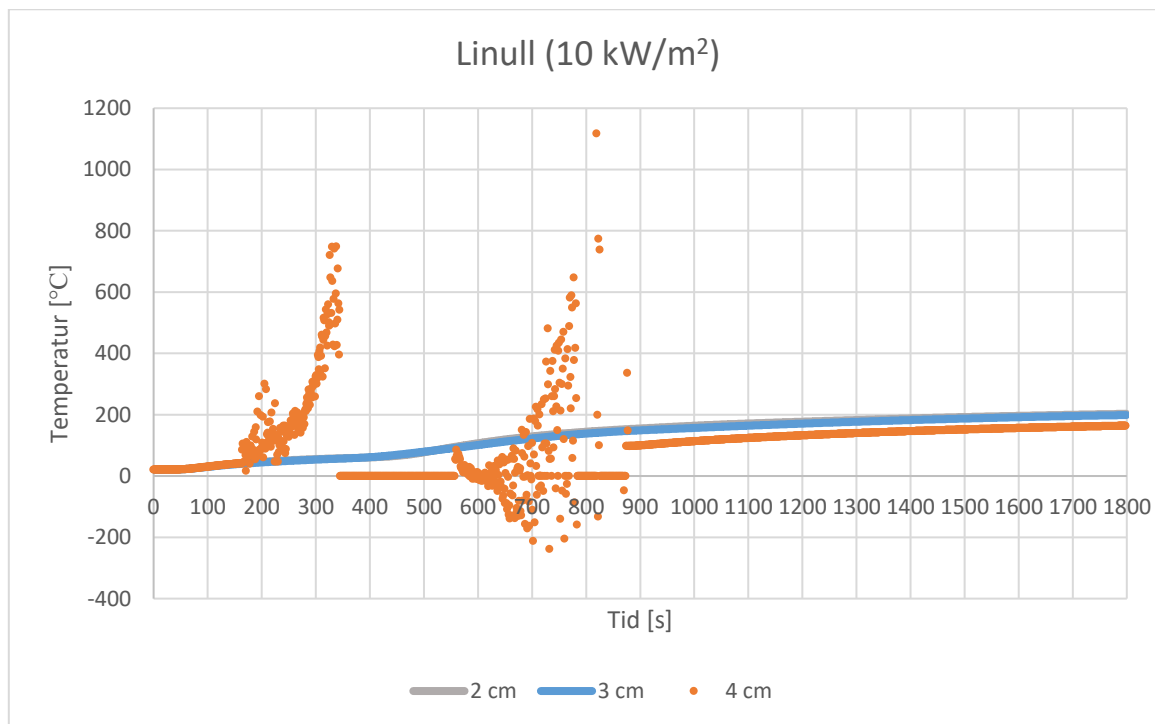


Figur 23. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på stenullisolering

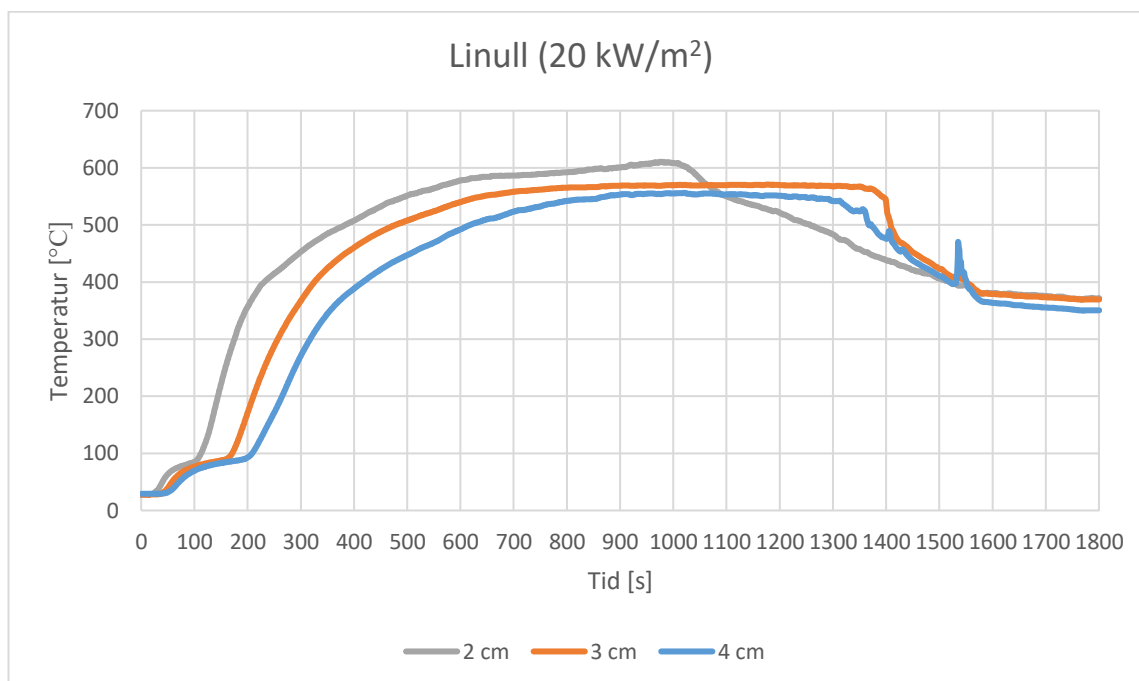


## 9 Bilaga C - Resultat från temperaturmätningar i Linullsisolering

Här presenteras resultaten från konkalorimeterförsöket med linullsisolering, både för 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning. För att lättare kunna jämföra de olika materialen har skalorna på graferna normerats. Detta har lett till att vissa punkter mellan 200-900 s i Figur 24 har försvunnit, dessa låg mellan -240 och 1120 °C.



Figur 24. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på linullsisolering



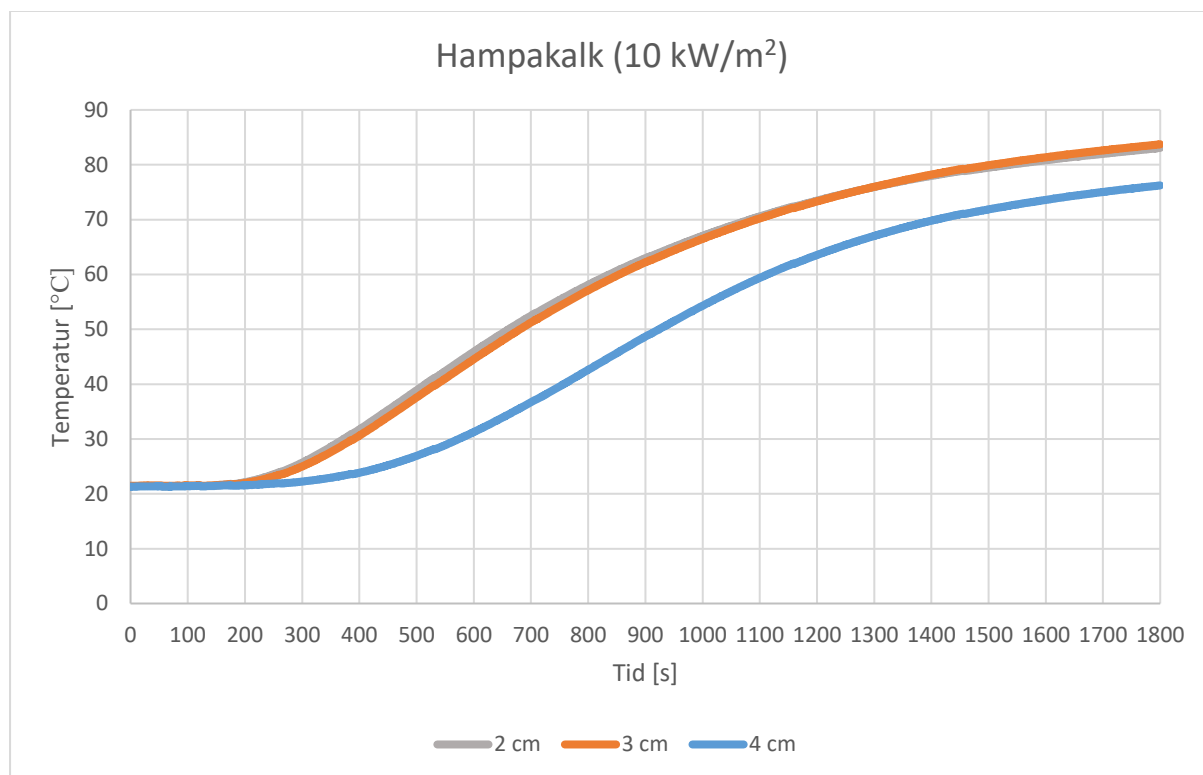
Figur 25. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på linullsisolering



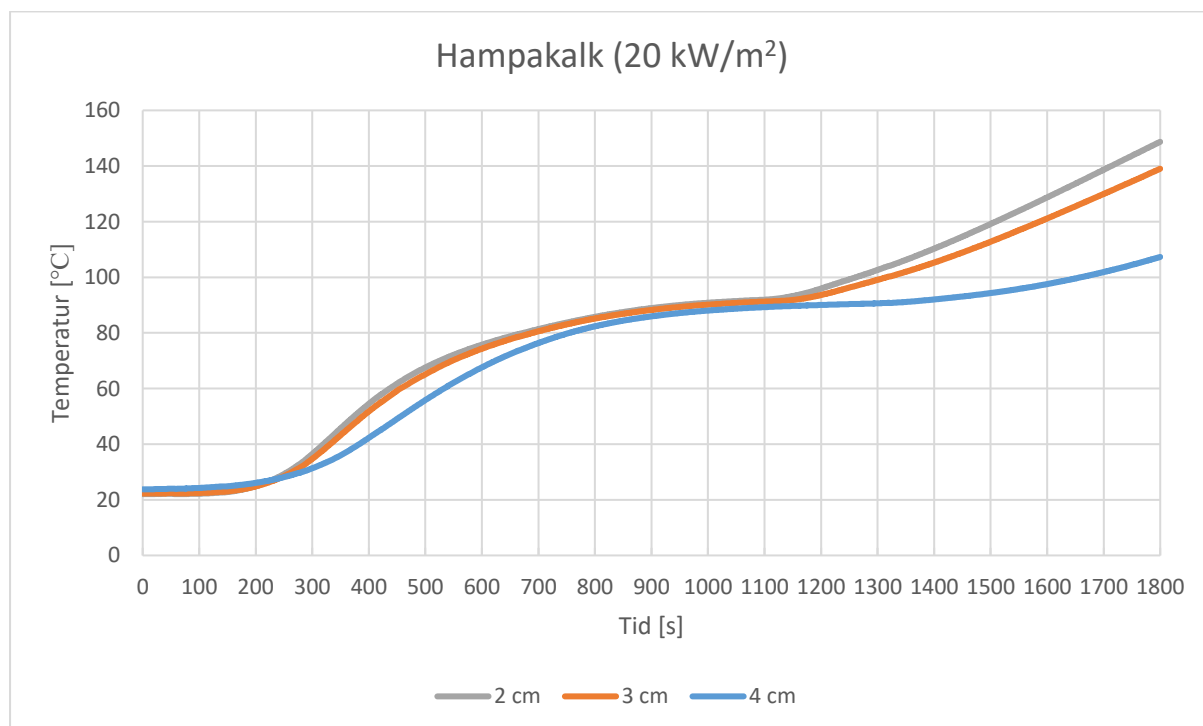


## 10 Bilaga D - Resultat från temperaturmätningar i Hampakalk

Här presenteras resultaten från konkalorimeterförsöket med hampakalk, både för 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning.



Figur 26. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på hampakalk

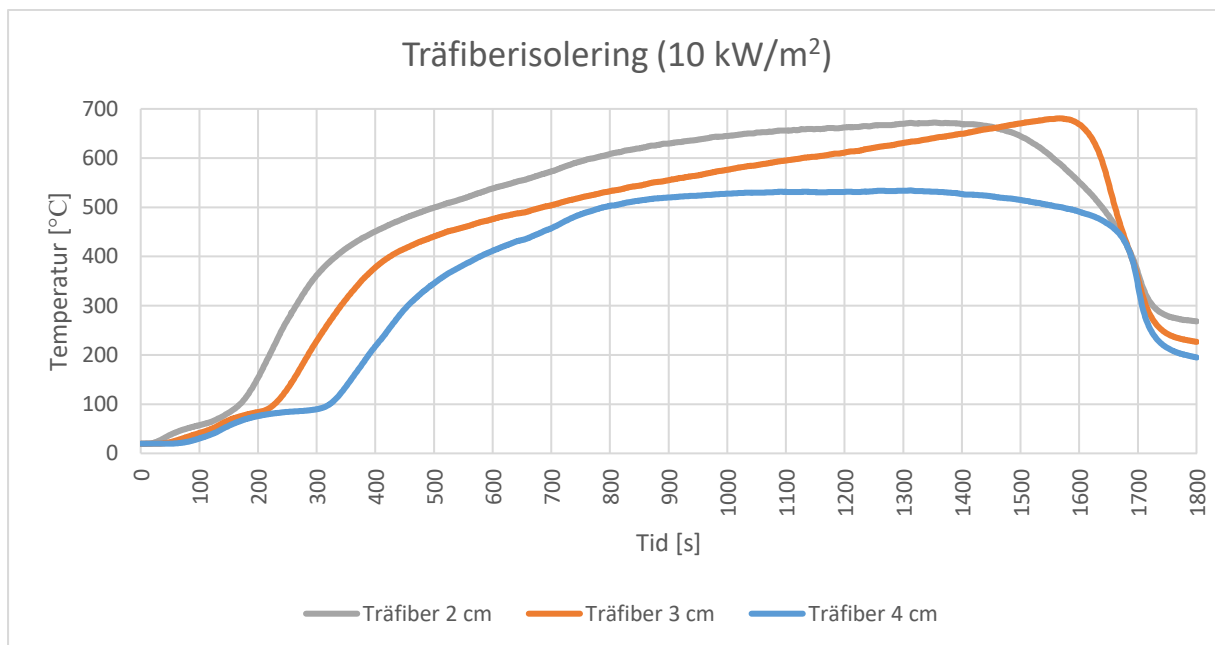


Figur 27. Temperaturmätning 4, 3 och 2 cm in i materialet vid 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på hampakalk

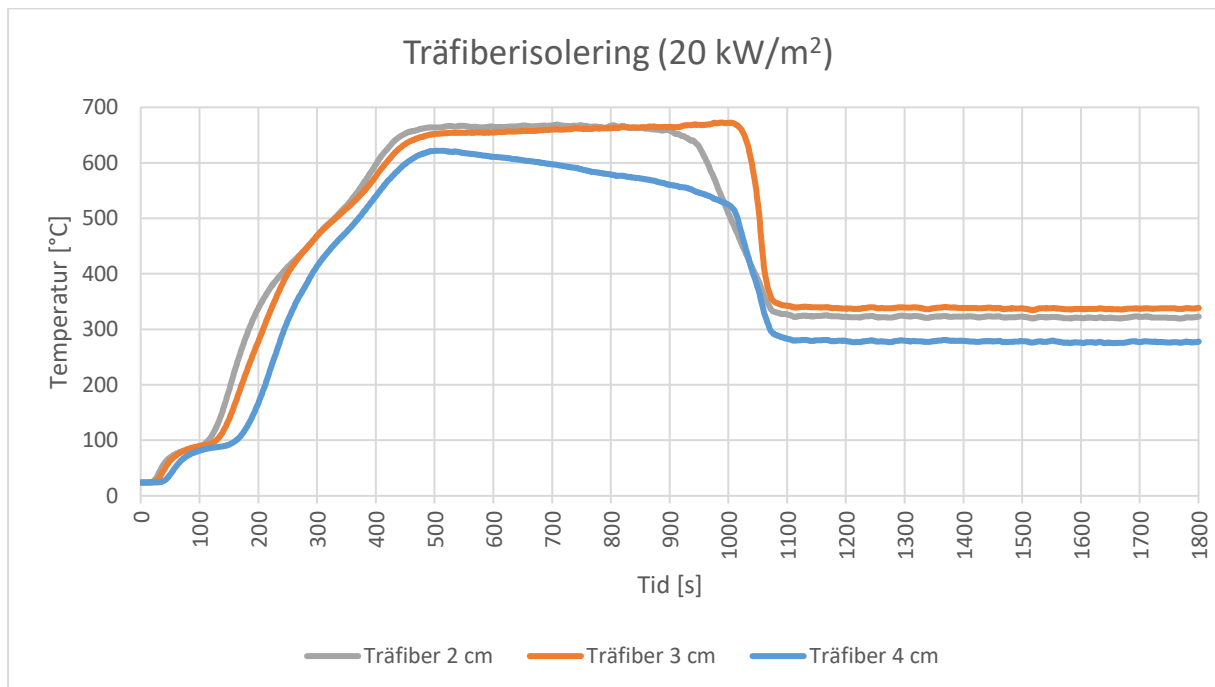


## 11 Bilaga E - Resultat från temperaturmätningar i Träfiberisolering

Här presenteras resultaten från konkalorimeterförsöket med träfiberisolering, både för 10 och 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning.



Figur 28. Temperaturmätning 2, 3 och 4 cm in i materialet vid 10 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på Träfiberisolering



Figur 29. Temperaturmätning 2, 3 och 4 cm in i materialet vid 20 kW/m<sup>2</sup> värmestrålning på Träfiberisolering



## 12 Bilaga F - Strålningsberäkning

För att beräkna en brand som motsvarar de värmestrålningsnivåer som valts för försöken i konkalorimetern används metoden platta till punkt och synfaktor. Eftersom denna rapport fokuserar på bränder som sprider sig mellan hus väljs scenariot brand i fönster. Detta eftersom de flesta bränder som sprider sig till intilliggande byggnader sprider sig från fönster, i synnerhet mellan byggnader som förutom fönsterna inte har någon brännbar fasad.

För att beräkna temperaturen på en brand används Ekvation 4:

$$\dot{q}'' = \Phi \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Ekvation 4}$$

Där:

$\Phi$  = synfaktor som tar i beaktning avståndet mellan ytorna och den strålande ytans storlek

$\varepsilon$  = en faktor för effektiviteten av den strålande ytan som strålare, (emissionstal.)

$\sigma$  = Stefan Boltzmanns konstant ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$T$  = temperaturen på den värmestrålande ytan

$\dot{q}''$  = infallande strålning ( $\text{W/m}^2$ )

Eftersom det är  $T$  som söks skrivs ekvationen om till:

$$T = \left( \frac{\dot{q}''}{\Phi \varepsilon \sigma} \right)^{1/4}$$

$\dot{q}''$  sätts till de två strålningsnivåerna 10 000 respektive 20 000  $\text{W/m}^2$ .  $\varepsilon$  sätts till 1 för att få den högsta möjliga emissiviteten.  $\Phi$  hämtas ur Table 2.8 på sida 66 i (Drysdale, 2011), där:

$$S = \frac{L_1}{L_2} \quad \text{Ekvation 5}$$

$$\alpha = \frac{L_1 * L_2}{D^2} \quad \text{Ekvation 6}$$

Och:

$L_1$  = basen på en rektangel i den strålande ytan enligt Figur 31

$L_2$  = höjden på en rektangel i den strålande ytan enligt Figur 31

$D$  = avståndet från den strålande ytan till punkten som bestrålas enligt Figur 31

Med  $S$  och  $\alpha$  kan synfaktorn  $\Phi$  sedan utläsas ur Table 2.8 i (Drysdale, 2011).

I brist på kunskap om standardstorlekar på fönster i Visby innerstad och svårigheter med att finna exakta mått på fönster i området, uppskattas en fönsterstorlek på fönster som vetter mot Strandgatan, på byggnaden med adress Strandgatan 14 i Visby. Fönstret uppskattas vara 0,8 m brett och 1,2 m högt, inklusive ramen som till synes är av trä och därmed bidrar till eventuell brand. Utöver fönstermåtten antas flammen sträcka sig 1 m upp från fönstrets överkant. Avstånd mellan flamma och motstående byggnad uppskattas vara så litet som 3 m på många platser i Visby Innerstad. Mått för strålningsberäkning blir därmed:

$$\begin{aligned} D &= 3 \text{ m} \\ L_1 &= 0,80/2 \approx 0,40 \text{ m} \\ L_2 &= (1,2 + 1)/2 = 1,1 \text{ m} \\ S &= \frac{0,4}{1,1} = 0,37 \end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{0,4 * 1,1}{3^2} = 0,049$$

$\Phi = 0,0145$  enligt Table 2.8 i (Drysdale, 2011).

$$T = \left( \frac{10000}{4 * 0,0145 * 5,67 * 10^{-8}} \right)^{1/4} = 1320 \text{ K (1047 °C) för } q'' = 10 \text{ 000 W/m}^2, \text{ och}$$

$$T = \left( \frac{20000}{4 * 0,0145 * 1 * 5,67 * 10^{-8}} \right)^{1/4} = 1570 \text{ K (1297 °C) för } q'' = 20 \text{ 000 W/m}^2.$$

Temperaturen på flammans för 10 kW/m<sup>2</sup>-fallet är inom maxgränsen som anges i (Drysdale, 2011), men 20 kW/m<sup>2</sup> är 200 °C för hög. Genom att korta avståndet förminskas temperaturen som krävs av flammans för att uppnå 20 kW/m<sup>2</sup> infallande strålning:

D = 2 m:

$$L_1 = 0,80/2 \approx 0,40 \text{ m}$$

$$L_2 = 2,2/2 = 1,1 \text{ m}$$

$$S = 0,37$$

$$\alpha = \frac{0,4 * 1,1}{2^2} = 0,11$$

$$T = \left( \frac{10000}{4 * 0,026 * 5,67 * 10^{-8}} \right)^{1/4} = 1140 \text{ K (867 °C) för } q'' = 10 \text{ 000 W/m}^2, \text{ och}$$

$$T = \left( \frac{20000}{4 * 0,026 * 1 * 5,67 * 10^{-8}} \right)^{1/4} = 1360 \text{ K (1087 °C) för } q'' = 20 \text{ 000 W/m}^2.$$

Strålningsnivån 10 kW/m<sup>2</sup> motsvarar således en brand i ett fönster där flammans är 2,2 m hög och 0,8 m bred, från ett avstånd på 3 m. Den högre strålningen motsvarar samma brand men på 2 m avstånd.