

AAHM01: Examensarbete i arkitektur, LTH 2018

# Att skapa rum med rymdteknik

*Creating space with space technology*

av Eric Bjerkborn

Examinator: Christer Malmström

Handledare: Marie-Claude Dubois



# Abstract

This thesis is about how to create architectural spaces in a not-too-distant future where new regulations demand better heat insulation in buildings and the implications that will bring to the building industry.

Rather than worrying about how to deal with thicker walls and smaller windows, this thesis is trying to find new ways of designing buildings that enable us to continue having the possibility of having thin outer walls and large windows and yet conform to passive standards of energy usage.

The result is a new invention by the author - an exposed inner load bearing structure that makes it possible to eliminate thermal bridges from the insulating structure in the outer wall - in conjunction with a new type of prefabricated wall element, made with aerogel foam concrete insulation, invented by the EU-funded SESBE-project.

This enables the small house, designed as an example of the building system, to conform to passive housing standards yet still have large windows and thin (300 mm) walls.



*"Technology alone is not enough – it's technology  
married with liberal arts, married with the humanities, that  
yields us the results that make our heart sing"*

Steve Jobs



FÖRORD	9	2.5.4 U-värde i förhållande till konstruktionstjocklek	20	4.4.2 Ventilation	34
1 INTRODUKTION	11	2.5.5 Vanliga typer av isolering	22	4.4.3 Ej öppningsbara fönster	36
2 BAKGRUND	13	2.5.6 Ovanliga typer av isolering	22	4.4.4 Öppningsbara fönster och dörrar	36
2.1 Varför ställer EU krav på byggnaders energianvändning	13	2.6 Hur byggs passivhus?	23	4.4.5 Uppdelning av fasaden i delar	36
2.1.1 Framtiden för EUs krav	13	2.6.1 Cten	23	4.4.6 Fasadkulör	36
2.1.2 Skillnader mellan olika klimat	14	2.6.2 Lättbetong	24	4.4.7 Taklösning	36
2.2 Boverkets Byggregler, BBR	14	2.6.3 Trästomme	24	4.4.8 Detaljer i det invändiga bärverket	36
2.2.1 Primärenergi	15	3 METOD	25	5 DISKUSSION	43
2.2.2 Vad är nästa steg?	16	4 RESULTAT	27	6 SLUTSATS	45
2.2.3 Hur höga kan kraven bli?	16	4.1 Gynnsamma byggmetoder	27	REFERENSER	47
2.3 Vad är ett passivhus?	17	4.1.1 Invändigt bärverk	27		
2.3.1 Forum för energieffektiva byggnader	17	4.1.2 Cellplast	28		
2.3.1.1 Värmeförlusttal	18	4.1.3 Quartzeneberikad skumbetong	28		
2.3.2 Intressegrupp Passivhus Sverige	18	4.1.4 Fönster och dörrar	32		
2.4 Varför ska vi bygga bättre byggnader än vi måste enligt regelverket?	18	4.2 Miljö och hållbarhet	33		
2.5 Hur fungerar isolering?	19	4.2.1 Energiförbrukning	33		
2.5.1 Lambdavärde	19	4.2.2 Miljöpåverkan	33		
2.5.2 Värmemotstånd	20	4.3 Ekonomisk analys	34		
2.5.3 U-värde	20	4.4 Exempelvillan	34		
		4.4.1 Kabeldragning	34		





Steve Jobs är en av mina förebilder. Han hade, som alla människor, bra och dåliga sidor. Den sidan jag beundrar var hans förmåga att kunna balansera teknik med det konstnärliga och humanistiska och därigenom göra tekniken lättillgänglig för världen.

I mitt liv har tekniken alltid varit viktig. Jag har under hela min uppväxt plockat itu saker för att förstå hur de fungerar och sedan satt ihop dem igen. För det mesta har de fungerat även efteråt – ibland bättre.

Därför trodde jag att jag skulle bli en ingenjör. Efter två år på en sådan utbildning insåg jag att jag inte skulle trivas med mitt liv om jag var tvungen att syssla med alltför teoretiska uppgifter och fick se mig om efter en annan väg att gå.

Vad som egentligen intresserar mig mest är form. Framförallt hos ting, men det viktiga är att formen på något vis har ett syfte. Därmed är jag ingen konstnär.

Två vägar såg ut att kunna erbjuda det som jag letade efter – industridesign eller arkitektur. Valet mellan dessa två avgjordes efter att ha tittat på arbetsmarknaden för de två yrkesgrupperna.

Under grundutbildningen lämnades inte mycket utrymme för den tekniska aspekten av min personlighet, men den estetiska sidan blev ordentligt utmanad. I varje projekt har jag arbetat med arkitektoniska problem, men jag har trots allt använt mig av tekniska lösningar och landvinningar för att ge mig själv möjlighet att lösa dem.

Plötsligt en dag var det som att det klickade till i huvudet på mig. Plötsligt kunde jag känna ”rumsligheten” som alla lärare pratat om under åren på skolan. Jag förstod.

Samtidigt förstod jag också att jag måste använda min glädje och entusiasm för de tekniska ämnena för att kunna förverkliga rummen jag vill skapa.

Ett års praktik gjorde kopplingen än starkare. Om vi arkitekter verkligen ska ha möjlighet att påverka vad som byggs måste vi förstå hela kedjan från den första tanken till färdig byggnad. Vi måste kunna argumentera för våra idéer - inte bara i form av estetik eller rumsliga funktioner utan även i form av tekniska lösningar.

I samband med praktiken förstod jag att vi står inför ett skifte inom byggnaders utformning. Det har redan börjat med större medvetenhet om inte bara vilka byggnadsmaterial vi använder, utan också om hur mycket material och resurser vi använder för att bygga dem och hur mycket energi de förbrukar när de väl är i brukandefasen.

Det här examensarbetet är mitt försök att bidra till hållbar utveckling inom arkitekt- och byggbranschen.

Jag vill tacka Marie-Claude Dubois för hennes goda handledning under projektets gång. Hennes kunnande inom hållbarhet och tekniska frågor har varit ovärderligt för att guida mig till ett givande resultat.

Jag vill också tacka Christer Malmström för de goda diskussionerna vi haft om hur ny teknik kan användas för att stärka arkitekturen.

Slutligen vill jag tacka mitt dagliga bollplank - min gode vän och kurskamrat Tim Näsling som jag haft oändliga diskussioner med under våra examensarbetens framväxt under vårterminen.



# 1 Introduktion

EU har bestämt sig för att gå mot nära-nollenergi-byggnader. Därför har man satt upp ett mål för hur mycket energi byggnader får förbruka och Sverige har implementerat det regelverket med start i BBR 25 (Boverkets byggregler). Dessa regler kommer att vara lägsta nivån för byggnader som planeras och byggs från år 2020. Redan nu har man aviserat att detta regelverk kommer att skärpas med ytterligare höjda krav på låg energiförbrukning.

När kraven på värmeisolering höjs växer också tjockleken på väggarna vi måste använda oss av. I vissa fall är det inte ett problem att ha tjocka väggar och små fönster, men det blir ett problem när det blir tvingande. Även fortsatt ska det vara möjligt att rita hus utifrån vilka rumsligheter och funktioner som eftersträvas.

När passivhus blir normen måste dessa fortfarande vara trevliga att bo och vistas i. Eftersom värmeisolering kan appliceras på så många olika delar i en byggnadskonstruktion fokuserar den här studien på den delen som faktiskt gör en skillnad i hur

rummen i byggnaden upplevs - väggkonstruktionen.

Det är genom öppningar i den vi tittar ut på landskapet eller passerar när vi kliver in eller ut ur byggnaden. Det är den som kommer att vara den största utmaningen inom arkitekturen de kommande åren.

I studien är inte uppgiften att faktiskt hitta på nya sätt att bygga utan att leta efter nya tekniska lösningar bland vetenskapliga avhandlingar eller artiklar. Det handlar om kompositionen av arkitektoniska delar snarare än tekniken i sig. Syftet är att skapa en grundförståelse för de byggnadstekniska egenskaper produkterna har och hur de fungerar i en arkitektonisk komposition.

För att tydliggöra effekterna av alternativa sätt att bygga ritas i studien en exempelvilla av snittstorlek för en familj med två vuxna och två barn. Där kommer skillnader jämfört med traditionella byggmetoder att demonstreras.



### 2.1 Varför ställer EU krav på byggnaders energianvändning

EUs gemensamma åtaganden enligt Kyotoprotokollet innebär att vi måste minska våra utsläpp av koldioxid. Detta har inneburit att medlemsländerna fått många direktiv att följa. För byggbranschen innebär det *The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*.

Första versionen av direktivet kom redan 2002 och krävde att medlemsländerna skärpte sina regelverk och introducerade energiklassificeringar av byggnader. Specifikt skulle man använda sig av *Energy Performance Certificates* enligt artikel 7, *Inspection of Boilers* enligt artikel 8 och *Inspection of Air Conditioning Systems* enligt artikel 9.

Det första direktivet ersattes av ett nytt med samma namn i mitten av 2010. Den nya upplagan tar ett vidare grepp om byggsektorn med fokus på nära-nollenergibyggnader i nybyggnation samt kostnadseffektiva nivåer av energieffektiviseringar i befintliga byggnader. Bland annat kräver man att byggnader som säljs eller hyrs ut ska energideklarerar,

att medlemsländerna ska införa scheman för inspektion av uppvärmnings- och ventilationssystem.

Man kräver också att alla nya byggnader ska vara nära-nollenergibyggnader efter 31 december 2020, men för publika byggnader gäller kraven redan efter 31 december 2018. Man begär dessutom att medlemsländerna ska sätta gränsvärden för nya byggnader såväl som för byggnader som renoveras.

2016 lämnades ett förslag till uppdatering av *EPBD* som en del av *Clean Energy for all Europeans*-paketet. I det förslaget flyttas fokus vidare till energieffektivisering på kostnadseffektivt vis i renoveringar. Här finns också det långsiktiga målet att EU ska ha koldioxidfria byggnader år 2050. Med detta menas alltså att det totala byggnadsbeståndet inte ska bidra till koldioxidutsläpp.

För att gå mot det målet uppmanar man till användning av ny teknik för att säkerställa att de olika driftssystemen i byggnader fungerar optimalt. Man introducerar också en EU-gemensam indikator för att visa hur ”smarta” byggnader är.

EU ger samtidigt medlemsländerna i uppdrag att ta fram incitament för att använda energieffektivisering av befintliga byggnader istället för utbyggnad av energiproduktion som lösning på vissa länders brist på energi.

Samtidigt pekar man också tydligt på vikten av hälsosam inomhusmiljö och poängterar vikten av att beakta även detta vid renoveringar.

#### 2.1.1 Framtiden för EUs krav

I rapporten *Towards nearly zero-energy buildings*, som sammanställts för EU-kommissionen, diskuteras framtiden för definitionerna inom EPBD. Författarna till rapporten påpekar att användandet av begreppet Primärenergi inte är tillräckligt för att faktiskt uppfylla EUs övergripande mål att minska växthusgaserna. Primärenergi går att få från olika källor med olika stora utsläpp av växthusgaser och andra föroreningar, som till exempel kärnavfall, försurning eller partikelutsläpp.

Det är inte osannolikt att dessa faktorer kommer att inkluderas i kommande upplagor av

EPBD tillsammans med exempelvis krav på mera uttömmande livscykelanalyser. Då kommer också lång livslängd för byggnader att spela en mycket större roll eftersom den totala miljöpåverkan blir helt olika för en byggnad som står i 100 år jämfört med två byggnader som står i 50 år vardera. Detta eftersom miljöpåverkan för att både bygga och riva hus är en stor del av deras totala utsläpp.

#### 2.1.2 Skillnader mellan olika klimat

Sverige tillhör den norra delen av EU och det innebär självklart att vi inte har samma förutsättningar som de sydligare delarna av Europa. Här har vi kallare vintrar och svalare somrar, mindre sollaster, men inte heller samma förutsättningar för att generera energi lokalt i byggnaden med hjälp av solceller eller solfångare.

Alltså innebär ett nära nollenergihus inte alls samma sak i hela EU, vilket komplicerar framtagandet av ett gemensamt koncept för hela området. I Sydeuropa krävs mer solavskärmning och effektiva sätt att kyla byggnader på sommaren. I norra Europa istället mer

värmeisolering för de kalla vintrarna och effektiva uppvärmningssystem.

### 2.2 Boverkets Byggregler, BBR

Boverket är den myndighet i Sverige som är ansvarig för frågor gällande bostadsbeståndet. Boverket sammanställer de regler som gäller övergripande för byggnation i Sverige och denna samling kallas för *BBR*. Den senaste versionen är den 25e i ordningen och kallas alltså *BBR 25*.

I denna har man implementerat Sveriges tolkning av det direktiv som kommer från EU angående byggnaders energieffektivitet, *EPBD*. Detta finns i kapitel 9 *Energihushållning*.

BBR 25 ställer inte krav som är på passivhusnivå. Faktum är att det är en ganska lång väg därifrån. BBR 25 ställer krav på en primärenergiförbrukning om högst  $90 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$  och år för småhus med uppvärmd area på  $50 \text{ m}^2$  eller mer. I detta ingår all energi som krävs för byggnadens drift, dvs uppvärmning, kylning, tappvarmvatten och

fastighetsenergi (pumpar, ventilationssystem etc).

*FEBY18s* klassning för passivhus, *Guld*, innebär en årsenergi (vilket är det närmaste jämförbara värdet, förutsatt att man i beräkningen för BBR använder energi med primärenergifaktorn 1,0) av maximalt  $26 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$  och år. Årsenergibegreppet innefattar för en eluppvärmd byggnad levererad elenergi för uppvärmning och tappvarmvatten samt fastighetsenergi (enligt BBR-kraven, bortsett från kravet om energiåtgång för kylning).

I FEBYs klassning måste byggnader som använder kombinerade system för uppvärmning och/eller tappvarmvatten, exempelvis värmepump, uppfylla andra regler. Om den totala elförbrukningen för uppvärmning och varmvatten i sådana hus överstiger  $3 \text{ kWh/m}^2$  måste systemet ha en årsvärmefaktor på minst 2,5. Faktorn beräknas genom att dividera avgiven nyttig värme-/varmvattenenergi med den tillförda levererade energin.

Det internationella passivhusorganet *Passivhaus Institut Darmstadt* tillåter en total energiförbrukning

av förnyelsebar energi om  $60 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$  och år i sin *Classic*-nivå, men denna siffra inkluderar förbrukning av hushållsel och deras modernare och hårdare klassningar innebär ännu lägre förbrukning samt krav på generering av energi i byggnaden från exempelvis solceller.

BBR 25 sätter också ett tak för hur stor eleffekt som får installeras i byggnaden för uppvärmning. Denna varierar beroende på var i landet byggnaden uppförs och hur stort huset är.

Det finns också krav på högsta tillåtna genomsnittliga värmegenomgångskoefficient ( $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), vilket är ett ganska högt värde. Det finns 3-glas fönsterkassetter, med krypton mellan skikten, som uppnår ett värde om  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Saint-Gobain Climatop 2 One). Observera dock att detta gäller själva kassetten och inte fönsterkarmen.

Slutligen ställs också krav på maximalt luftläckage genom klimatskärmen, men kravet anges (för större byggnader än  $50 \text{ m}^2 A_{\text{temp}}$ ) som "så tät att kraven på byggnadens primärenergital och installerad eleffekt

för uppvärmning uppfylls". Här kan alltså mera välisolerade väggar kompensera för ett tveksamt byggt hus. Dock anger man också andra regelverk för klimatskärmens lufttätethet som gäller ur fukt- och ventilationshänseende.

Allt ovanstående gäller vid nyproduktion. Vid förändring av befintliga byggnader finns andra regler avsedda för att underlätta positiva förändringar av energiprestandan, men i den här studien är dessa inte relevanta.

### 2.2.1 Primärenergi

Primärenergi förtjänar att förklaras närmare för att vi ska förstå tankarna bakom att använda just detta mått som gränsvärde.

Ordet primärenergi kommer från vad som kallas primära energikällor, vilket innebär energi i en form som inte förändrats eller raffinerats av människan. Exempel på sådana källor är exempelvis råolja, solkraft, vindkraft eller vattenkraft.

När primärenergi används för att skapa andra

former av energi går en del av den ursprungliga energin förlorad och den resulterande energin kallas sekundär energi. Hur mycket energi som går åt för att producera den sekundära energin definierar vilken Primärenergifaktor energislaget har i tabellen i BBR.

Eftersom elektrisk energi är ett energislag som, i snitt, kräver ganska stora primära energimängder att framställa så får det ett straff genom att dess faktor är 1,6 gånger energiförbrukningen där de övriga energikällorna har en faktor av 1,0.

Exempelvis går det åt kärnbränsle för att driva en atomreaktor som kokar vatten som bildar ånga som driver en turbin och som i sin tur driver en generator som alstrar elektrisk ström. Eftersom den elektriska energin är resultatet av en omvandling mellan olika typer av energi där det gått åt en större mängd ursprunglig energi än man får ut elektrisk energi blir värdet för den elektriska energin högre än för de övriga energislagen.

Tappvarmvatten beräknas enligt BEN 2 (Boverkets föreskrifter och allmänna råd om byggnadens

energianvändning vid normalt brukande och ett normalår). Här kan vi finna ett omvänt förhållande och ett som kanske känns mera logiskt. Fjärrvärme och direktverkande el har en så kallad årsverkningsgrad av 1,0. Olika former av värmepumpar har värden på 1,7; 2,0 resp 2,5 medan biobränslepanna, olja och gaspanna har årsverkningsgrad på 0,75, 0,85 respektive 0,9.

Värme från ett fjärrvärmeverk är förvisso framställd relativt energieffektivt, men värmen som levereras till ett givet hus kan inte användas för andra ändamål än just uppvärmning.

Om värmen till huset istället alstras av en värmepump, som drivs elektriskt, finns en utväxling som innebär att man får ut mer värme från elektriciteten än man hade fått från ren eluppvärmning. Därför kan man faktiskt få bättre egenskaper från en värmepump vid beräkning av energin för tappvarmvatten än om man använder fjärrvärme för att värma detsamma.

### 2.2.2 Vad är nästa steg?

Nästa steg i utvecklingen blir en skärpning av

regelverket som nu är på plats. Eftersom EU har bestämt sig för att vi ska ha koldioxidfria byggnader 2050 kommer kraven att innebära att vi kommer att gå mot passivhus. Hur snabb skärpningen av regelverket blir är beroende av både EU-lagstiftning och av de lokala svenska politikernas ambitioner. Vad som är säkert är dock att hus i framtiden kommer att behöva vara mera energieffektiva.

### 2.2.3 Hur höga kan kraven bli?

Isolering av byggnader kommer att komma till en punkt då det inte längre är lönt att göra dem mer energisnåla än de redan är. Själva tanken med passivhus är att de inte ska kräva mer energi än att de boende i samverkan med instrålning solenergi klarar av att värma huset utan tillförd energi under största delen av året.

Om man efter det fortsätter att isolera byggnaden kommer det att kunna hålla huset varmt några få dagar till på året utan att annan energi behöver tillföras, men det innebär också att huset kommer att bli än varmare

under sommarhalvåret och då kommer att behöva ventileras eller kanske till och med kylas, vilket också kräver energi.

Materialåtgången för att göra så välisolerade hus är också enorm. Energiförlusten genom klimatskalet per tjocklek är en avtagande exponentialfunktion. Alltså behövs en dubblering av tjockleken för varje halvering av värmeförlusten. I en traditionell träkonstruktion innebär steget från 40 cm vägg tjocklek till 50 cm därför bara en minskning om 12% av energiförbrukningen medan steget från 20 cm till 30 cm ger en minskning om 60 %. Samma absoluta ökning av tjockleken ger alltså helt olika förändringar av den isolerande förmågan. Se mer om U-värdets påverkan av konstruktionens tjocklek under kapitel 2.5.4.

När vi då finner en punkt där ökad isoleringsförmåga inte längre går att försvara ekonomiskt eller på grund av materialåtgång är det lämpligt att stanna.

Var den punkten hittas är beroende av både de yttre förutsättningarna, som ekonomi och klimat, och av vilken typ av konstruktion vi väljer.



## 2.3 Vad är ett passivhus?

Passivhus är definierat på många olika vis, men ordet myntades ursprungligen av byggnadsfysikern *Dr Wolfgang Feist* som grundade det tyska *Passivhaus institut Darmstadt* (PHI) 1996. Han samarbetade redan från början av 1990-talet med den svenske arkitekten *Hans Eek*. *Eek* hade sedan mitten av 1970-talet jobbat med energieffektiva och solvärmdda hus. Tillsammans utvecklade de två konceptet passivhus med tjocka, täta väggar och värmeåtervinning av ventilationsluften.

I Sverige finns två olika skolor. Den första är *Forum för Energieffektiva byggnader (FEBY)* som utvecklade passivhuskonceptet för att passa svenska förhållanden. Den andra är *Intressegrupp Passivhus Sverige*, som utgår från de internationella kraven på passivhus som sätts av *Passivhaus institut Darmstadt*.

### 2.3.1 Forum för energieffektiva byggnader

FEBY startades som ett uppdrag från energimyndigheten 2008 med syfte att ta fram de första svenska reglerna för passivhus, FEBY09 (2009). Efter EU-direktivet

EPBD 2010 startades samma år organisationen Sveriges Centrum för Nollenergihus och denna förening fortsatte utvecklingen av passivhuskriterierna vilket lett fram till både FEBY12 (2012) och FEBY18 (2018). År 2018 bytte organisationen också namn till FEBY för att bättre knyta an till kriteriernas namn.

I den senaste upplagan, FEBY18, har man frångått sina tidigare benämningar för att klassificeringarna inte ska förväxlas med Passivhaus institut Darmstadts kriterier. Istället för de tidigare benämningarna minienergihus och passivhus använder man tre nivåer i form av brons, silver och guld.

Bronz motsvarar ungefärligt lägsta tillåtna nivå enligt *BBR 25*, Silver innebär ungefär samma regler som den tidigare definitionen minienergihus och Guld innebär ungefär samma regler som deras tidigare definition för passivhus.

När det kommer till bronsnivån skiljer sig FEBYs krav dock något mot *BBR 25* eftersom de anser att Boverket inte tar hänsyn till att ”fjärrvärme och elenergi ger väsentligt olika climateffekter

beroende på när energiuttaget sker på året och dygnet och hur mycket primärenergi som berörs i försörjningssystemen”. FEBY menar att det innebär att sämre byggnader kan klara kraven genom att kompensera energiförbrukningen med åtgärder i tillförselsystemen, exempelvis solpaneler. Olika driftssystem har fördelen att de kan uppgraderas eller bytas ut under byggnadens livslängd, men stommen är mycket svårare att förbättra.

Kraven FEBY har på byggnader som ska klassas enligt deras system är:

- Värmeförlusttal (tre nivåer – brons, silver och guld)
- Redovisning av årsenergi (med maxkrav för elvärmdd byggnad)
- Ljudkrav
- Luftläckage genom klimatskärmen
- Termisk komfort/Solvärmelasttal (SVL)
- Fuktsäkerhetsplan
- Kontrollplan (för byggnader > 600 m<sup>2</sup>)
- Energieffektiva installationer (enligt poängskala)

### 2.3.1.1 Värmeförlusttal

Det grundläggande kravet i FEBYs klassning är värmeförlusttalet just eftersom det är teknik neutralt och det säger sig självt att det mest energieffektiva är att inte behöva energin alls.

Värmeförlusttalet ( $VFT_{DVUT}$ ) beräknas vid dimensionerande vinterutetemperatur. DVUT ska anges som 1, 2 eller 3 dagar beroende på vilken värmekapacitet byggdelarna innanför isoleringsskiktet har.  $VFT_{DVUT}$  redovisas som  $W/m^2A_{temp}$ . Byggnader som har en uppvärmd yta under 600 m<sup>2</sup> får man göra ett tillägg på  $(600 - A_{temp})/110 W/m^2A_{omsl}$ . Observera att tillägget ska beräknas utifrån den inre mantelarean för byggnaden. För att uppnå Guld-nivån för mitt exempelhus (132 m<sup>2</sup>A<sub>temp</sub>) placerat i Lund får detta tal inte överstiga  $14 W/m^2A_{temp} + 4,25 W/m^2A_{omsl}$ .

### 2.3.2 Intressegrupp Passivhus Sverige

IPS är ett kompetensnätverk för att främja byggandet av passiva byggnader i Sverige. De använder sig av de internationella klassificeringarna som sätts av det

ursprungliga *Passivhaus institut Darmstadt* (PHI).

De internationella reglerna använder sig av Primärenergibegreppet, men de har dessutom kravet att energin som används ska vara förnyelsebar - Renewable Primary Energy (PER). Gränsvärdet (för passivhus Classic - 60 kWh/m<sup>2</sup>A<sub>temp</sub>) inkluderar också hushållsel, vilket FEBYs klassning inte gör.

Det finns tre kategorier i klassificeringen - Classic, Plus och Premium. De två senare ställer, förutom krav på ännu lägre energiförbrukning, också krav på produktion av förnyelsebar energi inom byggnaden, exempelvis genom solceller eller solfångare. För Plus och Premium är det tillåtet att avvika från förbrukningskraven med maximalt  $\pm 15 kWh/m^2A_{temp}$  förutsatt att energiproduktionen inom byggnaden kompenserar för avvikelsen. De två senare kategorierna tillhör dock vad som brukar kallas Plusenergihus, dvs hus som över året genererar mer energi än de förbrukar.

Det finns också krav på högsta tillåtna värmebehov om 15 kWh/m<sup>2</sup>A<sub>temp</sub> per år, alternativt högst tillåten värmeeffekt om 10 W/m<sup>2</sup> vid upprätthållande av

kontinuerlig rumstemperatur. Vid uppvärmning från lägre temperatur tillåts högre effekt.

Samma krav ställs på kylning av byggnaden som på uppvärmning av byggnaden, enligt ovan.

PHI ställer också krav på maximalt luftläckage om 0,6 omsättningar per timme.

## 2.4 Varför ska vi bygga bättre byggnader än vi måste enligt regelverket?

Som läsaren säkert har förstått sträcker sig lagstiftningen ännu inte så långt så att alla byggnader måste vara passivhus. Dock finns det några anledningar till att faktiskt bygga bättre hus än regelverket kräver.

Livslängden för en byggnad är beroende av hur nyttig den är. Nyttan kan summeras på många vis, men energieffektivitet är definitivt en av måttstockarna och kommer att bli ännu viktigare i framtiden.

Om vi bygger hus som överstiger dagens krav så kommer dessa också i framtiden att vara energieffektiva och behovet av att riva dem för att ersätta dem med nya, energieffektiva, byggnader minskar.

De hus vi redan har kommer att bli problematiska, speciellt de som är så gamla att de inte är särskilt värmeisolerade.

Många av dessa konstruktioner tål inte att tilläggsisolerar på insidan eftersom det innebär att deras konstruktioner utsätts för lägre temperaturer och därmed frostsprängningar och liknande.

Då återstår att tilläggsisolera på utsidan, vilket gör att de flesta av deras mera svårdefinierade, subjektivt positiva egenskaper går förlorade. Ett exempel är när hus från tidigt 1900-tal klätts in i isolerande skivmaterial och förlorat sina karakteristiska och, för många människor, estetiskt fördelaktiga utseenden.

För att vi ska undvika liknande situationer med de husen vi bygger idag måste vi ta höjd för framtidens krav och behov.

Passivhus, dvs ett hus som under största delen av året inte kräver något tillskott av yttre energi för att hålla en fullgod inomhustemperatur, är svaret. Dessa hus kommer att kunna stå precis som de byggts under århundraden utan att anses vara särskilt föråldrade. Nya

uppvärmningssystem och ventilationsanläggningar kan installeras, men klimatskalet är svårt att uppdatera efter behov.

## 2.5 Hur fungerar isolering?

Isolering handlar om tre huvudsakliga egenskaper, konduktion, konvektion och strålning. Konduktion handlar om hur väl värme leds genom materialet. Konvektion är hur ett omgivande medium, som gas eller vätska, leder bort värme från materialet. Strålning handlar om hur värme avges från materialet genom att materialet avger värme i form av infraröd strålning, vilket inte kräver ett omgivande medium.

Dessa egenskaper varierar beroende på vilket material man tittar på, men generellt kan man säga att en fint porös struktur med små luftfickor i ett material med låg konduktivitet ger bra isolerande egenskaper.

För att vi, som arkitekter, ska förstå hur isolering fungerar måste vi ha förståelse för några grundläggande begrepp. Dessa är lambdavärde, värmemotstånd och U-värde.

### 2.5.1 Lambdavärde

Lambdavärde är beteckningen för värmeledningsförmåga, termisk konduktivitet, i ett material.

Det är en mycket användbar enhet för att granska isoleringsförmågan i byggkonstruktioner då den, till skillnad från värmemotstånd och U-värde, är oberoende av tjockleken på konstruktionen.

Lambda betecknas med den grekiska bokstaven  $\lambda$  (lambda) och har enheten  $W/(m \cdot K)$  (Watt per meter och grader Kelvin).

Det innebär att lambdavärdet anges som hur mycket effekt (W) som måste tillföras på den ena sidan av ett föremål av en viss längd, eller tjocklek när det kommer till väggar, i meter vid en given temperaturdifferens (i grader Kelvin), för att upprätthålla en given temperatur på den varma sidan.

Alltså går det att jämföra isoleringsförmågan på ett sätt där det blir tydligt vad olika material får för inverkan på konstruktionens tjocklek.

### 2.5.2 Värmemotstånd

Olika nivåer av energi (temperaturskillnad) på varsin sida av en vägg strävar efter att utjämnas mellan två sidor av ett motstånd (väggens isolerande förmåga).

Som en förenkling kan man tänka på det som två kärl med vatten som är förbundna med varandra med ett rör i botten. I ett sådant system vill vattnet utjämnas så att vattenytan i de båda kärlen är på samma höjd.

I startögonblicket är vattennivån högre i den ena än i den andra, vilket är motsvarande temperaturskillnaden på in- och utsida av en yttervägg. Beroende på hur smalt röret som förenar de två kärlen är (dvs hur högt motstånd det ger) tar det olika lång tid för vattnet att utjämnas mellan kärlen.

Det innebär att man, för att upprätthålla en högre nivå, måste fylla på kärlet med högt vatten långsammare än om röret varit större (lägre motstånd).

Samma sak är giltig för värmeöverföring genom en vägg. Ju större motstånd väggen ger desto längre tid tar processen att utjämna energinivåerna, vilket innebär att mindre energimängd måste läggas till på den

varma sidan för att bibehålla den högre temperaturen.

Värmemotstånd betecknas som  $R$  (för Resistans) och har enheten  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$  (kvadratmeter och grader Kelvin per Watt).

För att beräkna värmemotståndet utgår man från formeln  $R=d/\lambda$  där  $d$  är tjockleken på materialskiktet.

För att korrekt beräkna ett  $U$ -värde i en flerskiktskonstruktion måste värmemotstånden i respektive skikt läggas samman, inklusive värmemotstånden i luftlagren invändigt ( $R_{si}$ ) och utvändigt ( $R_{se}$ ) konstruktionen, och totalsiffran inverteras.

### 2.5.3 $U$ -värde

$U$ -värdet är beteckningen för hur mycket energi som vandrar genom en komplett konstruktion per kvadratmeter av konstruktionens inre mantelarea och per grad temperaturskillnad mellan de två sidorna av konstruktionen -  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Siffran är användbar för att beräkna hur mycket energi som vandrar genom en komplett konstruktion

som exempelvis en vägg, ett fönster eller ett tak.

För att få fram energiåtgången över året multiplicerar man  $U$ -värdet med mantelarean och antalet gradtimmar som gäller för platsen (dvs antalet timmar och grader som utomhustemperaturen är under rumstemperatur - olika standarder för temperatur gäller vid olika beräkningar). Svaret får man i  $\text{Wh}$  (Wattimmar).

För Lund, med 78996 uppmätta gradtimmar till  $17^\circ$  (Johansson, 2010), gäller följande exempel för ett fönster på  $2 \text{ m}^2$  med  $U$ -värdet  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ :  $0,7 \cdot 2 \cdot 78996 = 110\,594 \text{ Wh} \approx 111 \text{ kWh}$ .

### 2.5.4 $U$ -värde i förhållande till konstruktionstjocklek

För att förstå hur tjockleken påverkar  $U$ -värdet för en given konstruktion måste man förstå att det är en exponentialekvation.

I figur 1 syns hur tjockleken i cm för en konstruktion med ett givet lambdavärde på  $0,030 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , ett normalt värde för bra cellplastisolering, påverkar konstruktionens  $U$ -värde exponentiellt.



*Fig 1: U-värde för en konstruktion med lambdavärdet 0,030 W/(m·K) som en funktion av konstruktionens tjocklek i cm.*

För varje dubbling av tjockleken halveras U-värdet. Se exempelvis U-värdet 0,4, 0,2, 0,1 och 0,5 W/(m<sup>2</sup>·K) vid 7,5, 15, 30 respektive 60 cm tjocklek.

Alltså ger varje absolut ökning av tjockleken inte samma utslag som den förra. Att det är en exponentialfunktion innebär också att det inte går att sänka U-värdet till noll.

För byggnader ligger de ekonomiska och praktiska gränserna för ytterväggar kring 40-50 cm tjocka konstruktioner och då är det viktigare vilken typ av konstruktion som används och vilket sammanvägt lambdavärde konstruktionen har. Lägre lambdavärde ger bättre U-värde vid samma tjocklek.

#### 2.5.5 Vanliga typer av isolering

I byggbranschen används många olika typer av isolering, men vissa är betydligt mera vanliga än andra.

Mineralull (glasfiberull eller stenu) samt cellplast (frigolit) är bland de vanligaste. Vilken av dessa tre som används är beroende av var i konstruktionen materialet ska användas och vilka krav det finns på

trycktålighet och isoleringsförmåga.

I väggar används alla tre typerna. I träkonstruktioner är mineralull vanligt förekommande pga sina goda isolerande egenskaper och sin förmåga att fylla ut hålrum. I lättbetongkonstruktioner kan både mineralull och cellplast användas för att skapa sandwichelement, även om cellplast är lämpligare eftersom den, på ett enkelt vis, går att limma mot de två omgivande skivorna av lättbetong.

Lambdavärdena för mineralull varierar mellan 0,030 och 0,045 W/(m·K) med ett typiskt värde kring 0,037 W/(m·K). Samma värde för cellplast ligger mellan 0,030 och 0,040 W/(m·K) beroende av hur stora laster cellplasten klarar att bära.

I grundkonstruktion innebär formstabiliteten att extruderade cellplastprofiler med fördel kan användas som kantisolering av en gjuten betongplatta.

Den formstabila strukturen hos cellplasten innebär att den lämpar sig sämre i en regelkonstruktion då den kan riskera att lämna glipor mellan isolerblocket och reglarna.

I vissa konstruktioner använder man sig dock av en sprutad mix av polyuretanskum i regelkonstruktioner för att fylla ut hålrummen effektivt. Polyuretanskum som sprutas på detta vis kan isolera mycket effektivt och ha ett så lågt lambdavärde som 0,023 W/(m·K).

Lättbetong är ett material som också används ganska ofta i hus. Antingen i sandwichkonstruktion eller som genomgående material i ytterväggen. I fall där man inte behöver ha lastbärande material kan lättbetong ha så bra lambdavärde som 0,043 W/(m·K), men i en total konstruktion med bärande egenskaper (Ytong Energy+) får man U-värden på 0,15 W/(m<sup>2</sup>·K) för en 40 cm tjock konstruktion eller 0,11 W/(m<sup>2</sup>·K) för en 50 cm tjock konstruktion, vilket är näst intill identiskt med träkonstruktioner av motsvarande tjocklek.

#### 2.5.6 Ovanliga typer av isolering

Exempel på ovanliga former av isolering är idag cellulosafiber, textilfiber i olika former, naturfiber från kokos eller träspån. Alla dessa är dock organiska och i dessa kan det börja växa mögel om de inte hålls torra.

I framtidens, energieffektiva, konstruktioner riskerar dessa organiska material att drabbas av angrepp i större utsträckning än i dagens eller gårdagens konstruktioner. Det beror på att de nya tjocka, välisolerade konstruktionerna innebär risk att fukt som läcker ut i de yttre delarna av konstruktionen, exempelvis genom en punktering av ångspärren, kondenserar på vägen ut. Detta kan skapa ett fuktigt område i konstruktionen där mögel trivs.

I gamla konstruktioner som inte är så väl isolerade är sannolikheten att fukten kondenserar mindre eftersom värmen tränger längre ut i konstruktionen.

Därför är de oorganiska isoleringsmaterialen intressantare. Exempel på sådana är tidigare nämnda mineralull, cellplast och polyuretanskum.

Det finns även andra intressanta material som är mindre vanliga i Sverige, till exempel cellglas eller lättklinker som kan användas som isolering i både grund och murblock.

Ett av de mer intressanta oorganiska materialen är helt nytt och består av skumbetong och Quartzene,

en aerogel, i kombination. Detta material avhandlas i större omfattning i kapitel 4.1.3.

## 2.6 Hur byggs passivhus?

Det finns framförallt två konstruktionssätt som är gällande för passivhus i Sverige idag, trästomme eller lättbetong. Dock finns det andra alternativ på frammarsch, som till exempel cellplast.

### 2.6.1 Cten

Ett exempel på hur man kan bygga i cellplast är ett koncept utvecklat av Kreativahus Arkitekter som nu saluförs av Emrahus (Fig 2). Cten är byggblock av cellplast i vilka en armerad betongstomme gjuts in. Det innebär väldigt små köldbryggor i väggkonstruktionen och en helt oorganisk konstruktion som dessutom har inbyggd fuktspärr tack vare cellplasten.

Grundtanken tror jag på, men jag är tveksam till att använda plast i stommen av flera anledningar. Först och främst avger plaster gaser till inomhusmiljön under normal användning. Vad som är än värre är

resultatet vid en eventuell brand. Vi bevittnade 2017 hur ett höghus i England fick dödlig utgång för 79 människor då isoleringen av cellplast spred branden inuti väggelementen i fasaden vilket gjorde branden både snabb och svårkontrollerad (SvD, 24 juni 2017).

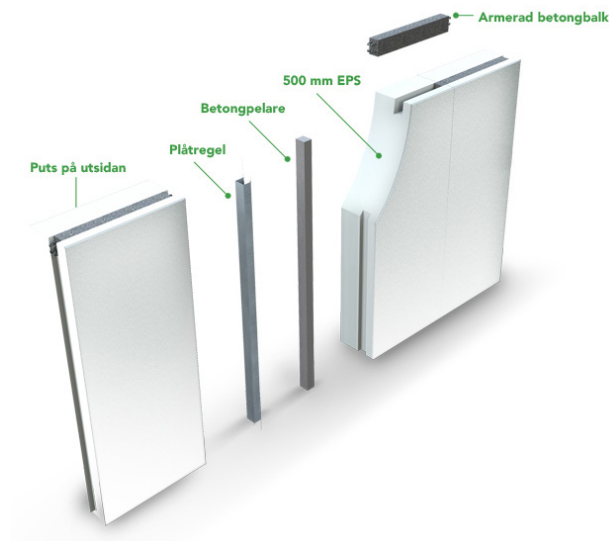


Fig 2: Cten byggsystem (Bild: Emrahus)

### 2.6.2 Lättbetong

Lättbetong är egentligen ett perfekt material att bygga passivhus av eftersom det är hållbart, oorganiskt och kan "andas" genom att fukt kan diffundera genom fasaden trots att den är lufttät. Lättbetong avger inga gaser under användning eller brand och bidrar inte till spridning av branden.

Nackdelen med lättbetong är att det är ganska resurskrävande att producera och att det inte har exceptionellt låga lambdavärden. Lättbetong kan dock, vid användning av sandwichkonstruktioner med olika typer av lättbetong (Fig 3), konkurrera med träkonstruktioner i samma tjocklek.



Fig 3: Ytong Energy+ (Bild: Xella)

### 2.6.3 Trästomme

Träregelstomme med oorganisk mineralull (fig 4) som isolering används i väldigt många passivhus i Sverige.

Detta kan bero på att Sverige har en rik tradition av att bygga småhus i trä och att vi därför har många producenter av typhus som har kunskap om hur man bygger med trästomme och kan göra det på ett ekonomiskt fördelaktigt sätt.

Det kan också finnas klimatmässiga skäl att köparna i stor utsträckning väljer ett hus med trästomme. Eftersom passivhusen ännu idag innebär en merkostnad i produktion jämfört med traditionella hus, som enbart förhållit sig till kraven enligt BBR, har det krävts ett aktivt val för att ändå bestämma sig för ett passivhus. Då är det inte osannolikt att träkonstruktionens lägre utsläpp av växthusgaser jämfört med en konstruktion i lättbetong är ett incitament för dessa medvetna köpare.

Trästomme i passivhus har dock ännu större risk än vanliga hus med träkonstruktion att drabbas av mögel och rötskador eftersom det är större risk att fukt som

diffunderar ut i väggen, genom exempelvis en skada i ångspärren, kondenserar och blir till grogrund för bakterier och svampar. Plastfolien som används som ångspärr är svår att montera så att den är helt tät, vilket också syns i jämförelser avseende täthet där lättbetongkonstruktioner utklassar träbyggnader.

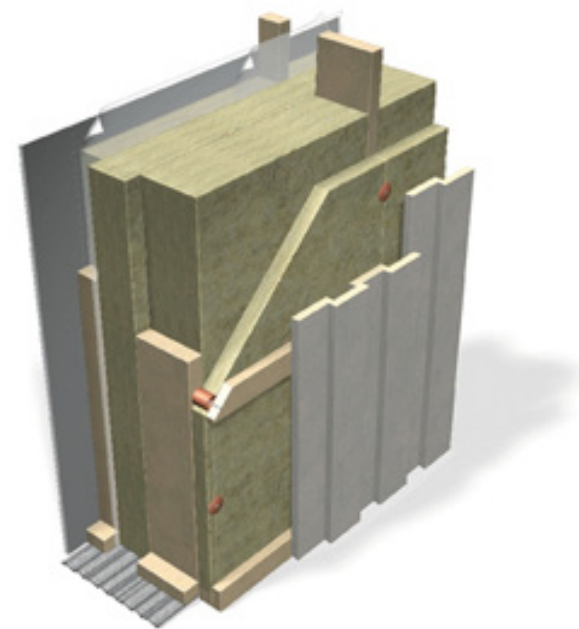


Fig 4: Träkonstruktion för passivhus (Bild: Paroc)



## 3 Metod

Den här studien har initialt krävt stora ansträngningar i sökning av information - läsning av rapporter och avhandlingar samt kravspecifikationer för passivhuscertifieringar.

Efter faktainsamlingen sammanställdes information om gynnsamma byggmetoder för att sedan användas i ritandet av en exempelvilla på 132 m<sup>2</sup> boarea, vilket är snittstorleken på en villa i Sverige för två vuxna och två barn.



### 4.1 Gynnsamma byggmetoder

Det är viktigt att förstå hur de olika delarna i en byggnad samverkar för att kunna rita ett verkligt energisnålt hus. Nedan förklarar jag tankarna bakom huset som presenteras i kapitel 4.4.

#### 4.1.1 Invändigt bärverk

Det allra vanligaste, när det kommer till småhus, är att bärverket ligger i fasaden, eventuellt tillsammans med bärande hjärtvägg i mitten av byggnaden. Problemet med att den bärande konstruktionen kombineras med den isolerande är att den bärande introducerar köldbryggor i den isolerande konstruktionen.

Flerbostadshus har ofta ett inre bärverk i betong som kläs med fasadelement. Ibland är dessa stommar istället gjorda i trä, även om detta inte är vanligt förekommande. Detta inre bärverk täcks för det mesta så att det inte syns.

Att man använder samma teknik i småhus har jag inte lyckats hitta några exempel på. Det är inte ovanligt att takstolen tillåts att synas, men att

hela konstruktionen synliggörs har jag inte funnit några exempel på. Idén i sig är egentligen inte så revolutionerande förrän man betänker vilka fördelar det kan ge i form av klimatskal utan köldbryggor och därmed tunnare väggkonstruktioner.

Jag har sedan tidigare använt mig av exponerat inre bärverk i ett lågenergiparhus som uppförts i Abbekås år 2012. Villa Malmberg (Fig 5) använder sig av en inre trästomme som klätts med sandwichelement i cellplast som bildar en obruten isolerande enhet utan köldbryggor.

I brist på andra exempel vill jag påstå att konstruktionen med exponerat inre bärverk i småhus uppfanns under mitt arbete med Villa Malmberg, där konstruktionen egentligen tillkom för att maximera boarean då den tillåtna bruttoarean var begränsad. Lösningen var att göra ytterväggarna så tunna som möjligt och jag fann Kenpo Sandwich, en producent av sandwichelement med cellplast som kärna, främst för kylbilar, som var intresserad av projektet. Konstruktionen tillkom i samverkan med byggnadens



*Fig 5: Det inre bärverket i Villa Malmberg ger karaktär åt rummet*

ägare Mats Malmberg, civilingenjör. Han beräknade den invändiga stommen som krävdes för att ha obrutna skivor i fasaden, vilket gav möjlighet till betydligt tunnare väggar än motsvarande träkonstruktion. Hela byggnaden är klädd med samma typ av element (utifrån in: puts på plåtskiva, 250 mm cellplast, plåtskiva, spånskiva och slutligen gipsskiva) både i väggar och tak, men med något tjockare skivor i takkonstruktionen.

Då detta var tidigt under min utbildning blev Villa Malmberg ett projekt jag lärde mig mycket av. Mycket av bärverkets detaljering i Villa Malmberg löstes på plats av snickarna, men med en arkitektoniskt mera medveten utformning av bärverket skulle rummet kunna ges en tydligare estetik och stommen kännas som en möbel i rummet.

Byggsättet innebär också att det går fort att få upp stommen och sedan klä den med det prefabricerade klimatskalet.

Stommen kan gärna vara i trä eftersom den i det här fallet helt och hållet befinner sig i uppvärmd

miljö och inte riskerar att drabbas av fuktskador. Differentieringen i material mellan stommen och klimatskalet kan också vara en positiv faktor ur ett estetiskt perspektiv.

Systemet innebär också en möjlighet att byta ut fasadelement i framtiden om något av dem skulle skadas eller om bättre isolerande material blir uppfunna.

#### 4.1.2 Cellplast

Sandwichelement i cellplast är fortfarande ett möjligt val, precis som cellplastkonstruktion enligt Cten-systemet som inte heller behöver invändigt bärverk, men eftersom det finns allvarliga risker vid brand har

jag valt ett annat oorganiskt material som kan ersätta cellplasten som klimatskal kring det inre bärverket - Quartzeneberikad skumbetong.

#### 4.1.3 Quartzeneberikad skumbetong

Kortfattat innebär skumbetong att man vispar betongen till ett skum, ungefär som vispgrädde, och håller den självkompakterande blandningen i en gjutform. Den härdade strukturen går att göra olika porös genom att vispa ner olika mängd luft och genom att variera mängden sand som används vid blandningen av betongen.

Ett EU-finansierat projekt, SESBE (Smart Elements for Sustainable Building Envelopes), har tittat på

*Quartzene® as powder*



*Quartzene® as gel*



*Quartzene® as pellets*



*Fig 6: Quartzene i olika leveransformer - pulver, gel och pellets (Bild: Cordis)*

hur skumbetong kan användas i fasadelement för att öka energieffektiviteten i både nya och befintliga byggnader. I det projektet, som avslutades för bara ett par månader sedan, använde man sig också av ett annat nytt material för att ytterligare förbättra skumbetongens egenskaper - Quartzene.

Quartzene (fig 6) är ett nanomaterial som ingår i gruppen aerogeler. Den första aerogelen framställdes faktiskt redan 1931 och NASA har sedan lång tid använt olika typer av aerogeler för isoleringen av rymdfarkoster och astronauternas dräkter, men eftersom aerogel har varit dyrt att framställa har det inte funnits många andra användningsområden än dessa högspecialiserade applikationer.

Quartzene tillverkas av företaget Svenska Aerogel AB och är kiselbaserat. Till skillnad från traditionella aerogeler behöver Quartzene inte tillverkas i autoklav. Därför kan det produceras i löpande produktion och därmed är kostnaden betydligt lägre än för traditionella aerogeler. Tillverkaren uppger en minskning av kostnaden med 90% jämfört med

traditionella aerogeler.

Strukturen i materialet påminner om porositeten i lättbetong, men porerna mäts i nanometer istället för millimeter. Ett gram Quartzene har en total area av ca 500 m<sup>2</sup> - ett mått som gör att läsaren kan få en uppfattning om porositeten i materialet.

Quartzene blandad i skumbetong bildar en

superporös oorganisk struktur med en densitet på 120 kg/m<sup>3</sup> och ett lambdavärde på 0,030 W/(m·K).

Dessa siffror är jämförbara med siffrorna för bättre typer av cellplaster, men liksom de bättre typerna av cellplast är Quartzeneberikad skumbetong inte särskilt lasttålig.

SESBE-projektet har dock löst problemet genom

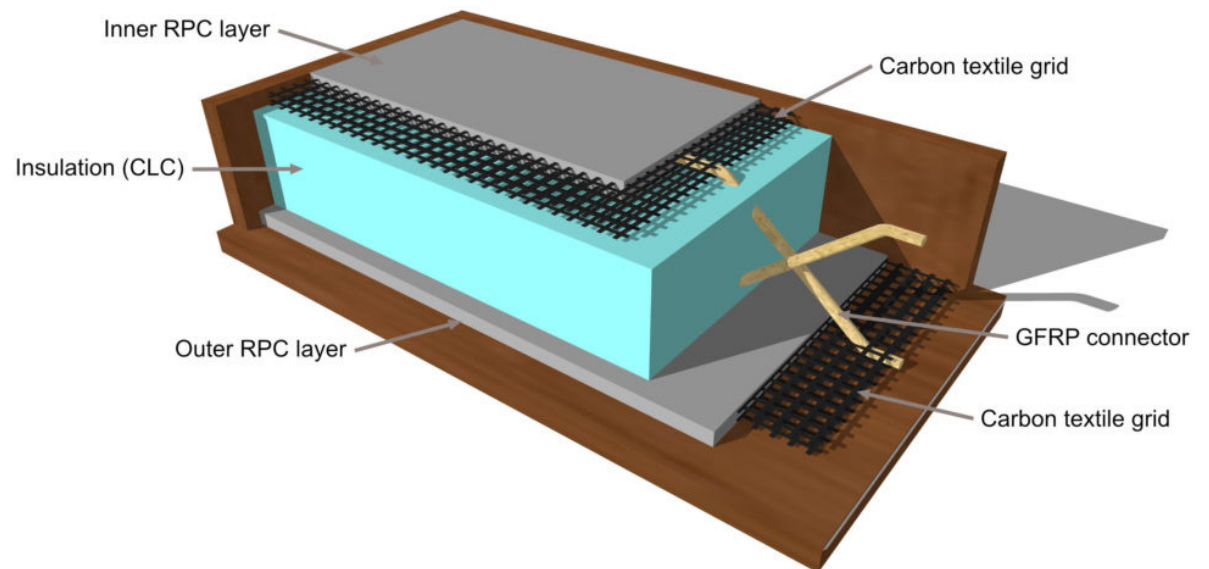


Fig 7: SESBE fasadelement gjuts i skikt i en form (Bild: SESBE)

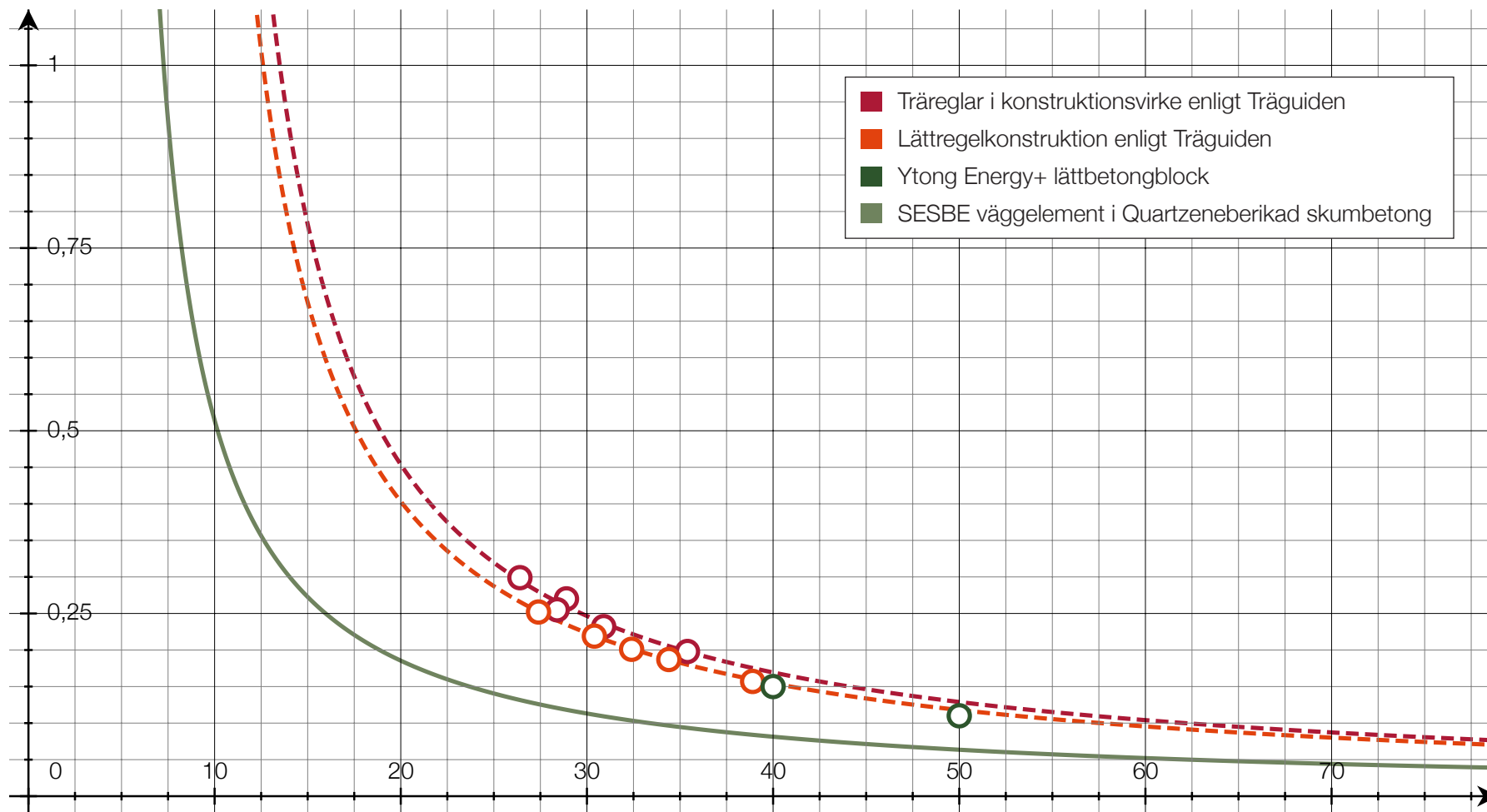


Fig 8: U-värde (W/(m²·K)) i förhållande till total väggjocklek (cm) för fyra konstruktionstyper. SESBE väggelement är överlägsen de traditionella konstruktionerna.



*Fig 9: Quartzeneberikad skumbetong är en mycket porös struktur med en densitet på 120 kg/m<sup>3</sup>*

att använda det nya materialet i en sandwichkonstruktion (fig 7) tillsammans med två tunna skikt av en kolfiberarmerad högpresterande betong, Reactive Powder Concrete (RPC). De omgivande lagren av RPC är vardera 25 mm tjocka och mellan dem sitter distanser i glasfiberarmerad plast ingjutna i Quartzeneberikad skumbetong.

Totalt sett innebär konstruktionen en enorm fördel över befintliga fasadelement då tjockleken vid samma isolerande förmåga ligger kring två tredjedelar av en traditionell konstruktion (fig 8).

Fasadelementen monteras mot ett inre bärverk med ingjutna fästen som inte sträcker sig genom den isolerande Quartzeneberikade skumbetongen utan bara den kolfiberarmerade höghållfasta RPCn. Detta gör dem perfekta för användning i flerbostadshus, men självklart går samma principer att använda i småhuskonstruktion.

Fasaden i RPC går att pigmentera och i EU-projektet göts den yttre skivan av RPC mot en speciell typ av textil som imiterar lotusblommans blad för att



göra betongen hydrofob (fig 9). Vid hygrotermiska modelleringar visade sig detta ha positiv effekt på den isolerande förmågan i fuktiga klimat. Det innebär också att den blir självrengörande vid regn och i experiment regnade t ex graffiti bort, även om det tog längre tid än andra, mera normala, luftburna föroreningar.

U-värdet för kompletta element i 30 cm tjocklek, som jag använder i min exempelvilla, är 0,12 W/(m<sup>2</sup>·K).

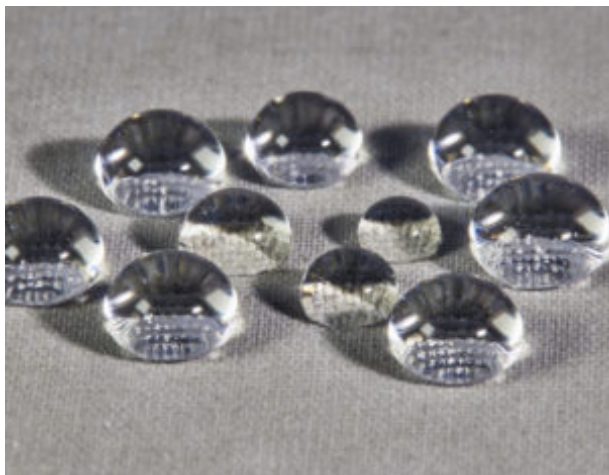


Fig 10: Hydrofobisk RPC-betong (Bild: SESBE)

#### 4.1.4 Fönster och dörrar

Fasadelementen enligt SESBE-systemet medför också att man kan tänka på ett nytt sätt när det kommer till fönster.

Eftersom det inte längre finns en luftad fasad, som vid träkonstruktioner, som kräver inklädnad kring fönster- och dörröppningar och eftersom väggen är som starkast i det yttre och inre skiktet lämpar sig väggen ypperligt för en karmfri fönstermontering med hjälp av mjukfog direkt mot fasadelementet (fig 10).

Hur detta även kan bidra till förbättringar när det kommer till köldbryggor och själva fönstrens U-värden blir tydligt när man betänker att själva fönsterkassetten, t ex 3-glas, har bättre U-värde än det kompletta fönstret med karm.

Visst behöver vi öppningsbara fönster i våra byggnader, men behöver alla fönster vara öppningsbara? I ett passivhus vill vi naturligtvis kunna vädra under varma dagar, men det går också att göra effektivt genom att planera vilka fönster som bäst skapar ett luftflöde av stigande varm luft genom huset.

Kanske är det, i en villa, istället en köksdörr tillsammans med ett fönster på andra våningen som ska öppnas för att skapa ett effektivt flöde av luften. I en lägenhet eller enplansvilla kan två dörrar på varsin sida av lägenheten öppnas för tvärdrag. Självklart kan även den dominerande vindriktningen på platsen vara en del i ett sådant avgörande.

En arkitektonisk fördel med lösningen är att man inifrån byggnaden inte ser något fönster. Därmed blir gränsen mellan ute och inne osynlig och en effekt som liknar den i Klippans kyrka, av Sigurd Lewerentz, kan uppnås utan de tekniska problem som Klippans kyrka har med vattenläckage pga fönstrens montering utanpå byggnadens fasad.

Dörrar och öppningsbara fönster som kräver karm kan monteras på liknande sätt, försänkt i ytterväggen. Det innebär också att det blir mer isolering som sluter runt karmen på insidan av fönstret eller dörren och hjälper till att isolera köldbryggan som alltid uppstår i mötet med väggen.





*Fig 11: Fönsterkassetter monterade direkt i fasaden med hjälp av mjukfog (Bild: Kreark)*

## 4.2 Miljö och hållbarhet

Hur miljövänliga byggnader är beror inte endast på hur mycket energi som går åt vid brukandet utan också på hur mycket energi som krävs vid produktionen och rivningen. En annan viktig aspekt är också livslängden för byggnaden. Ett välbyggt hus med goda isolerande egenskaper måste fortfarande användas under lång tid för att inte göra ett stort avtryck på miljön.

### 4.2.1 Energiförbrukning

Det viktigaste när det kommer till energiförbrukningen är egentligen att klimatskalet inte släpper ut för mycket värme. Det finns en optimal punkt där tjockleken på byggnadselementen, och därmed volymen material och mängden energi som åtgår för konstruktionen, möter hur mycket energi som åtgår vid brukandet. Detta beror såklart på hur lång brukandeperioden är. Kan klimatskalets tjocklek minskas samtidigt som isoleringsförmågan kvarstår så sparar det stora mängder material vid produktionen av byggnaden.

### 4.2.2 Miljöpåverkan

Det är viktigt att tänka på hur materialet som huset byggs av produceras, men även hur resthanteringen efter att byggnaden har spelat ut sin roll fungerar.

Hela den inre konstruktionen i trä kan byggas av obehandlat trä eftersom den inte kommer att utsättas för uteklimat. Vid rivning går det att använda den delen av byggnaden för andra ändamål eller för förbränning i exempelvis fjärrvärmeverk.

Fasadelementen i betong kan vid första anblick förefalla mindre miljövänliga än en träkonstruktion, men eftersom livslängden kan antas bli längre än för motsvarande träkonstruktion borde inte livscykelanalysen bli mycket sämre. SESBE skriver i sin rapport att det är för tidigt i utvecklingen att dra några slutsatser för den miljömässiga påverkan eftersom produktionskedjan inte är optimerad eftersom det fortfarande handlar om prototyper.

De skriver också att det är aerogelen, Quartzene, som står för den största delen av miljöpåverkan eftersom den kräver störst mängd energi vid tillverkningen.

Samtidigt är det framförallt det materialet som har störst potential till förbättring när produktionen skalas upp. Skumbetong utan aerogel förbrukar 40% mindre energi vid tillverkningen än samma volym aerogelberikad skumbetong.

### 4.3 Ekonomisk analys

Ekonomi i ett byggprojekt är såklart viktig. Det är fortfarande för tidigt att spekulera i hur kostsamt det färdiga fasadelementet blir då många delar i tillverkningen skett i prototypform.

Vad som står klart är dock att skumbetong utan aerogel blir ungefär lika kostsamt som motsvarande cellplastisolering. För Quartzeneberikad skumbetong ligger kostnaden ca tio ggr högre än för enbart skumbetong, enligt rapporten från SESBE. Där är de dock noga med att påpeka att när produktionen av Quartzene inte längre är småskalig kommer stora kostnadsänkningar ske.

En annan viktig del i sammanhanget är vilken betydelse ett tunnare fasadelement har för

totalekonomin i ett byggprojekt. Om väggen kan vara 10-20 cm tunnare innebär det i ett större flerbostadshus att man vinner ganska många kvadratmetrar bostadsyta.

Det förbättrar måttet boarea per bruttoarea och därmed hela projektets förutsättningar. Kanske kan det till och med innebära att det går att få ut en liten lägenhet extra per våningsplan vid riktigt stora projekt.

En extra lägenhet som kan hjälpa till att bära totalkostnaden kan vara nog för att försvara ett dyrare byggsätt.

### 4.4 Exempelvillan

Huset jag har ritat är konventionellt i planlösning. Fokus har istället legat på att undersöka vilka förutsättningar det nya byggsystemet ger. Den stora arkitektoniska nyheten är det inre bärverket. Villan som helhet är ett exempel på en möjlig teknisk lösning och det krävdes en komplett byggnad för att kunna beräkna och bekräfta att systemet klarar att klassas som passivhus enligt FEBY Guld och PHI Classic.

#### 4.4.1 Kabeldragning

Vissa begränsningar finns med att använda den här typen av fasadelement. Till exempel går det inte att lösa kabeldragning i väggen på bygget utan att kompromissa om både fasadelementets integritet och isolerande förmåga.

Det finns många möjliga lösningar - utanpåliggande kabeldragning längs ytterväggar, gömd kabeldragning i golvlister och eluttag i utanpåliggande dosor eller att helt enkelt gjuta in dem i väggen i fabriken när man gjuter elementen. Lösningen jag valt är att eluttagen längs ytterväggen är nedsänkta i golven på samma sätt som är vanligt i offentligmiljö (fig 12).

#### 4.4.2 Ventilation

Ventilationsrör kan inte heller gå i ytterväggarna, dock går det att lösa genom att låta dem gå genom trästrukturen i den inre stommen. Att göra hål genom fasaden för exempelvis friskluft eller avluft går däremot lika bra som i andra stenkonstruktioner så länge man förhåller sig till passivhusstandard i genomföringarna.





*Fig 12: Exempelvillans västfasad med pergola som kan användas för solavskärmning. Pergolan innebär visuellt en förlängning av det inre bärverket och bidrar till kopplingen mellan inne och ute.*



#### 4.4.3 Ej öppningsbara fönster

De fönster som inte går att öppna limmas med mjukfog i försänkningar kring fönsteröppningarna i fasadelementen. Att fönsterkassetten är större än fönsteröppningen innebär att den isolerande Quartzeneberikade skumbetongen hjälper till att minska köldbryggan i övergången mellan väggen och fönstret. Öppningarna kläs invändigt med träpanel, men det skulle också gå att putsa över den exponerade skumbetongen med pigmenterad puts om man vill matcha den pigmenterade RPC-betongen i fasadens båda ytskikt.

De fasta fönstren jag har valt är Saint Gobain



*Fig 13: Eluttag som poppar upp ur golvet när man trycker på det (Bild: Bauhaus)*

Climatop2 Ultra som har ett U-värde på  $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

#### 4.4.4 Öppningsbara fönster och dörrar

Dörrar och fönster som måste gå att öppna limmas även de i försänkningar kring fönsteröppningarna i fasadelementen. Genom att dörrar och fönster öppnas utåt kan den synliga karmen inåt minimeras. Dessutom innebär infästningen att den Quartzeneberikade skumbetongsisoleringen även här hjälper till att minska köldbryggan kring fönstren och dörrarna. Även här kläs öppningarna med träpanel för att täcka den exponerade skumbetongen. Här får man dock räkna med ett U-värde på  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

#### 4.4.5 Uppdelning av fasaden i delar

Fasadsystemet fungerar bäst om det får byggas av större skivor utan hål. Därför har jag valt att dela upp fasaden där jag har stora fönster så att skivorna och fönstren kan överlappa längs det inre bärverket i vilket fasadelementen måste fästas. Se fig 15-18.

#### 4.4.6 Fasadkulör

Jag har valt att färga RPC-betongen med ett terrakottapigment. Det är en av de kulörer som SESBE-projektet använde sig av i sina tester av pigmentering av fasadelementen. Vilket pigment som helst kan användas för infärgning av betongen som tack vare den fina ytan i RPC-betongen kan bli väldigt homogent infärgad.

#### 4.4.7 Taklösning

Taket kan bestå av samma typ av prefabelement som fasaden, men eftersom det finns större risk för fukt att tränga in i en nästan horisontell konstruktion genom mikrosprickor i betongen innebär det att den i så fall måste täckas. Jag har valt att täcka takkonstruktionen med kopparplåt för att jag menar att den grönärgade ytan kopparn får med tiden kommer att spela väl med den terrakottafärgade RPC-betongen i fasaden.

#### 4.4.8 Detaljer i det invändiga bärverket

Bärverket sätts ihop av limträbalkar med hjälp av

pluggar. Tvärsnittsdimensionerna är för de vertikala limträpelarna 115x115 mm och för de horisontella limträbalkarna 115x180 mm. Efter att ha studerat Träguidens rekommenderade dimensionering för limträkonstruktioner uppskattas dessa dimensioner klara av att bära lasterna av hela konstruktionen med snölast på taket.

Sammanfogningen är inspirerad av Gerrit Rietvelds Röd och blå stol. Pluggar slås mellan balkarna och pelarna där de möts och på så sätt låses de fast av varandra (fig 13)

Stabiliseringen kan ske med hjälp av krysstag, men i huset jag ritat har jag valt att använda skivverkan i innerväggarna. Innerväggarna har en total tjocklek av 115 mm och utgörs av finplywood i ask som fästs i en regelkonstruktion mellan de 115x115 mm tjocka limträpelarna så att pelarna fortfarande är synliga.

Målet är att bärverket tillsammans med innerväggarna ska framstå som en möbel i det rum som avgränsas av den pigmenterade betongen i fasadelementen.



*Fig 14: Det inre bärverket sätts samman i med pluggar i knutarna likt Rietvelds Red and Blue Chair.*



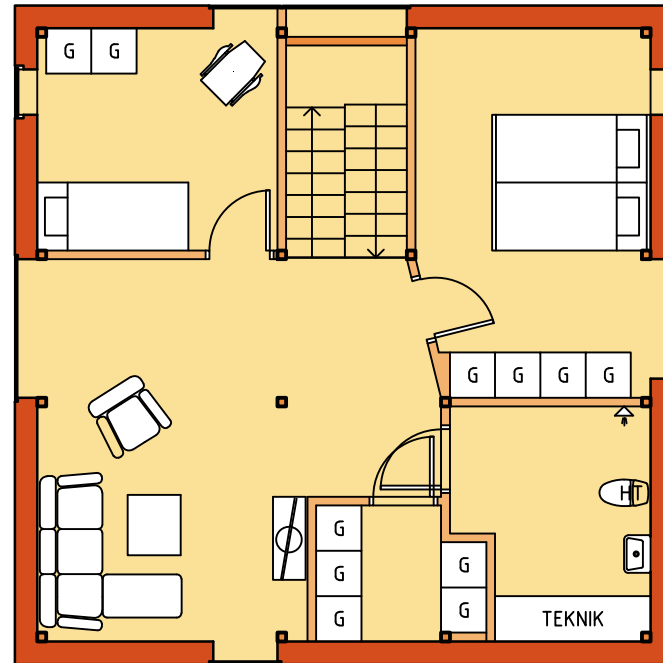
*Fig 15: Bild från köket över vardagsrummet som visar hur bärverket kan upplevas i det dagliga livet.*



Fig 16: Plan 1 med trädgård i skala 1:100. På bottenplan är golvet av slipad betong.

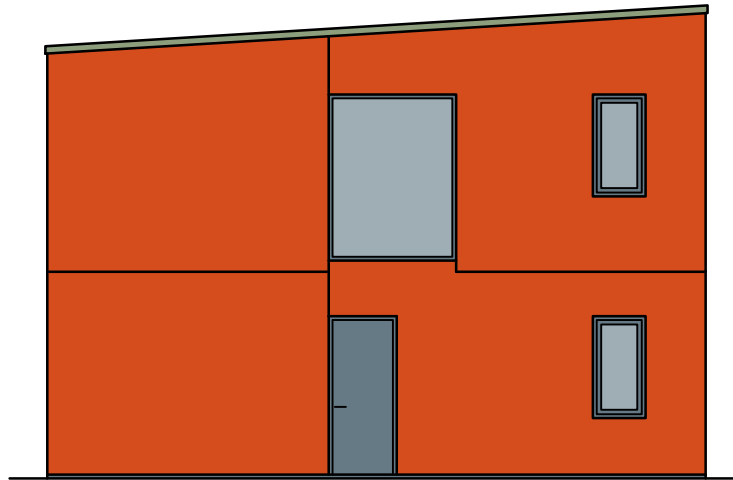


*Fig 17: Alla sovrummen har ett stort karmöst fönster rakt innanför dörren för att lösa upp vad som är ute och vad som är inne.*

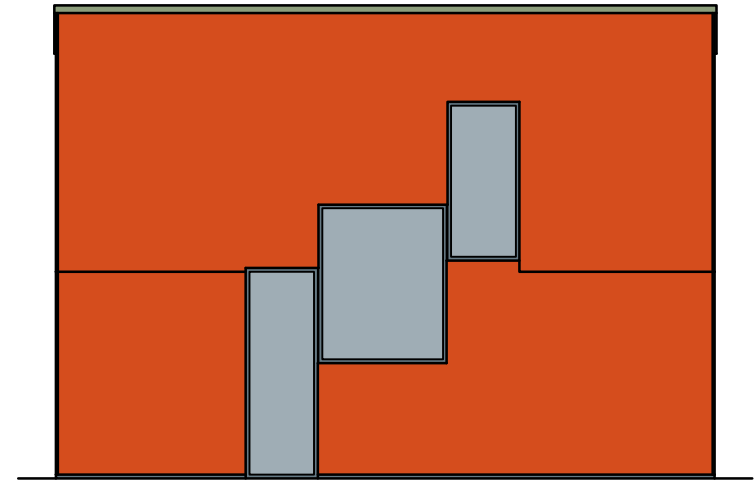


*Fig 18: Plan två i skala 1:100. Plan två har trägolv för att förtydliga det inre bärverket som en möbel i rummet.*

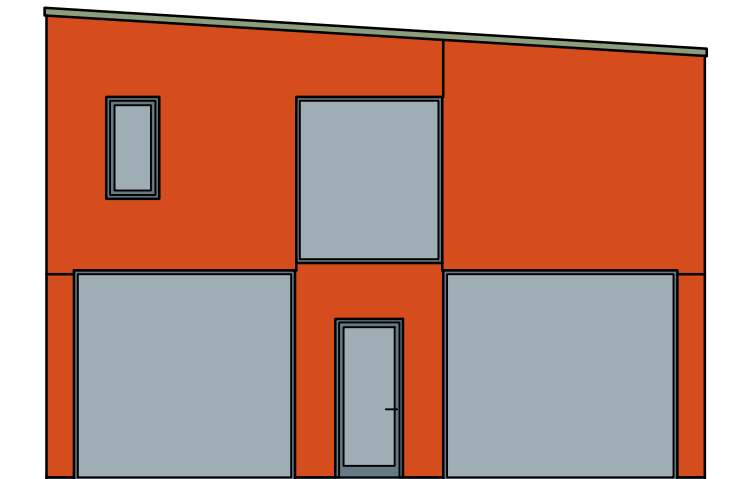




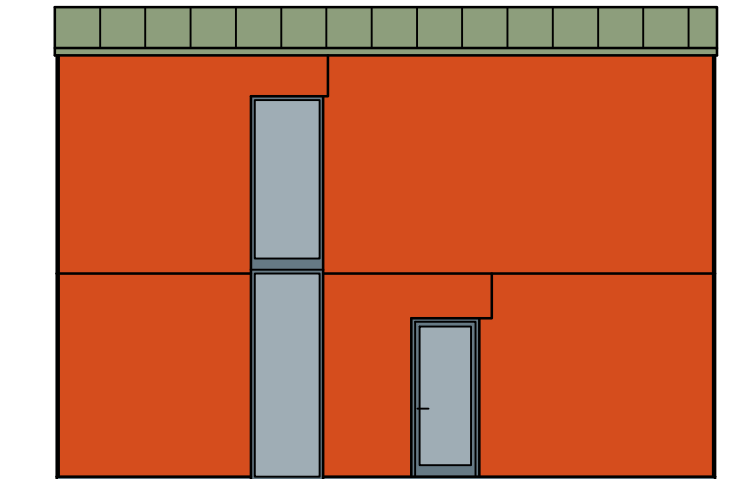
*Fig 19: Östra fasaden i skala 1:100.*



*Fig 20: Norra fasaden i skala 1:100.*



*Fig 21: Västra fasaden i skala 1:100.*



*Fig 22: Södra fasaden i skala 1:100.*



## 5 Diskussion

Jag har lagt ner enormt mycket tid för att sätta mig in i hur passivhus fungerar och ju mer jag läst desto mer blir jag övertygad om att det inte finns andra sätt att bygga på. Ska våra byggnader hålla i decennier, eller kanske till och med sekel, så måste vi bygga dem så bra vi kan.

Problemet jag hela tiden brottats med när det gäller passivhus är hur de flesta av dem byggs. Jag menar att trä inte är en lämplig konstruktion för en så tjock och välisolerad konstruktion. En personlig uppfattning är att vi inom en 20-årsperiod kommer att upptäcka många fuktskador i passivhus byggda av trä, även om de från början har byggts med större omsorg än normala hus.

En annan intressant detalj som jag upptäckt när jag pratat med andra om projektet är att de flesta kommenterar att väggarna i huset jag ritat inte är tunnare än vanliga väggar. Det är precis det som är meningen. Problemet som de jag pratat med har är att de inte förstår hur mycket vägg som faktiskt krävs för att ett hus ska hålla passivstandard. Faktiskt så krävs

det en träkonstruktion på nästan 50 cm total tjocklek för att den ska ha motsvarande isolerande värde som den konstruktion jag förespråkar.

Det är också, faktiskt, inte så enkelt att förstå hur man ska göra för att bygga och få ett hus klassat som passivhus. Först måste man välja vilken organisation man ska följa och sedan måste man förstå reglerna som finns uppställda.

Även Boverkets beräkningar där man ska använda primärenergi blir komplicerat att följa. Det är också intressant att jag inte kunnat finna någonstans varför primärenergi används eller varför el är det enda energislaget som får straffsats i systemet. Det är förvisso det mest raffinerade bränslet bland de energibärare som Boverket använder sig av, men jag tycker ändå inte att det riktigt stämmer överens med Sveriges produktion av el då vi får en stor andel av elektrisk energi från förnyelsebara källor som vatten och vind.

Kanske har straffsatsen satts för att motverka att man använder direktverkande el för uppvärmningen

istället för att installera en värmepump av något slag.

Det inre bärverket som jag uppfunnit för att möjliggöra tunnare väggar i småhus tror jag är något som kan utvecklas ytterligare. Det system som syns i rapporten är ett exempel på hur tanken kan appliceras i verkligheten, men det finns oändliga möjligheter till variation av systemet för den arkitekt som så önskar. Det går självklart också att använda andra material i konstruktionen, men personligen förespråkar jag trä eftersom det är en förnyelsebar råvara och ett material som kan hålla nästintill oändligt länge så länge vi tar hand om det och håller det i en uppvärmd miljö. Det ger också miljöerna vi vistas i en känsla av värme och äkthet.

När det kommer till det nya system för isolering som jag hittat tror jag verkligen att det kan vara ett material för framtiden. Speciellt lämpligt är det också för att bygga flerbostadshus, vilket bör bli än vanligare med tanke på inflyttningen till storstäderna som sker runt hela jorden.



## 6 Slutsats

Efter att ha sökt efter en bättre lösning på problemet med tjocka klimatskal i modernt byggande har jag kommit till slutsatsen att det finns andra alternativ än de vi har använt traditionellt.

Många forskningsprojekt pågår just nu för att utforska nya material, eller, som i fallet med aerogel, gamla material som fått nya förutsättningar. Jag har stött på långt fler sätt att bygga på än vad som får plats i den här rapporten. Därför är jag hoppfull inför framtiden.

Dock är det trots allt i framtiden vi kommer kunna bygga hus med aerogelisolering i stor skala. Tekniken har inte hunnit ända till produktionsklar lösning, men det är på väg och det är kul att ha fått en inblick i vad som väntar redan innan produkterna börjar lanseras.



ECOFYS (2013) - Guidance document for national plans for increasing the number of nearly zero-energy buildings

[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb\\_ecofys\\_guidance.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_ecofys_guidance.pdf)

ECOFYS (2013) - Towards nearly zero-energy buildings - Definition of common principles under the EPBD - Final report - Executive Summary

[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb\\_executive\\_summary.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_executive_summary.pdf)

BBR 25 - Boverkets Byggregler (föreskrifter och allmänna råd)

<https://rinfo.boverket.se/BBR/PDF/BFS2017-5-BBR-25.pdf>

BEN 2 - Boverkets energiberäkningsnorm

<https://rinfo.boverket.se/BEN/PDF/BFS2017-6-BEN-2.pdf>

FEBY 18 - Kravspecifikation för energieffektiva byggnader

[https://www.feby.se/images/Rapporter/Kravspecifikation\\_FEBY18.pdf](https://www.feby.se/images/Rapporter/Kravspecifikation_FEBY18.pdf)

Passive House Institute - Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard

[http://passiv.de/downloads/03\\_building\\_criteria\\_en.pdf](http://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf)

Passivhuscentrum Västra Götaland (2014) - Introduktion till passivhus

Johansson (2010) - Beskrivning av temperatur och relativ fuktighet ute i svenskt klimat

<http://www.hvac.lth.se/fileadmin/hvac/files/TVIT-7000pdf/TVIT-7052DJweb.pdf>

Sundqvist, Allansson (2006) - Utformning av energieffektiva bostäder

[http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi\\_byggnadsdesign/images/Publikationer/Rapport\\_ver031\\_stefan\\_henrik.pdf](http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Rapport_ver031_stefan_henrik.pdf)

Energimyndigheten (2011) - Energieffektiva småhus - En marknadsöversikt för dig som ska bygga nytt

[http://hallbarutvecklingvast.se/system/files/marknadsoversikt\\_energieffektiva\\_smahus\\_2011.pdf](http://hallbarutvecklingvast.se/system/files/marknadsoversikt_energieffektiva_smahus_2011.pdf)

Bagge et al. (2004) - Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö

[http://www.lth.se/fileadmin/byfy/files/TVBH-3000pdf/HB\\_AE\\_LL-3048.pdf](http://www.lth.se/fileadmin/byfy/files/TVBH-3000pdf/HB_AE_LL-3048.pdf)

SvD, (2017) - Material bakom branden i London ökar snabbt i Sverige

<https://www.svd.se/klar-material-bakom-londonbranden-okar-snabbt-i-sverige>

Silva et al. (2015) - Foam concrete-aerogel composite for thermal insulation in lightweight sandwich facade elements

[https://www.researchgate.net/publication/283641278\\_Foam\\_concrete-aerogel\\_composite\\_for\\_thermal\\_insulation\\_in\\_lightweight](https://www.researchgate.net/publication/283641278_Foam_concrete-aerogel_composite_for_thermal_insulation_in_lightweight)

CORDIS (2017) - Quartzene Report Summary

[https://cordis.europa.eu/result/rcn/203518\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/203518_en.html)

SESBE (2017)- Final Report Summary

[https://cordis.europa.eu/result/rcn/201673\\_en.pdf](https://cordis.europa.eu/result/rcn/201673_en.pdf)

SESBE - Panel Elements

<http://www.sesbe.eu/achieved-results/component-development/panel-elements/>

SESBE - Reactive Powder Concrete

<http://www.sesbe.eu/achieved-results/material-development/reactive-powder-concrete/>

SESBE (2018) - Selected and edited partial reports for external communication and articles published in technical and scientific journals

<http://www.sesbe.eu/wp-content/uploads/2018/01/SESBE-D6.3-Selected-and-edited-partial-reports.pdf>



## Bildreferenser

Fig 2: Cten byggsystem - <http://www.emrahus.se/sa-bygger-vi/> (2018-05-13)

Fig 3: Ytong Energy+ - [https://www.xella.se/yong\\_energy\\_\\_2434.php](https://www.xella.se/yong_energy__2434.php) (2018-05-13)

Fig 4: Träkonstruktion för passivhus - <http://www.paroc.se/losningar/byggisolering/vaggar/ventilerade-fasader-traregelvagg> (2018-05-13)

Fig 6: Olika leveransformer av Quartzene - [https://cordis.europa.eu/result/rcn/203518\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/203518_en.html) (2018-03-15)

Fig 7: SESBE fasadelement gjuts i skikt i en form - <http://www.sesbe.eu/achieved-results/component-development/panel-elements/> (2018-05-13)

Fig 9: Quartzeneberikad skumbetong [...] densitet på  $120 \text{ kg/m}^3$  - <http://www.sesbe.eu/achieved-results/material-development/foam-concrete/> (2018-05-18)

Fig 10: Hydrofobisk RPC-betong - <http://www.sesbe.eu/achieved-results/material-functionalization/easy-to-clean-surface/> (2018-05-13)

Fig 11: Fönsterkassetter monterade direkt i fasaden med hjälp av mjukfog - <http://www.kreark.se> (2018-05-13)

Fig 13: Eluttag som poppar upp ur golvet när man trycker på det - <https://www.bauhaus.se/grenuttag-gelia-4-vags-popup-modul.html> (2018-05-13)

