



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 22023

Examensarbete 30 hp

Maj 2022

Värmetröghet i byggnader

En studie som undersöker en skolbyggnad utifrån olika materials värmetröghet samt dess klimatpåverkan genom en livscykelanalys

Kerstin Axelsson



Abstract

Thermal inertia is defined as “a measure of the responsiveness of a material to variations in temperature”. This means that materials with high thermal inertia will show small changes in temperature during a cycle of time and vice versa.

This study aimed to evaluate the energy saving potential of thermal inertia which can be raised by the choice of various building materials. For this aim, a case study of a preschool building was used in which different configurations (i.e. different combinations of materials) of exterior walls and interior floors were studied using a building energy simulation program, IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). The study mainly focused on the materials and configurations that yielded high thermal inertia where the results were compared with the as-built design of the preschool building in terms of heating and cooling demand as well as overheating.

Furthermore, a life cycle analysis (LCA) was conducted using a LCA program, i.e. One Click LCA. This was done in order to understand better how the choice of building materials, besides the thermal inertia and its energy-saving potential, could affect the carbon footprint of a building from a life cycle perspective.

The results indicated that there aren't significant differences in heating demand between the studied material configurations and the reference building. However, moderate changes were observed in both cooling demand and overheating, especially for some materials that have higher thermal inertia. A common denominator among these configurations was that all consisted of interior floors of either wood or massive wood. However, in terms of "CO₂ emissions", significant differences between the studied materials and reference building were observed. In general, it was found that the life carbon impact increased in the most material configurations. This increase was more than offsetting reductions obtained in the operational "CO₂ emissions", i.e., the reduction in energy demand caused using materials with higher thermal inertia. The configurations that performed better than the reference building from a life cycle perspective were the ones that didn't consist of concrete, neither for exterior walls or interior floors.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala/Visby

Handledare: Robert Hansson Ämnesgranskare: Farshid Shadram

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

En av vår tids och framtida generationers främsta utmaningar ligger i hur vi ska tackla de klimatutmaningar som ligger framför oss. En viktig del för att minska klimatkrisens omfattning ligger i att hushålla med energi på ett bättre sätt. Byggindustrins hela förlopp, från tillverkning av byggnadsmaterial till den färdiga byggnadens energiförbrukning, är en industri som är väldigt energikrävande.

Den första delen av denna studie ämnar undersöka en passiv mekanism för att reducera en byggnads energi för uppvärmning och kylning, i form av att utnyttja värmetröghet för olika material. Detta har genomförts genom en fallstudie av en förskolebyggnad där olika materialkombinationer av ytterväggar och mellanbjälklag har studerats med hjälp av programvaran IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). Studien fokuserar på material med hög termisk tröghet som jämförs med ett referensscenario av förskolebyggnaden simulerad med de planerade materialvalen för yttervägg och mellanbjälklag för förskolan.

Resultatet visar på att energin för uppvärmning är relativt oförändrad i jämförelse med referensmodellen oavsett vilken materialkombination som simuleras. Många scenarier visar dock på ett minskat kylbehov och färre överhettningstimmar i jämförelse med referensbyggnaden. En gemensam nämnare för dessa konfigurationer är att de har mellanbjälklag av antingen trä eller massivträ. Det uppvisade skillnaderna i energiförbrukning för kyla samt överhettning är mer eller mindre viktiga aspekter beroende på hur bygganden utformas samt dess geografiska placering.

Den andra delen i studien innehöll en livscykelanalys som genomfördes i programvaran One Click LCA. Detta genomfördes för att få en bättre förståelse för hur valet av byggnadsmaterial även påverkar koldioxidavtrycket i ett livscykelperspektiv. Resultatet från den här delen av studien visar på att de fanns signifikanta skillnader i CO₂-ekvivalent utsläpp mellan de studerade materialen. Ökningarna av CO₂-ekvivalent utsläpp var för vissa scenarier i denna del så pass stora att de överskuggar de minskningar av CO₂-ekvivalent utsläpp som erhålls från ett minskat energibehov till följd av användningen av material med hög termisk tröghet. De materialkombinationer som stack ut med höga värden av CO₂-ekvivalent utsläpp var främst de som innehöll betong.

Förord

Detta examensarbete avslutar min civilingenjörsutbildning i System i Teknik och Samhälle med inriktningen energisystem vid Uppsala universitet. Examensarbetet omfattar 30 hp och har utförts hos Uppsala Kommun Skolfastigheter AB under vårterminen 2022.

Jag vill rikta ett stort tack till min ämnesgranskare Farshid Shadram, biträdande universitetslektor vid institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik, byggteknik och byggd miljö på Uppsala universitet. Din expertis och hjälp har betytt mycket för genomförandet och det slutliga resultatet för detta arbete.

Jag vill även tacka Uppsala Kommun Skolfastigheter AB och speciellt min handledare Robert Hansson för att jag fått göra mitt examensarbete hos er.

Slutligen vill jag även tacka Ramböll Sverige AB för utlåningen av er modell av Rosendals förskola i IDA ICE.

Kerstin Axelsson Uppsala, maj 2022

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Syfte och forskningsfrågor	1
1.2 Avgränsningar	1
2. Teori.....	2
2.1 Värmebalans	2
2.2 Termisk komfort.....	3
2.3 Värmeegenskaper	3
2.3.1 Värmekapacitet	3
2.3.2 Värmeledning.....	4
2.3.3 U-värde	4
2.3.3 Värmediffusivitet och värmeeffusivitet:	4
2.4 Värmetröghet.....	5
2.4.1 Utnyttjandegraden av värmetröghet.....	8
2.5 Forskningsläge - värmetröghet	8
2.6 Klimatpåverkan och livscykelanalys.....	10
2.6.1 Forskningsöversikt - LCA av byggnadsmaterial	11
3. Metod.....	13
3.1 Energisimulering och LCA	13
3.1.1 IDA ICE.....	13
3.1.2 LCA- analys	14
3.2 Fallstudie skolbyggnaden.....	14
3.3 Referensmodell	15
3.3.1 Yttervägg	15
3.3.2 Mellanbjälklag.....	16
3.4 Alternativa konstruktionslösningar för yttervägg och mellanbjälklag.....	16
3.4.1 Yttervägg av KL-trä.....	17
3.4.2 Yttervägg av betong	17
3.4.3 Yttervägg av träregel med tegelfasad	18
3.4.4 Mellanbjälklag.....	18
3.4.5 Mellanbjälklag av KL-trä	18
3.4.6 Mellanbjälklag av trä.....	19
3.5 Sammanställning av konstruktionslösningar	19
4. Resultat och analys	20
4.1 Energianvändning.....	20
4.2 Överhettning	24

4.3	LCA analys	26
5.	Diskussion	27
6.	Slutsatser	29
7.	Fortsatta studier	29
	Referenser	31
	Appendix	34
	Bilaga A	34
	Bilaga B	36

1. Inledning

Vi lever idag i en verklighet där klimatkrisen inte längre går att ducka för. Riksdagen har beslutat att Sverige år 2045 inte ska ha några nettoutsläpp (Sveriges miljömål, 2022) och därför gäller det att alla sektorer i samhället drar sitt strå till stacken för att tillsammans minska effekterna av klimatförändringarna. Energiförbrukningen i bostadshus och lokaler i Sverige står för mer en tredjedel av den nationella energianvändningen (Naturvårdsverket, 2022). Mycket av energin till byggnader går till uppvärmning och ventilation, och eftersom skolor och förskolor ofta är stora lokaler är de även stora energibovar.

Det går att skilja på två olika strategier för att minska en byggnads energibehov, aktiva och passiva strategier. Aktiva strategier som kopplar till förbättringar av uppvärmning, ventilation och belysning samt passiva strategier som kopplar till att exempelvis optimera solinstrålning och öka den termiska isolationen i byggnaden (Verbeke, Audenaert, 2018). En annan sådan passiv strategi är att använda värmetröga material för att på så vis minska värmeförbrukning samt eventuell förbrukning av kyla. Förutom energianvändningen under byggnadens användningsfas är en annan energiintensiv del under en byggnads livstid materialtillverkning. Det är därför viktigt att även ta hänsyn till den energin och klimatpåverkan som härleds från produktskedet när man funderar på att adoptera en strategi för att minska energibehovet i användningsfasen.

1.1 Syfte och forskningsfrågor

Syftet med detta arbete är att dels utforska om det finns energisparpotential som skulle kunna uppnås i nuvarande och framtida byggnader om de i projekteringsfasen tar hänsyn till värmetröghet vid val av material. Den andra delen i detta arbete ämnar undersöka hur olika byggnadskonfigureringar med avseende på värmetröghet påverkar klimatet ur ett livscykelperspektiv. Två forskningsfrågor har identifierats för att uppnå detta syfte.

Forskningsfråga 1: Hur kan värmetrögheten från olika byggnadsmaterial påverka värme- och kylbehovet av en byggnad?

Forskningsfråga 2: Vilken klimatpåverkan orsakas av byggnadsmaterial när värmetrögheten prioriteras?

1.2 Avgränsningar

Modellen av Rosendals förskola är en modell som är gjord i planeringsfasen av förskolan. Det betyder att modellen på förskolan och förskolan i verkligheten kommer ha vissa skillnader, just därför att det aldrig går att göra en modell helt optimal samt att det kan komma att ske förändringar under byggprocessen.

Detta examensarbete fokuserar på materialval för ytterväggar och mellanbjälklag och övriga konstruktionsdelar har exkluderats. Detta beslut baseras på att ytterväggar samt mellanbjälklag är två volymmässigt stora delar av stommen, och bör därför ha en hög påverkan på värmetrögheten för byggnaden. Begränsningar gällande konstruktion och material har också varit nödvändigt, vilket landade i 12 olika kombinationer av material för ytterväggar samt mellanbjälklag.

Syftet med studien har varit att studera energianvändning och klimatpåverkan, och därför har olika materials övriga tekniska egenskaper som exempelvis materialegenskaper kopplat till brand- och buller utelämnats.

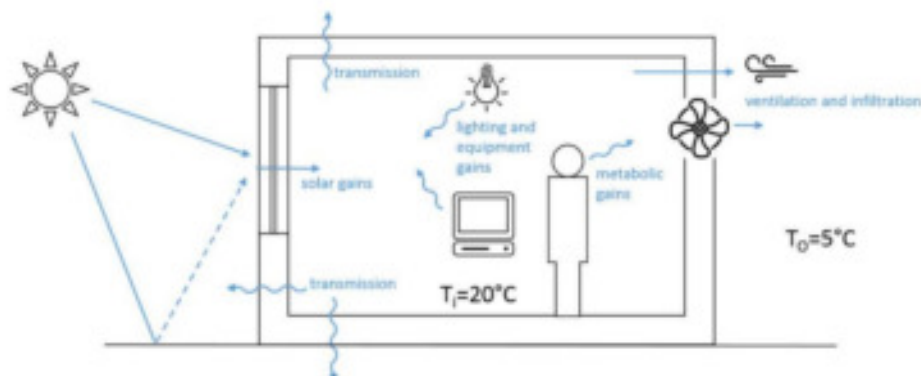
Vad det gäller livscykelperspektivet har en förenklad analys genomförts. Fokus i analysen ligger på två faser under byggprocessen, materialproduktion samt användningsfasen. Detta val baseras på tidigare studier som har visat att de två faserna står för den största delen av CO₂ utsläpp och energianvändning under en byggnads livscykel.

2. Teori

I detta avsnitt presenteras relevanta teorier och begrepp som syftar till att ge en ökad förståelse för studiens uppbyggnad och resultat.

2.1 Värmebalans

En fastighets värmebalans påverkas av ett antal faktorer, exempelvis internvärme i form av människor och apparater, ventilation, solvärme samt byggnadens klimatskal. Det finns en förlustsida i form av värme som leds ut genom klimatskalet och ventilationen då inomhustemperaturen är högre än utomhustemperaturen samt en tillförselsida som tillför värme genom solstrålning, internvärme samt "köpt" energi för uppvärmning. Förutom dessa två delar så fungerar värmetrögheten i en byggnad som en utjämningsdel som kan jämna ut temperaturväxlingar genom att lagra energi vid höga temperaturer och släppa ifrån sig energi i form av värme vid låga temperaturer. I figur 1 visas förluster och tillförsel av energi som sker till en byggnad (Verbeke, Audenaert, 2018).



Figur 1: Värmeflöden i ett rum (Verbeke, Audenaert, 2018).

2.2 Termisk komfort

En bra inomhusmiljö är extremt viktigt i undervisningslokaler då detta är en plats där barn ska vistas och koncentrera sig under en hel arbetsdag. Parametrar som inkluderas i begreppet god inomhusmiljö är ljud och ljusmiljö samt temperatur och luftkvalitet. Skolmiljön är en komplex miljö för att reglera värme, kyla och ventilation i då värmelaster varierar kraftigt under dygnet. Eleverna i skolan eller förskolan bidrar med en stor värmelast tillsammans med annan elektrisk utrustning som används under dagen. I ett klassrum eller aktivitetsrum så förflyttas även eleverna in och ut ifrån rummet under dagen då de exempelvis lämnar byggnaden vid raster. Den termiska faktorn består av ett flertal delar, inte bara lufttemperaturen som kanske är den mest självklara. Den består även av strålningstemperatur, exempelvis från fönster, luft rörelser samt relativ fuktighet (Länsstyrelsen i Dalarnas län, 2020). Ett medelvärde av lufttemperaturen och medelstrålningstemperaturen från omgivande ytor benämns tillsammans som den operativa temperaturen. Den operativa temperaturen mäter därför den upplevda temperaturen på ett bra sätt (Folkhälsomyndigheten, 2022).

Begreppet termisk komfort beskriver hur en inomhusmiljö upplevs i beaktning till temperatur och drag. Den termiska komforten påverkas av ett flertal faktorer: den riktade operativa temperaturen och hur den skiljer sig mellan olika områden, golvtemperatur samt lufthastighet. Börvärdet för operativ rumstemperatur för undervisningslokaler är enligt riktlinjer från Sveby minst +22°C. För andra utrymmen, exempelvis trapphus, förråd och källare är börvärdet 18 °C (Sveby, 2015)

2.3 Värmeegenskaper för byggmaterial

2.3.1 Värmekapacitet

Energi kan lagras som värme i material. Värme är en slags rörelseenergi som består av molekyler som vibrerar. Beroende på materialets egenskaper i form av struktur och bindningar får olika material olika bra värmelagringsegenskaper. Ett materials specifika värmekapacitet beskriver hur mycket energi som lagras per kilo av materialet då

temperaturen höjs en grad. För byggnadsmaterial kan det vara mer fördelaktigt att använda den volymetriska värmekapaciteten i stället, vilken beskriver hur mycket energi som lagras per kubikmeter av materialen då temperaturen höjs en grad. Den volymetriska värmekapaciteten är exempelvis $0,5 \text{ J/m}^3\text{K}$ för granit och betong, $0,2 \text{ J/m}^3\text{K}$ för trä samt $0,03\text{--}0,003 \text{ J/m}^3\text{K}$ för mineralull (Byggnadsfysik, 2017).

2.3.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktivitet benämns även ofta som värmeledningsförmåga och betecknas som lambda (λ), där λ -värdet ökar linjärt med densiteten (Träguiden, 2021).

Värmeledningsförmågan definieras som den värmemängd som per sekund passerar genom en kvadratmeter med tjockleken en meter av ett visst material för att temperaturen ska höjas med en grad. Ju lägre λ -värde, desto bättre är värmemotståndet hos materialet (Sandin, 2010).

2.3.3 U-värde

U-värdet, även kallat värmegenomgångskoefficient, för ett material är ett mått på dess värmeisolerande egenskaper. U-värdet beskrivs även som inversen av värmemotståndet för ett material. Mer specifikt så definieras det som den värmemängd som per tidsenhet passerar genom en ytenhet av konstruktionen då skillnaden i lufttemperatur på ömse sidor är en grad. Ett lägre U-värde innebär bättre värmeisolerande egenskaper och därmed att mindre energiförluster sker (Abel och Elmroth, 2016).

2.3.4 Värmediffusivitet och värmeeffusivitet

Värmediffusivitet anger hur snabbt temperaturen i ett material närmar sig jämvikt med omgivningens temperatur och specifik värmediffusivitet beskriver hur detta sker per kubikmeter. Värmeeffusivitet, som även benämns som termisk tröghet, är ett mått som beskriver hur snabbt material tar upp och behåller värmen. I tabell 1 nedan visas några vanliga byggmaterial och deras respektive värmekonduktivitet, specifika värmediffusivitet samt värmekapacitet (Träguiden, 2021).

Tabell 1: Värmekonduktivitet, specifik värmediffusivitet och värmekapacitet för några vanliga byggnadsmaterial. Innehåll är formaterat efter träguiden (Träguiden, 2021).

Material	Värmekonduktivitet (λ) [$W/m^{\circ}C$]	Specifik värmediffusivitet (a) [m^2/s]	Värmekapacitet (c) [$J/kg^{\circ}C$]
KL-trä	0,13	$0,19 \cdot 10^{-6}$	1 600
Lättbetong	0,14	$0,28 \cdot 10^{-6}$	500
Mineralull	0,04	$0,30 \cdot 10^{-6}$	120
Gips	0,25	$0,31 \cdot 10^{-6}$	720
Tegel	0,6	$0,44 \cdot 10^{-6}$	1 350
Betong	1,7	$1,00 \cdot 10^{-6}$	1 000

2.4 Värmetröghet

Värmetröghet är ett mått på ett hus termiska stabilitet. För att jämföra olika byggnaders värmetröghet kan man titta på den termiska trögheten för olika material. Den termiska trögheten räknas ut enligt ekvation

$$P = \sqrt{C \cdot \lambda} \quad [J/m^2 K s^{1/2}] \quad (1)$$

där ett materials värmekonduktivitet (λ) [W/mK] multipliceras med dess volymteriska värmekapacitet (C) [$J/m^3 K$]. Den volymteriska värmekapaciteten beskrivs som en funktion av värmekapaciteten (c) samt densiteten (ρ) (Matsushima, 2018).

I tabell 2 visas några exempel på densiteten, värmekapaciteten samt värmetrögheten för olika material i en innervägg. Betong, tegel samt massivträ är exempel på material med mycket hög värmetröghet.

Tabell 2: Olika material i en innervägg sorterade uppifrån och ner från lägst till högst värmetröghet. Innehåll är formaterat efter Isover (Isover, 2011).

Material	Tjocklekar för mellanväggar [mm]	Densitet (ρ) [kg/m^3]	Värmekapacitet (c) [$J/kg^\circ C$]	Värmelagring (P) [$kJ/m^2 K$]
Gips	50	700	800	28
Lättbetong	100	600	1 050	63
Tegelblock	100	800	840	66
Massivträ	100	500	2 300	115
Tegel	120	1500	840	151
Betong	100	2400	880	211

För att få en uppfattning om värmetrögheten för ett material kan även tidskonstanten (τ) studeras, där ett högt värde på τ indikerar en hög värmetröghet. τ anges i timmar eller dygn och beskriver den tid det tar för inomhustemperaturen att minska 63% av temperaturdifferensen då utomhustemperaturen ändras. Tidskonstanten beräknas på så sätt att värmekapaciteten hos materialet i kontakt med inomhusluften divideras med de effektförluster som sker från byggnadens klimatskal. Ett högt värde på τ , och således en hög värmetröghet, erhålls alltså då materialet har hög värmekapacitet och låga effektförluster (Isover, 2011).

Den dimensionerade vintertemperaturen (DVUT) är ett annat begrepp som kopplar till termisk tröghet. DVUT-värdet är den lägsta temperatur som ska användas för effektförlustberäkningar och varierar dels med den geografiska placeringen men även med vilken tidskonstant byggnaden har. Det vill säga en högre tidskonstant, och därmed en högre värmetröghet leder till att man kan dimensionera för en lägre temperatur (Isover, 2011). I tabell 3 visas tidskonstanten för olika temperaturer anpassad till DVUT för Uppsala.

Tabell 3: DVUT för Uppsala (Boverket, 2017).

Tidskonstant τ (dygn)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DVUT ($^\circ C$)	-18,1	-17,3	-16,7	-16,1	-15,6	-15,3	-15,0	-14,8	-14,7	-14,5	-14,2	-14,0

En annan relevant aspekt för värmetrögheten är hur värmeflöden beter sig. Utomhus varierar såväl temperatur som solinstrålning och inomhus finns det varierande flöden från interna värmekällor i form av människor och apparater. Som syns i figur 2 så kommer den interna temperaturförändringen ha en fasförskjutning samt en reduktion av det maximala toppflödet i förhållande till den externa temperaturförändringen. Storleken på både fasförskjutningen och minskningen av toppflödet beror på de termofysiska egenskaperna hos materialet som byggnaden består av, men normalt ligger fasförskjutningen på ungefär 12h. Ett exempel på en mycket välisolerad byggnad med tung konstruktion samt ventilation med värmeåtervinning kan förväntas klarar en vecka med 0 °C utomhustemperatur utan behov av extra värme (Verbeke, Audenaert, 2018).

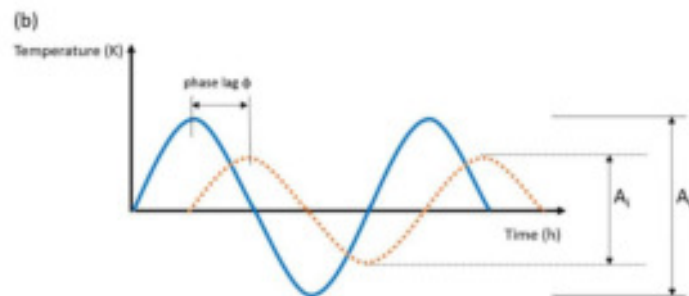


Fig. 2. Thermal response on a sinusoidal heat wave propagating through a wall.

Figur 2: Temperaturminskning samt fasförskjutning mellan utomhus och inomhustemperatur. Den blåa grafen representerar utomhustemperaturen och den orange-sträckande grafen inomhustemperaturen (Verbeke, Audenaert, 2018).

Byggnader med hög termisk massa är inte bara fördelaktigt för att upprätthålla en tillräcklig hög inomhustemperatur vid kalla utomhustemperaturer. Stor termisk massa, exempelvis betong eller tegel, är även fördelaktigt i de fall man strävar efter att undvika överhettning vid mycket varma utomhustemperaturer. I mellansäsonger, på exempelvis våren, kan termisk tröghet bidra till den grad att varken aktiv värme eller kyla behöver tillföras. Byggnaden har då en så kallad passiv temperaturstyrning (Verbeke, Audenaert, 2018).

Förutom att en värmetrög byggnad kan resultera i en minskad energianvändning så kan även effektbehovet, den tillförda värmen/kylan per tidsenhet, påverkas positivt (Svensk Betong, 2022b). Detta beror på att en värmetrög byggnad tar längre tid att värma upp under varma dagar och längre tid att kyla ned under kalla, vilket medför att effekttopparna kan kapas. Detta medför i sin tur kostnadsbesparingar om byggnaden är kopplad till fjärrvärme eller får värme via värmepump. En värmetrög byggnad kan också medföra minskade investerings- och driftkostnader då man tar hänsyn till byggnadens DVUT när distributionssystemet dimensioneras. Om distributionssystemet kan dimensioneras för en lägre DVUT krävs bland annat lägre framledningstemperatur till radiatorer (Svensk Betong, 2022b).

2.4.1 Utnyttjandegraden av värmetröghet

Det finns flera aspekter som påverkar den termiska massan och i förlängningen värmetrögheten för en byggnad. Det mest självklara är kanske byggnadens konstruktion i form av klimatskal och stomme, men även luftvolymen, möbler och andra objekt i byggnaden har en viss påverkan (Reilly och Kinnane, 2017). En överslagsräkning på värmekapaciteten, gjord i en studie av Reilly och Kinnane (2017), för de olika delarna i ett rum på 25 m² visar på att klimatskalet och stommen står för omkring 20 000 kJ/K, möbler och andra föremål i rummet för omkring 1 500 kJ/K och luftvolymen för omkring 75 kJ/K. Detta visar på att rumsluften och möbler i förhållandet till klimatskalet och stommen har relativt liten påverkan på byggnadens totala termiska egenskaper (Reilly och Kinnane, 2017).

I vilken grad värmetrögheten för två identiska byggnader placerade i olika klimat kommer kunna utnyttjas skiljer sig i mycket hög grad, och det är därför av hög relevans att ta hänsyn till detta då effekten av värmetröghet ska undersökas (Stevens et al., 2016).

2.5 Forskningsläge - värmetröghet

Generellt har mycket forskning kopplad till värmetröghet gjorts på bostäder, men både aktivitet i och användning av byggnaden skiljer sig mycket åt om man exempelvis jämför en enfamiljsvilla med en skola eller kontorslokal. Det har dock gjorts en del intressanta studier och simuleringar på kontorslokaler och en större kontorslokal kan, i stora drag, likställas med en skola eller förskola. Båda dessa har liknande tider för internvärme i form av människor och elektrisk utrustning samt har ingen aktivitet under kvällar, nätter, helger och helgdagar. Dessa typer av byggnader kan ha en större risk för överhettning, jämfört med bostadshus, då stor aktivitet av människor och elektronisk utrustning ofta sammanfaller med solinstrålning (Verbeke, Audenaert, 2018).

Verbeke och Audenaert (2018) har skrivit en rapport där de presenterar ett axplock av studier som har skrivits inom ämnet. Redan 1981 skrev Guglielmini et al. en artikel som pekade på att de goda effekterna av värmetröghet var mindre lämpade för offentliga byggnader då värmen som byggnaden absorberar kommer att frigöras under den del av dygnet (natten) då byggnaden står tom. Man kan dock argumentera för att fler och fler offentliga byggnader i framtiden kommer ha ett kylbehov på grund av klimatförändringar, och kylbehovet gynnas av precis den processen som är beskriven ovan då värmen i hög grad frigörs under natten och inte under dagen. Aste et al. (2009) menar dock i deras studie, där de analyserar kontorsbyggnader i olika klimat i Italien, att en minskning av kylbehovet endast har en markant skillnad för de byggnader där nattventilation finns, då dessa tillåter passiv kylning fullt ut.

En studie av Ståhl (2009) på kontorsbyggnader i Sverige visar på en minskning av både värme och kylbehov med 4% då en ökning av den termiska massan för stommen och tillämpningar av värmetröghet skedde. Orosa och Olivaire (2012) har undersökt två

skolbyggnader i Spanien med avseende på värmetröghet och deras resultat visade på att skolan med större termisk massa för stommen hade en högre överhettningrisk än de med en mindre termisk massa. Detta visar på att det finns många andra faktorer som kan påverka termiska klimatet, exempelvis vilken internvärme och solvärme som finns. En sammanslagning av de studier som Verbeke och Audenaert (2018) presenterar visar dock ändå på att en kontorsbyggnad/skola med en större termisk massa kommer ha en lägre energiförbrukning, även om de siffror det rör sig om är både relativt små och osäkra, framför allt i kallare klimat. De poängterar att en viktig aspekt för att kunna utnyttja den potentiella energivinsten är att ha bra kontroll på den interna värmen och ventilationen. De menar också på att en byggnad med stor termisk massa även dämpar temperaturfluktuationer och därmed bidrar till en ökad termisk komfort inomhus, samt att det finns ett exponentiellt samband mellan mängden termisk kapacitet och de interna dygnstemperaturfluktuationerna. Detta innebär att det finns en gräns för hur mycket termisk massa som har en faktisk effekt och att en stor termisk massa behöver längre tid för att nå önskad inomhustemperatur i de fall byggnaden används intermittent (Verbeke, Audenaert, 2018).

Heier et al. (2012) har i sin studie undersökt på vilket sätt en ökad termisk massa påverkar efterfrågan på rumsuppvärmning, effekt samt överhettning genom att jämföra två enfamiljshus i nordiskt klimat med olika isoleringar. De två studerade byggnaderna var ett hus från 1940 (med inre skuggning) samt ett nybyggt passivhus (med yttre skuggning samt nattventilation). Simuleringar av 40-talshuset visar på att en ökad termisk massa av ytterväggarna (10 cm betong på ytterväggens insida) skulle innebära ett minskat uppvärmningsbehov med cirka 1% samt att inomhustemperaturer över 24 °C skulle minskas med omkring 12%. Vid samma tillägg av betong för passivhuset visades en minskning av uppvärmning med 5% samt en minskning med nästan 20% för temperaturer över 24 °C (Heier, 2012).

Stevens et al. (2016) har gjort en studie där de undersöker hur stor påverkan värmetröghet har på värmebehov samt inomhusklimat för byggnader i kallt klimat. De har därför modellerat och simulerat ett typenligt bostadshus med klimat som om det skulle vara placerat i Alaska. I studien jämfördes sex olika konstruktioner av ytterväggar; ICF väggar (isolerande betongväggar), timmerväggar, två varianter av regelväggar med olika isolation (lättare konstruktioner) samt två varianter med olika tjocka betongväggar. Alla dessa konstruktioner anpassades dock till att ha samma U-värde för att en jämförelse lättare skulle kunna ske. Förutom detta jämfördes även två olika golvkonstruktioner, en lättare och en tyngre. Bostadshuset som simulerades i Alaskas klimat jämfördes även med ett bostadshus simulerat i New Mexicos klimat, det vill säga ett betydligt varmare samt ojämnare klimat. Resultatet visade på att de lättare väggkonstruktioner hade det största värmebehovet oavsett klimatzon men att skillnaden mellan konstruktionerna i det kalla Alaska klimatet var mycket liten, mindre än 1%. I det mer varmare och varierande klimatet i New Mexico däremot hade de olika väggkonstruktionerna upp till 20% skillnad i värmebehov. En jämförelse mellan de tyngre och de lättare konstruktionerna av ytterväggar i Alaskas klimat visade att de

skedde mindre temperaturfluktuationer i inomhusklimatet för de tyngre konstruktionerna jämfört med de lättare. Mest temperaturfluktuationer skedde för regelväggarna med glasfiber och cellulosaisolering och minst fluktuationer skedde för timmerväggen och den tjockaste varianten av betongvägg. För klimatet i New Mexico fanns det ett kylbehov på 603 kWh för att hålla temperaturen under den uppsatta gränsen på 27 °C då den tjockaste betongväggen samt den tyngre golvkonstruktionen simulerades. Detta kan jämföras med de 815 kWh som krävdes i simuleringen när regelvägg med fiberglas isolering samt den lättare golvkonstruktionen användes. Sammanfattningsvis kan man säga att det finns skillnader i värme- och kylbehov mellan de olika ytterväggkonstruktionerna i båda klimatzonerna som undersöks men att denna skillnad är betydlig i ett klimat med temperaturvariationer kring inomhus temperaturens börvärde och nästintill obetydlig i väldigt kallt eller subarktiskt klimat (Stevens et al., 2016).

Reilly och Kinnane (2017) har i en studie tittat på olika sätt att mäta effekten av termisk massa för energin till uppvärmning och kylning av en byggnad. De har studerat en del av en byggnad både i ett varmt och ett kallt klimat. Byggnaden i det varma klimatet var placerad i Madrid, Spanien och byggnaden i det kalla klimatet var placerad på norra Irland i Belfast. Resultatet av studien för byggnaden i det varma klimatet med stora dygnstemperaturvariationer går i linje med resultat från tidigare studier, där en ökad termisk massa skulle kunna leda till en betydande minskning av energibehovet. Resultatet av studien för byggnaden i det kalla klimatet där det finns ett övervägande värmebehov visar dock på att en ökad termisk massa till och med skulle kunna vara en nackdel utifrån ett energiperspektiv, men att fler studier i liknande klimat bör genomföras innan några säkra slutsatser kan dras. Reilly och Kinnane (2017) menar dock på att en ökad termisk massa kan vara fördelaktigt även i kallare klimat i de fall då det finns en uppvärmningsstrategi som innebär en stor mängd förvärmning. De visar också på att metoden att endast använda U-värden för att undersöka värmetröghet inte räcker till då även ordningen på lager inom en vägg har stor betydelse. En viktig aspekt är dock att denna studie endast tittar på värmeflöden och exempelvis inte inkluderar betydelsen av värmelagring i byggnader, så kallad "interseasonal heat storage", och detta gör att resultaten också bör tolkas med hänsyn till detta (Reilly och Kinnane, 2017).

2.6 Klimatpåverkan och livscykelanalys

År 2016 var utsläppen av växthusgaser omkring 21 miljoner ton från bygg- och fastighetssektorn, där 40% kom från byggverksamheten och 60% från fastighetsförvaltning. De inhemska utsläppen från dessa områden stod samma år för omkring 20% av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser. Trots att ett visst byggnadsmaterial kan vara mer gynnsamt än ett annat utifrån ett energiperspektiv i användningsfasen så är det viktigt att titta på materialfrågan utifrån ett större perspektiv. För att Sverige ska nå målet om nettonollutsläpp av växthusgaser till år 2045 så behöver

det ske en omställning i byggsektorn i alla faser, från produktion av byggmaterial till transport, byggskedet, användningsskedet och slutskedet (Svenskt betong, 2022c).

Livscykelanalys (LCA) är en metod för att beräkna miljöpåverkan under en produkts hela livscykel, från dess att naturresurser till produkten utvinns till dess att produkten inte används längre. Inom byggbranschen är detta en bra metod att använda för att se i vilken fas av byggnadens livsskede som klimatpåverkan är som störst. En byggnads livscykel kan delas in i olika skeden, byggskedet som inkluderar produktskede (A1-A3) samt byggproduktionsskede (A4-A5), användningsskede (B1-B7) och slutskede (C1-C4), dessa skeden och vad som inkluderas i varje skede visas i figur 3.

A1-5 Byggskede		
	A1	Råvaruförsörjning
A1-3 Produktskede	A2	Transport
	A3	Tillverkning
Byggproduktionsskede	A4	Transport
	A5	Bygg- och installationsprocess
	B1	Användning
	B2	Underhåll
B1-7 Användningsskede	B3	Reparation
	B4	Utbyte
	B5	Ombyggnad
	B6	Driftenergi
	B7	Driftens vattenanvändning
C1-4 Slutskedet	C2	Transport
	C3	Restproduktsbehandling
	C4	Bortskaffning

Figur 3: En byggnads livscykel uppdelad i olika skeden. Innehåll är formaterat efter Boverket (Boverket, 2019).

I en LCA så presenteras värden på utsläpp av växthusgaser som koldioxidekvivalenter (CO₂-ekv.). Detta görs för att man enkelt ska kunna jämföra olika aktivitetens utsläpp med varandra utan att man ska behöva ta hänsyn till alla olika former av utsläpp. För att de olika växthusgaserna ska vara jämförbara så multipliceras de olika växthusgaserna med en faktor som kallas global warming potential (GWP). GWP-värdet är alltså olika för olika växthusgaser då vissa gaser bidrar till växthuseffekten i högre grad än andra. Exempelvis så bidrar metan (metan/ton, utsläppt gas) 25 gånger mer till växthuseffekten än koldioxid (Boverket, 2021).

2.6.1 Forskningsöversikt - LCA av byggnadsmaterial

När det gäller material som exempelvis betong, massivträ och tegel, som har hög värmetröghet, har tidigare studier utförts för att undersöka hur användningen av dessa

material i byggnader påverkar klimatavtrycket ur ett livscykelperspektiv. Ett urplock av dessa studier presenteras nedan.

Ekvall (2006) har på uppdrag av Naturvårdsverket gjort en litteraturoversikt över studier som undersökt vilka miljöaspekter olika stommaterial medför. Den generella slutsatsen från de studerade studierna sammantaget är att trästommar leder till lägre koldioxidutsläpp än betongstommar. Men resultaten är mycket varierande, då det handlar om allt från någon enstaka procent till 20% skillnad. I en del av studierna är användningsfasen inte inkluderad eller så har användningsfasen ansetts vara identiskt mellan byggnaderna, och i de fall då användningsfasen faktiskt inkluderas så är skillnaderna små. Utifrån detta drar Ekvall slutsatsen att materialval för olika byggnaders stommar anses vara av relativt liten relevans för hur mycket koldioxidutsläpp som sker i användningsfasen. Det är dock av relevans att nämna att i de fall då användningsfasen är inkluderad så står denna fas för en stor del av miljöbelastningen. Vid studier som analyserar ett material utifrån ett LCA-perspektiv är det mycket viktigt att det är tydligt vilka avgränsningar som har gjorts. Har man tagit hänsyn till den tillfälliga lagring av kol som sker under trähusets användningsfas så bör man också ta hänsyn till den koldioxid som släpps ut då byggnadsmaterialet eldas upp eller bryts ned efter användning. Dessa avgränsningar skiljer sig mellan studierna och gör det därför svårt att göra en helt rättvis jämförelse. Detsamma gäller vid kalcinering vid cementproduktion respektive den karbonatisering som sker under byggnadens livstid. För stålstommar påverkas resultatet mycket beroende på om stommarna är gjorda av malmbaserat eller skrotbaserat stål.

Erlandsson et al. (2018) har genomfört ett projekt där de beräknade klimatpåverkan ur ett livscykelperspektiv för ett referensflerbostadshus uppbyggt på 5 olika sätt. Byggnaden som det rör sig om är uppbyggd på följande sätt: Platsgjuten betongstomme, platsgjuten betongstomme med väggar i trä och stål, prefabricerad betongstomme, volymelement i trä samt massiv stomme i KL-trä. Denna studie visar att även byggskedet, precis som användningsskedet, står för en stor del av en byggnads klimatpåverkan, upp mot 50–60% under en livscykel. Men den visar också på att det finns mer klimatsnåla alternativ oavsett om byggandet sker med trä eller betong. Det värde som sticker ut från studien är att byggkonstruktioner av betong har en betydligt högre klimatpåverkan i produkt skedet jämfört med andra material.

Liljenström et al. (2014) har i sin studie studerat klimatpåverkan och energianvändning under byggprocessen och driftskedet för ett nybyggt flerbostadshus i Stockholm. Huset har lågenergiprofil och består till stor del av betong då både stomme och ytterväggar består av betong. Deras resultat visar på att vid en analysperiod på 50 år står byggprocessen och energianvändningen i driftskedet för en storleksmässigt liknande klimatpåverkan, och tillsammans står de för majoriteten av klimatpåverkan under livscykeln. Hur stor det procentuella bidraget för klimatpåverkan är för respektive skede beror till stor del på vilka antagande som gjorts angående el- och värmemix, i detta fall fjärrvärme. Vid antaganden om en el- och fjärrvärmemix med en stor del förnybara

bränslen så står byggprocessen för en större procentuell del jämfört med energianvändningen i driftskedet. I studien beräknas även klimatpåverkan för modul B2, B4, B5 samt C, alltså underhåll, utbyte, renovering samt slutskedet. Dessa moduler har tillsammans en klimatpåverkan i samma storleksordning, eller mindre, som driftskedet beroende på hur el- och fjärrvärmemix har valts (Liljenström et al., 2014).

I samma studie (Liljenström et al., 2014) har också jämförelser med andra byggnader gjorts. Exempelvis så jämförs betonghuset med två olika byggnader där ytterväggarna har bytts ut till lätta träytterväggar, där den ena byggnaden är ett passivhus och den andra är en byggnad med energiförbrukning som uppfyller Boverkets byggregler (BBR kraven). Resultatet visar på att husen med träytterväggar har en något minskad klimatpåverkan, men eftersom stora delar av dessa byggnader fortfarande består av betong så är det inte en markant skillnad. Vad det gäller energianvändningen i driftskedet så visar resultatet inte helt oväntat att BBR-huset med träväggar har den högsta energianvändningen och att passivhuset har den lägsta.

3. Metod

3.1 Energisimulering och LCA

Nedan presenteras de verktyg som användes för att genomföra energiberäkningar och analysera klimatpåverkan.

3.1.1 IDA ICE

För att kunna simulera hur olika byggnadsmaterial kommer att påverka värme- och kylbehovet har en modell i programvaran IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) använts. För att kunna genomföra simuleringar har en förskola valts som studieobjekt, en IDA ICE modell av den valda förskolan erhöles från Ramboll. Ramboll är ett konsultföretag som har genomfört energiberäkningar för Rosendal förskola på uppdrag av Uppsala kommun Skolfastigheter AB. IDA ICE är ett simuleringsverktyg som används för att simulera energianvändning och klimatberäkningar i byggnader genom att implementera byggnadens konstruktion samt modellera alltifrån VVS- system, styr- och regelsystem till internlasten för att få en bild av byggnaden som ligger så nära verkligheten som möjligt. Specifikt har modulen IDA ICE Building använts. I denna modul simuleras en byggnad samt en energicentral.

I IDA ICE genomfördes en ”Energy” simulation för varje scenario där data för värmebehov samt kylbehov kunde läsas av. För scenarierna då de simulerades utan kylsystem genomfördes en ”Custom” simulation. Från denna simulation erhöles grafer och tabeller över temperaturen (operativ- och lufttemperatur) på en årsperiod för respektive rum i byggnaden. Eftersom den operativa temperaturen är den som är mest

relevant för den upplevda temperaturen i rummet var det denna som analyserades. Temperaturfilerna kunde därefter extraheras från IDA ICE och bearbetas i Excel.

För de flesta materialskikt har standardvärden som finns i databasen i IDA ICE använts. I vissa fall finns det dock icke homogena skikt i konstruktionerna. Detta gäller i de fall då det finns konstruktionslösningar som består av regel samt isoleringsmaterial. Materialegenskaper i form av värmeledningsförmåga, densitet samt specifik värmekapacitet har för dessa skikt räknats ut för hand. Ekvationer som visar hur detta har räknats ut finns i bilaga B.

3.1.2 LCA

Studien omfattar även en förenklad livscykelanalys där klimatpåverkan för olika byggnadsmaterial i produktskedet (A1-A3) samt det största bidraget till användningsskedet, det vill säga modul B1 ”Användning” studeras. Produktskedet omfattar produktion av byggprodukter och andra resurser som kommer att användas. Användningsskedet omfattar användning, underhåll, reparationer och drift av byggnaden, men där denna analys endast omfattar användning (Boverket, 2019). Avgränsningen att fokusera på dessa två steg har gjorts för att dessa två faser har setts ha störst bidrag till klimatpåverkan i en byggnadscykel.

Livscykelanalysen genomfördes med hjälp av programvaran One Click LCA. One Click LCA är ett väletablerat verktyg för att mäta miljöpåverkan i bland annat byggprojekt, och mäter klimatpåverkan i materialtillverkning, transport, konstruktion, underhåll och renovering, energibehov, vattenbehov samt slutskedet vid nedmontering. Vid val av implementering av material har standardvärden från One Click LCA valts. Fjärrvärmens har antagits komma från Uppsala och Vattenfall AB och livslängden för bygganden har satts till 50 år.

3.2 Fallstudiebeskrivning

Rosendal förskola 2 är en planerad nybyggnation i Uppsala kommun som ägs och förvaltas av Uppsala Kommun Skolfastigheter AB. Förskolan innefattar 8 avdelningar, personalutrymmen, storkök och teknikutrymmen. Byggnaden är i två plan med en uppvärmd area (A_{temp}) på $1749 m^2$. I figur 4 visas en bild på hur förskolan är uppbyggd i IDA ICE.



Figur 4: Energimodell av Rosendal förskola 2 i IDA ICE 4.8

Byggnaden är simulerad i IDA ICE med tillförsel av värme från fjärrvärme samt med ett kylsystem. Kylsystemet kan ses som en fristående AC som finns i samtliga rum. Det ska dock observeras att kylsystem inte är planerat att finnas på förskolan i praktiken. I en del av simuleringen har även kylsystemet plockats bort för att kunna simulera överhettning och se hur de olika materialen hanterar värme. Rosendals förskola är modellerad utifrån att värmesystemet ska verka då temperaturen understiger 22 °C för de allra flesta utrymmen, undantagen är fläktrum, kök, diskrum och liknande utrymmen. När kylsystemet är inkluderat i modellen ska detta starta då inomhustemperaturen överstiger 26°C.

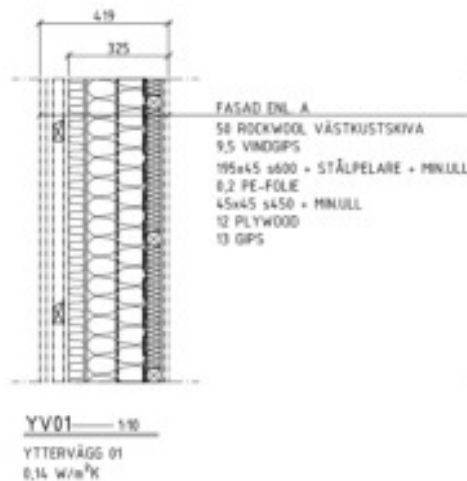
För att erhålla utomhustemperaturer som stämmer med förskolans tänka geografiska placering har en klimatfil för Uppsalas klimat använts. Schema för personaktivitet samt aktivitet för elektrisk utrustning användes och var inställt på 6h, 5 dagar i veckan under 47 veckor. Klimatfilen samt aktivitetsschema var inställningar som redan var gjorda för den IDA ICE modellen som användes.

3.3 Material referensmodell

Referensmodellen som använts som jämförelsemodell är den modell som har erhållits från Ramboll. Ramboll har byggt upp en modell baserat på information om hur den färdiga förskolan ska se ut där såväl uppvärmningssystem, ventilationssystem, internlast och material har tagits i beaktning. Nedan beskrivs materialen för byggnadskonstruktionerna för referensmodellen.

3.3.1 Yttervägg

Ytterväggarna är från insidan och ut uppbyggda av gips, plywoodskiva, regel med isolation (mineralull), gips samt ytterligare isolation i form av en isoleringsskiva. Denna uppbyggnad resulterar i ett U-värde på 0,14 W/m^2K . I figur 5 visas en schematisk bild av hur ytterväggarna är uppbyggda.



Figur 5: Uppbyggnad av ytterväggen i grundmodelleringen

3.3.2 Mellanbjälklag

Mellanbjälklaget är den del av husets stomme som skiljer två våningsplan åt. Dess funktion är att vara lastbärande men även ljud- och brandavskiljande. Mellanbjälklaget för referensmodellen består av isolering och betong, varav 100 mm lättbetong samt 110 mm betong.

3.4 Alternativa konstruktionslösningar för yttervägg och mellanbjälklag

Vid simulering har begränsningar gällande konstruktion och material gjorts vilket landade i 12 olika kombinationer av material för ytterväggar samt bjälklag. De material som initialt undersöktes var massivt trä, betong samt tegel. Dessa material är intressanta att studera just utifrån deras höga värmetröghet, och har därför valts för simulering av ytterväggar. För simuleringar av mellanbjälklag är vissa av dessa material dock inte lika naturligt att använda eftersom de inte är material som i praktiken används, exempelvis används inte tegel i mellanbjälklag. För mellanbjälklag har det därför valts att simulera en variant med KL-träbjälklag, alltså massivt trä, samt en variant med lättare trä. Valet av konstruktioner av mellanbjälklag gjordes alltså dels med hänsyn till vilka som är de dominerande konstruktioner i praktiken men även med hänsyn till att de är material med en relativt hög värmetröghet. Referensmodellen av bjälklag använder sig av en konstruktion med betong och därför har inte en ytterligare simulering med detta material varit nödvändigt att göra. Mer information om dessa materials egenskaper går att läsa i bilaga A.

För att simulera byggnadsmaterial uppbyggda på ett branschmässigt och korrekt sätt har företagets Isovers förslag på hur de olika byggnadsdelarna bör byggas upp använts. Isover är ett ledande företag inom isoleringslösningar och är en del av den franska koncernen Saint-Gobain som designar, tillverkar och distribuerar byggmaterial (Isover, 2022). Isovers förslag har använts som en grund med justeringar för vissa delar för att

erhålla samma U-värde för de olika konstruktionerna. Att de olika konstruktionerna har samma U-värde är nödvändigt för att behålla samma värmeförluster som finns i byggdelarna i referensmodellen och på så sätt tydligare kunna undersöka potentialen för materialens värmetröghet att påverka energibehovet i byggnaden. Generella värden på materialegenskaper för isolering (glasull) har använts i stället för Isovers förslag på isolering av olika typer av glasull för en ökad generaliserbarhet.

3.4.1 Yttervägg av KL-trä

Konstruktionen har ett U-värde på $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ och en isoleringstjocklek samt väggstjocklek på 195 respektive 403 mm. Konstruktionen består av sammanlagt 145 mm massiv trästomme och isolering av glasull (Isover, 2022). I tabell 4 visas uppbyggnaden av ytterväggen utifrån respektive materials tjocklek och värmeledningsförmåga.

Tabell 4: KL-trävägg med ventilerad träfasad, materialen presenteras från insidan och ut.

Material	Tjocklek [mm]	λ [W/mK]
Gips	13	0,22
Träregel c600, glasull	95	0,038
Massiv trästomme	145	0,14
Glasull	100	0,03
Luftspalt	28	0,39
Träpanel	22	0,14

3.4.2 Yttervägg av betong

Konstruktionen har ett U-värde på $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ och en isoleringstjocklek samt väggstjocklek på 150 respektive 515 mm (Isover, 2022). Betongen som används är en typ av lättbetong. I tabell 5 visas ytterväggens uppbyggnad.

Tabell 5: Lättbetongvägg med oventilerad putsfasad, materialen presenteras från insidan och ut.

Material	Tjocklek [mm]	λ [W/mK]
Betong	365	0,15
Glasull	150	0,03

3.4.3 Yttervägg av träregel med tegelfasad

Konstruktionen har enligt Isovers modell ett U-värde på $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ och en isoleringstjocklek samt väggstjocklek på 360 respektive 524 mm (Isover, 2022). Konstruktionen har justerats så att samma U-värde som de andra ytterväggarna har erhållits. Justeringar har skett genom att minska ned tjockleken på isoleringen till 225 mm. I tabell 6 visas uppbyggnaden av ytterväggen.

Tabell 6: Träregelvägg med tegelfasad, materialen presenteras från insidan och ut.

Material	Tjocklek [mm]	λ [W/mK]
Gipsskiva	13	0,22
Träregel c600, glasull	120	0,038
Glasull	105	0,03
Luftspalt	20	0,25
Tegel	120	0,58

3.4.4 Mellanbjälklag

De olika konstruktionerna från Isover respektive referensmodellen skilde sig initialt i U-värde relativt mycket. Jag valde därför att justera konstruktionerna med det högsta samt lägsta U-värdet, vilket var KL-träbjälklaget samt referensmodellen i betong. Efter justeringen har alla konstruktioner ett U-värde på eller mycket nära $0,267$.

Referensmodellen i betong hade ett mycket högt U-värde ($2,385 \text{ W/m}^2\text{K}$) så till denna konstruktion lades mer isolering till. Konstruktionen med massivt träbjälklag hade ett U-värde på $0,1611 \text{ W/m}^2\text{K}$ så detta värde höjdes något genom att minska något på tjockleken av träskivan, ta bort isolation samt minska på luftgapet i konstruktionen (Isover, 2022).

3.4.5 Mellanbjälklag av Massivt trä

Denna konstruktion är lite mer komplex än de föregående då den även innehåller icke homogena sikt. Beräkning av materialegenskaper har gjorts för skiktet som består av träregel och isolering. Detta har beräknats ut enligt ekvationer i bilaga B.

Konstruktionen har förenklats något i sin utformning i jämförelse med konstruktionen från Isover. Uppbyggnaden av mellanbjälklaget visas i tabell 7.

Tabell 7: Uppbyggnad av KL-träbjälklag, materialens respektive tjocklek och värmeledningsförmåga.

Material	Tjocklek [mm]	λ [W/mK]
Massivt trä	80	0,14
Träregel cc225, glasull	50	0,074
Luftspalt	20	0,25
Träregel cc1200, glasull	70	0,034
Luftspalt	20	0,25
Gipsskiva	18	0,22

3.4.6 Mellanbjälklag av trä

Denna konstruktion har vid applicering i IDA ICE ett U-värde på $0,267 \text{ W/m}^2\text{K}$. Konstruktionen innehåller ett 170 mm materialskikt i form av luftspalt och en träbalk. I tabell 8 visas uppbyggnaden av mellanbjälklaget.

Tabell 8: Uppbyggnad av träbjälklag, materialens respektive tjocklek och värmeledningsförmåga (Isover, 2022).

Material	Tjocklek [mm]	λ [W/mK]
Gipsskiva	26	0,22
Isolering, glasull	15	0,03
Spånskiva	22	0,13
Luftspalt + träbalk	170	1,41
Träregel c600, glasull	95	0,038
Luftspalt	28	0,39
Gipsskiva	26	0,22

3.5 Sammanställning av konstruktionslösningar

I tabell 9 visas en sammanställning av samtliga kombinationer av konstruktionslösningar som har undersökts för ytterväggar och mellanbjälklag. U-värde för samtliga ytterväggar är $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ och för samtliga mellanbjälklag $0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabell 9: Sammanställning av de olika scenariernas konstruktionslösningar.

Scenario	Yttervägg	Mellanbjälklag
0 (Referens)	Referens yttervägg	Referens (betong) bjälklag
1	Referens yttervägg	Massivträbjälklag
2	Referens yttervägg	Träbjälklag
3	KL-träyttervägg	Referens (betong) bjälklag
4	KL-träyttervägg	Massivträbjälklag
5	KL-träyttervägg	Träbjälklag
6	Betongyttervägg	Referens (betong) bjälklag
7	Betongyttervägg	Massivträbjälklag
8	Betongyttervägg	Träbjälklag
9	Tegelyttervägg	Referens (betong) bjälklag
10	Tegelyttervägg	Massivträbjälklag
11	Tegelyttervägg	Träbjälklag

4. Resultat och analys

4.1 Energianvändning

För att se vilken påverkan de olika materialvalen för yttervägg respektive mellanbjälklag har för värmeförbrukningen gjordes en jämförelse mellan samtliga scenarier av olika konstruktionslösningar och referensmodellen genom simuleringar i IDA ICE. Referensmodellens komponenter benämns som: referensyttervägg (bestående av gips, plywoodskiva och isolation) samt mellanbjälklag av betong. Det är denna konstruktion som de andra konstruktionerna genomgående kommer att jämföras med. I tabell 10 visas de 11 olika materialkombinationerna samt referensmodellen (0) och byggnadens värmebehov samt ökning/minskning av detta i förhållande till referensmodellen för respektive scenario.

Tabell 10: Materialkombinationerna och dess värmebehov samt ökning/minskning av detta i förhållande till referensmodellen

Material	Scenario numer	Värmebehov (Fjvm.) [kWh]	Skillnad i värmebehov (fjvm.) jmf med referensscenario [kWh]	Skillnad i fjvm. jmf med referensscenario [%]
Referens yttervägg, referens (betong) bjälklag	0	88 907	0	0
Referens yttervägg, massivträbjälklag	1	89 139	232	+ 0,3 %
Referens yttervägg, träbjälklag	2	89 116	209	+ 0,2 %
KL-träyttervägg, betongbjälklag	3	88 369	-538	- 0,6 %
KL-träyttervägg, massivträbjälklag,	4	88 763	-144	- 0,2 %
KL-träyttervägg, träbjälklag	5	88 734	-173	- 0,2 %
Betongyttervägg, betongbjälklag	6	88 766	-141	- 0,2 %
Betongyttervägg, massivträbjälklag	7	88 688	-219	- 0,2 %
Betongyttervägg, träbjälklag	8	88 700	-207	- 0,2 %
Tegelyttervägg, betongbjälklag	9	88 878	-29	- 0,03 %
Tegelyttervägg, massivträbjälklag	10	89 139	232	+ 0,3 %
Tegelyttervägg, träbjälklag	11	89 321	419	+ 0,5 %

I tabellen framgår det att värmebehovet (fjärrvärmeförbrukningen) skiljer sig relativt lite mellan de olika konstruktionerna, som mest handlar det om omkring 500 kWh/år. Om man sätter detta i relation till den totala värmeförbrukningen för referensbygganden på omkring 89 000 kWh/år så visas det att det handlar om relativt små insparningar/ökningar av värmeförbrukning, som mest en minskning på omkring 0,6% per år. Samtliga material för yttervägg samt mellanbjälklag som har undersökts är värmetröga material och även material för referensmodellen består av byggnadsdelar som är värmetröga, speciellt mellanbjälklaget som består av betong. Det betyder att det med all sannolikhet hade uppvisats större skillnader om en jämförelse i stället hade skett mellan material med en större variation av värmetröga egenskaper. Men då arbetets fokus ligger på att jämföra just värmetröga material så var det inte aktuellt att undersöka. En annan viktig aspekt att tänka på när resultatet tolkas är att ändringarna i material endast

sker för yttervägg respektive mellanbjälklag, och de är såklart mer än dessa komponenter som påverkar en byggnads totala värmetröghet. Materialval på andra byggnadsdelar som tak, golv och innerväggar har även dessa en påverkan på hur värmetrög byggnaden är i sin helhet. Att inkludera samtliga byggnadsdelar fick inte plats inom ramen för detta arbete, och därför har de byggnadsdelar som troligen har störst påverkan på värmetrögheten valts ut att studera.

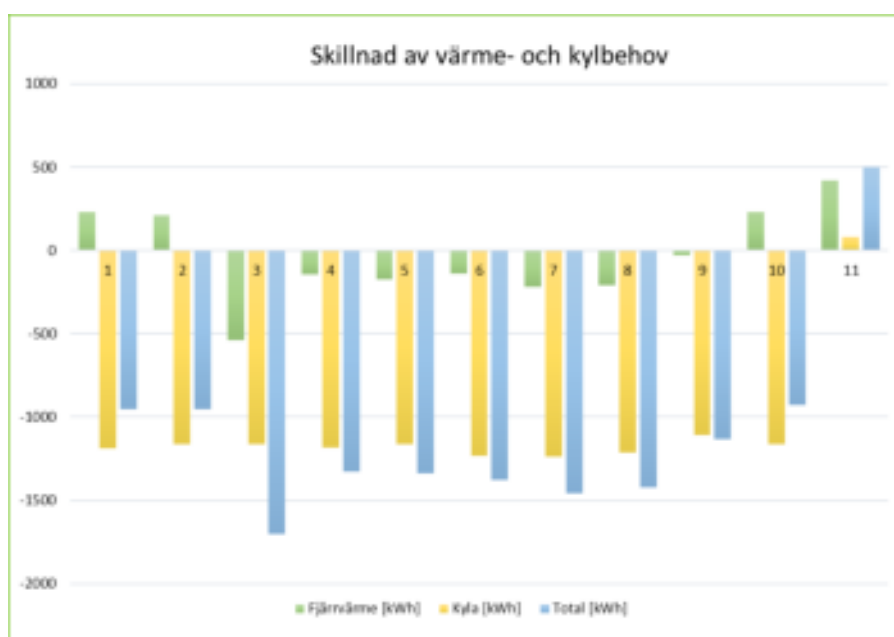
Tabell 11 har samma uppbyggnad som tabell 10 men visar i stället kylbehovet för samtliga scenarion.

Tabell 11: Materialkombinationerna och dess energibehov för kyla samt ökning/minskning av detta i förhållande till referensmodellen

Material	Scenario numer	Kylbehov [kWh]	Skillnad i kylbehov jmf med referensscenario [kWh]	Skillnad i kylbehov jmf med referensscenario [%]
Referens yttervägg, referens (betong) bjälklag	0	19 737	0	0
Referens yttervägg, massivträbjälklag	1	18 550	-1187	- 6,0 %
Referens yttervägg, träbjälklag	2	18 577	-1160	- 5,9 %
KL-träyttervägg, betongbjälklag	3	18 575	-1162	- 5,9 %
KL-träyttervägg, massivträbjälklag,	4	18 555	-1182	- 6,0 %
KL-träyttervägg, träbjälklag	5	18 574	-1163	- 5,9 %
Betongyttervägg, betongbjälklag	6	18 503	-1234	- 6,3 %
Betongyttervägg, massivträbjälklag	7	18 499	-1238	- 6,3 %
Betongyttervägg, träbjälklag	8	18 523	-1214	- 6,2 %
Tegelyttervägg, betongbjälklag	9	18 632	-1105	- 5,6 %
Tegelyttervägg, massivträbjälklag	10	18 576	-1161	- 5,9 %
Tegelyttervägg, träbjälklag	11	19 818	81	+ 0,4 %

Utifrån tabell 11 framgår det att samtliga kombinationer, med undantag för kombination 11 (tegelyttervägg och träbjälklag), hade ett mindre simulerat kylbehov. Procentuellt motsvarar den största minskningen av kylbehov omkring 6%. Det minskade kylbehovet var relativt lika storleksmässigt för samtliga kombinationer, och även de konstruktioner som hade ett ökat värmebehov har ett minskat kylbehov.

De olika scenariernas minskning/ökning av värme- och kylbehov i förhållande till referensmodellen visas även upp som ett stapeldiagram i figur 6. Den gröna stapeln står för minskad/ökad förbrukning av fjärrvärme, den gula stapeln står för minskad/ökad förbrukning av kyla och den blåa stapeln står för den totala ökningen eller minskningen av energi för både värme och kyla.

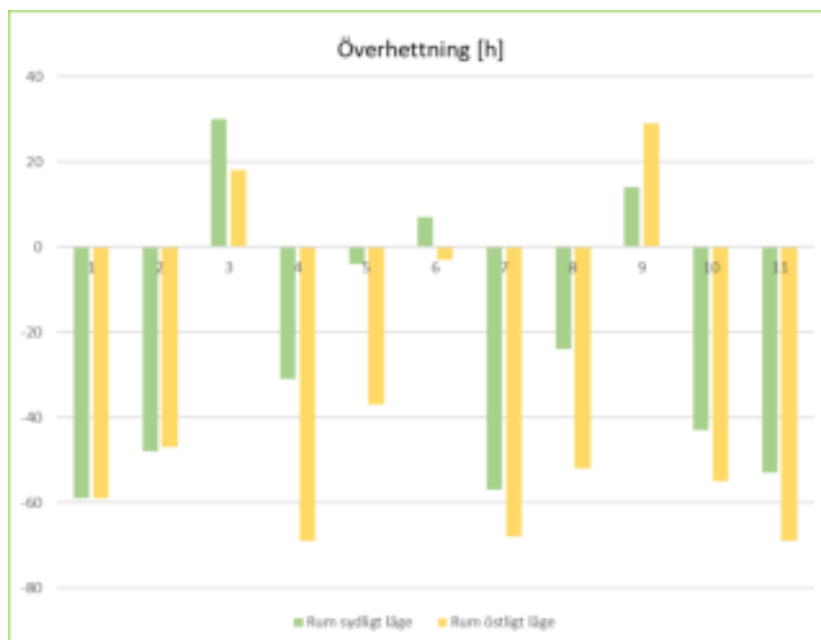


Figur 6: Skillnader i fjärrvärmeförbrukning, förbrukning av kyla samt nettovärde av båda dessa i förhållande till referensbyggnaden. Negativa värden visar energibesparing och positiva värden visar ökning av energianvändning i förhållande till referensbyggnaden.

Det scenario som sticker ut något utifrån ett minskat uppvärmningsbehov från figur 6 är scenario 3, vilket består av KL-träyttervägg samt betongbjälklag. Faktum är att samtliga scenarier med yttervägg av KL-trä eller betong har en minskad värmeförbrukning. Detta är inget oväntat resultat då båda dessa material har en hög värmetröghet. De materialkombinationer som i stället hade en ökad förbrukning av fjärrvärme var de kombinationer som består av referensyttervägg och tegelyttervägg men antingen massivträbjälklag eller träbjälklag. Detta tyder på att referensytterväggen samt yttervägg av tegel verkar vara ett något sämre alternativ än yttervägg av KL-trä eller betong ur ett värmetröghetsperspektiv, vilket i det här fallet innebär att bibehålla och tillföra värme till inomhusmiljön.

4.2 Överhettning

De olika materialkombinationerna modellerades även i IDA ICE utan kyla för att få en uppfattning om hur de klarar av att hantera varma utomhustemperaturer och stark solinstrålning. Det ska dock observeras att i den IDA ICE modell som används så finns det inget passivt kylsystem när det aktiva kylsystemet har tagits bort. Passiva kylsystem som exempelvis solskydd kommer dock troligtvis att användas för den fysiska skolan och därför ska dessa siffror från modelleringen ses som extremvärden, och inte förväntade överhettningstimmar i verkligheten. Detta har dock ingen direkt påverkan för analysen då den endast fokuserar på jämförelse av material. Tvärtom är det en fördel att i denna analys kunna titta på extrema fall, när man inte utnyttjar någon kyla alls, för att få en bättre förståelse för vilka material som gör det möjligt att utnyttja värmetrögheten för kyla. I figur 7 visas de 11 olika materialkombinationerna och antal timmar med en ökad alternativt minskad överhettning, temperatur över 26 °C, i jämförelse med referensmodellen. Två rum har valts ut för att studera överhettning, ett rum i sydligt läge och ett rum i östligt läge. Den gröna stapeln visar skillnad i överhettningstimmar för rummet som ligger i söderläge. Eftersom det ligger i sydligt läge är det ett av de rum i byggnaden som utsätts för mest solinstrålning. Den gula stapeln visar skillnad i överhettningstimmar för rummet som ligger i östligt läge. Eftersom detta rum ligger i östligt läge har det något färre överhettningstimmar än rummet i sydligt läge.



Figur 7: Överhettning i två rum för de olika materialkombinationerna i förhållande till referensbyggnaden. Positiva värden betyder att det har skett en ökning av överhettningstimmar och negativa värden visar på en minskning av överhettningstimmar.

Grafen visar på att många av materialkombinationerna har färre överhettningstimmar än referensmodellen. Undantagen är kombination 3, 6 samt 9. Vilka består av: KL-trättervägg med betongbjälklag, betongyttervägg med betongbjälklag samt tegelyttervägg med betongbjälklag. Den gemensamma faktorn för dessa är att alla består av betongbjälklag, precis som referensmodellen också gör. Detta visar på att mellanbjälklag av betong inte är ett optimalt val för att hålla en byggnad sval. De andra materialkombinationerna ligger på en ungefärlig liknande nivå av överhettningstimmar, vilket visar på att bortsett från mellanbjälklag av betong har materialval för yttervägg samt mellanbjälklag mindre påverkan för överhettning i byggnaden. Minskningen av överhettningstimmar ligger som mest kring 70 h. Detta motsvarar i förhållande till den totala mängden överhettningstimmar en minskning på omkring 6%.

Om man analyserar de olika scenarierna på en mer detaljerad nivå än på årsbasis så ser man att det, inte helt oväntat, är under de varmaste sommarmånaderna (juni, juli och augusti) som den största skillnaden i överhettningen mellan de olika scenarierna sker. En analys över hur inomhustemperaturen varierar under dagen visar att den största temperaturskillnaden mellan olika scenarier sker vid 12–14 tiden, vilket sammanfaller med tidpunkten där man förväntas ha de högsta utomhustemperaturerna samt starkast solinstrålning. I vissa fall skulle en förklaring till överhettning kunna vara att det exempelvis finns ett uppvärmningsbehov i början av dagen men inte senare på dagen, men att den tidigare tillförda värmen ackumuleras i bygganden under hela dagen och skapar därmed ett överskott av värme. Detta fenomen kan även till viss del ses i denna studie men då den mesta överhettningen jämförelsevis sker under varma sommardagar då det inte finns något uppvärmningsbehov alls så vekar detta inte vara en huvudorsak.

Generellt så är det störst skillnad i överhettningstimmar för rummet beläget i östlig riktning jämfört med det beläget i sydlig riktning. Detta är en intressant aspekt då det pekar på att materialvalet har en något större betydelse för inomhustemperaturen för ett rum som är något mindre exponerat för solljus. En förklaring till detta skulle kunna vara att ett rum som är något mindre exponerat för solljus oftare ligger på temperaturer nära eller precis över 26°C under varma dagar och att olika material kan hantera detta olika bra genom att ackumulera värme i byggnadsmaterialet bättre eller sämre. Medan för det mer solexponerade rummet kanske temperaturer ofta ligger en bra bit över 26 °C och ingen av materialen kan klara av att reglera detta till en inomhustemperatur under 26°C utan hjälp av kylsystem.

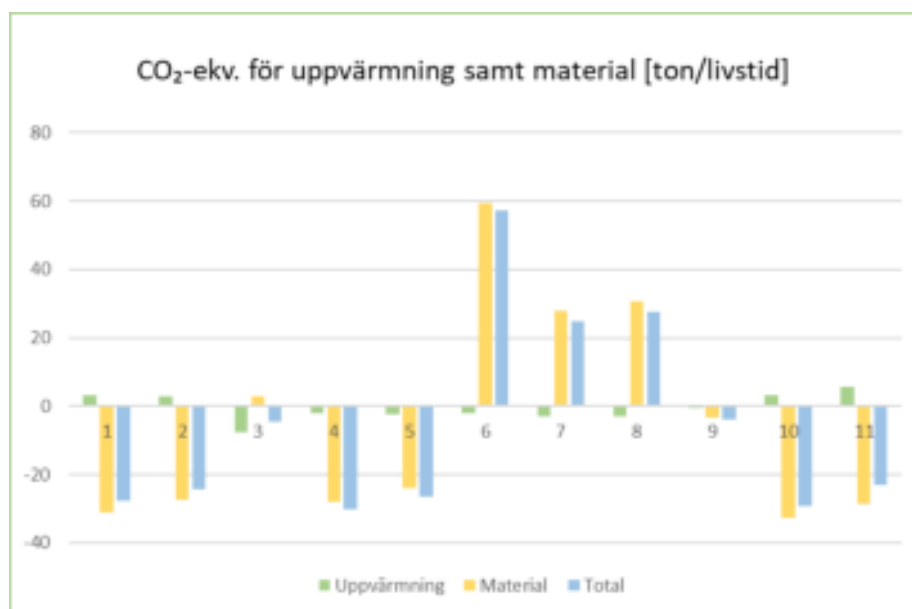
Det faktum att kylbehovet för samtliga scenarier är relativt lika medan det, i jämförelse, skiljer mer i överhettningstimmar mellan scenarierna känns vid första anblick inte så intuitivt. En förklaring till detta fenomen skulle kunna vara att eftersom överhettningstimmar är simulerade utan kyla så kan byggnaden i vissa fall uppnå mycket höga temperaturer, en bra bit över 26 °C. Det tar då (olika) lång tid för byggnaden att komma ned i temperaturer under 26 °C beroende på vilket material byggnaden är uppbyggd av. När byggnaden i stället är simulerad med kylsystem så finns det en del överhettningstimmar precis över 26 °C, innan kylsystemet hinner

reglera temperaturen. Däremot så nås aldrig de extremt varma temperaturerna eftersom kylsystemet hinner reglerar för dessa.

Det går att se ett visst samband mellan ett minskat/ökat värmebehov samt få eller fler överhettningstimmar för de olika konstruktionerna i jämförelse med referensmodellen. Om man exempelvis studerar scenario 3 som är den konstruktion som i jämförelsevis med referensmodellen har minst värmeförbrukning så ser man att denna konstruktion även har en förhållandevis stor mängd överhettningstimmar. För scenarion som har en större värmeförbrukning, exempelvis scenario 1 eller 11 så är dessa två av de konstruktionerna med minst överhettningstimmar. Detta samband gäller för majoriteten av konstruktionerna men inte för samtliga, så därför är det inte möjligt att till fullo dra slutsatsen att det skulle finnas en korrelation mellan högre värmebehov och mindre överhettningstimmar.

4.3 LCA

I den här delen av resultatet presenteras de olika materialens påverkan på klimatavtrycket genom vilka utsläpp de medför, presenterat som koldioxidekvivalenter. Precis som i föregående avsnitt presenteras resultatet som en jämförelse med referensmodellen. I figur 8 visas minskningen eller ökningen av koldioxidekvivalenter för uppvärmning samt för materialframställningen i jämförelse med den ursprungliga modellen. Även den totala ökningen eller minskningen av dessa värden visas. Värdena för uppvärmning i modellen är baserade på en byggnads livstid, som antogs vara 50 år, samt att uppvärmning sker med fjärrvärme från Uppsala.



Figur 8: Jämförelse av CO₂-ekv. för fjärrvärme, materialtillverkning och totalt för de olika materialkombinationerna i förhållande till referensbyggnaden. Negativa värden innebär en minskning av koldioxidekvivalenter och positiva värden visar en ökning av koldioxidekvivalenter i förhållande till referensbyggnaden.

Denna figur är till viss del korrelerad med figur 6 som visar ökning eller minskning av fjärrvärme. Det kan därför även från denna figur utläsas att skillnaden i utsläpp kopplat till uppvärmning för de olika scenarierna jämfört med referensscenariot är relativt försumbart. Den totala koldioxidekvivalenten för byggnadens fjärrvärme för referensscenariot ligger på omkring 1 245 ton under en 50 års livslängd, vilket motsvarar 0,7 ton CO₂-ekv. /m². Det betyder att ett val på exempelvis materialkombination 3 i stället för referensmodellen skulle medföra en procentuell minskning av CO₂-ekv. utsläpp från fjärrvärme med omkring 0,6 %. Denna minskning motsvarar endast drygt ett kvartals års utsläpp från den totala uppvärmningen för referensbyggnaden. Resultat ska inte helt och hållet negligeras, men det finns andra delar som är mer avgörande ur ett klimatperspektiv och därför bör prioriteras.

Det uppvisas däremot en större skillnad i utsläpp för de olika scenarierna kopplat till dess klimatpåverkan vid framställning av de olika materialen. De materialkombinationer som ger ett ökat utsläpp i jämförelse med referensmodellen är kombination 6,7 och 8. Dessa scenarier har gemensamt att de består av betongyttervägg med olika material för bjälklag (i form av betong, massivt trä samt träbjälklag). Många av de övriga scenarierna ligger på omkring 20–30 ton mindre CO₂-ekv. utsläpp i jämförelse med referensmodellen. I jämförelse med tidigare 0,6% minskning av CO₂-ekv. utsläpp kopplat till uppvärmning motsvarar skillnaden i utsläpp för olika scenarier kopplat till byggnadsmaterial som mest en ökning på 130% respektive en minskning på 70% i jämförelse med referensmodellen.

En jämförelse mellan CO₂-ekv. utsläpp från fjärrvärme samt från materialframställningen för varje scenario vore intressant att studera. En sådan jämförelse skulle dock bli lite missvisande då CO₂-ekv. utsläppen bara inkluderar materialframtagningen av material till bjälklag och ytterväggar och inte till hela byggnaden, så dessa utsläpp ser ut att vara mer obetydliga än de faktiskt är. Det som däremot ger en mer rättvis jämförelse är att studera vilka scenarier som både har en minskning av CO₂-ekv. utsläpp för fjärrvärme och för material i jämförelse med referensmodellen. Scenario 4 (KL-trättervägg och massivträbjälklag), 5 (KL-trättervägg och träbjälklag) och 9 (tegelyttervägg och betongbjälklag) har alla en sådan minskning, även om de inte är de scenarierna som har de största minskningarna av CO₂-ekv. utsläpp för fjärrvärme eller material enskilt.

5. Diskussion

Precis som tidigare forskning (bl.a. Reilly och Kinnane, 2017; Stevens et al., 2016) visar denna studie att det rör sig om relativt små skillnader i värme- och kylbehov mellan olika byggnadskonstruktioner med olika värmetröghet då byggnaden ligger i ett så pass kallt klimat som den studerade byggnaden gör. Denna studies resultat ger en minskning av värmeförbrukning med som mest cirka 0,6%. Resultat för värmebehovet liknar studien av Stevens et al. (2016) som utvärderade potentialen av att utnyttja

värmetröghet för att minska värmebehovet i en byggnad placerad i Alaska. Sverige och Alaska har ju båda kala klimat, även om Alaska såklart har ett mer extremt klimat. I deras studie visar de på att skillnaden i värmebehov för byggnader med olika värmetröga material i kalla klimat var mindre än 1%, medan skillnaderna i ett varmare klimat kunde vara upp mot 20%.

I Heier et al. (2012) studie där de bland annat tittar på hur överhettning påverkas om den termiska massan för ytterväggar ökas kommer de fram till att en ökning av termisk massa för en byggnad, utan yttre skuggning, skulle resultera i att inomhustemperaturen minskade med omkring 12%. Detta kan jämföras med resultatet från denna studie som för det bästa scenariot genererar en 6% minskning av överhettningstimmar. Denna jämförelse ska dock göras med beaktning att studierna är utförda med vissa skillnader. I Heier et al. (2012) studie har de en gräns för överhettning vid temperaturer över 24 °C medan denna studie tittar på överhettning vid temperaturer över 26 °C, enligt krav från Boverket. De genomför även endast justeringar för ytterväggen och ändrar inte hela dess uppbyggnad utan lade endast till ett lager av betong.

Flera studier pekar på att användningsfasen samt byggskedet (skede1-5 enligt figur 14) båda är delar som kräver en stor del av den totala energin som går åt under en byggnads livscykel. Samma studier pekar också på att CO₂-ekv. utsläpp för användningsfasen, vilken till stor del innefattar energin för uppvärmning, verkar vara relativt lika, oberoende av vilket material byggnaden består av (Ekvall, 2006 samt Liljenström et al, 2014). Detta är samma slutsats som även kan dras från denna studie. I produktskedet däremot finns stora skillnader i CO₂-ekv. utsläpp för respektive material. Främst handlar det om betong som är ett material som medför stora utsläpp under detta skede. Detta är inget nytt utan det finns många studier som visar detta, bland annat studien från Erlandsson et al. (2018). De visar på en 60% minskning av CO₂-ekv. utsläpp om man använder sig av en stomme i massivträ jämfört med en platsgjuten betongstomme. Detta kan jämföras med resultatet i denna studie som för konstruktionen med mellanbjälklag av massivträ, och samma ytterväggar som i referensmodellen, uppvisade en minskning på cirka 30 ton CO₂-ekv. utsläpp (70% minskning) i jämförelse med referens modellen med mellanbjälklag av betong. Om det scenario med de lägsta CO₂-ekv. utsläppen i produktskedet (tegelyttervägg och mellanbjälklag av massivträ) jämförs med det scenario med högst CO₂-ekv. utsläpp (både ytterväggar och mellanbjälklag av betong) kan en skillnad på 92 ton CO₂-ekv. utsläpp utläsas.

De materialkombinationer som inkluderar betong i antingen yttervägg eller mellanbjälklag visar sig dock ha goda värmetröga egenskaper för att minska energiförbrukningen för värme och kyla jämfört med andra material. Betongen klarar dock inte på samma sätt av höga temperaturer men borde, om man skulle bortser från klimatpåverkan i produktionsskedet, vara ett bättre alternativ i geografiskt kallare områden. Något som resultatet visar är dock att bidraget från materialtillverkning till klimatpåverkan är avsevärt högre än energibehovets när man tar hänsyn till värmetrögheten, så därför bör inte klimatpåverkan i produktsskedet negligeras. Tvärtom

bör det övervägas noggrant om det är lönt att försöka att minska energianvändning genom att använda material med högre värmetröghet, speciellt för byggnader placerade i kallare geografiska klimat. Om man vill försöka utnyttja värmetrögheten för att minska värme- eller kylbehov så bör man välja material som även presterar bra utifrån en klimatpåverkanaspekt i produktfasen, exempelvis massivt trä.

6. Slutsatser

Först och främst kan man konkludera att energin som krävs för uppvärmning av byggnaden inte skiljer signifikant mellan olika scenarier. Ur en uppvärmningssynpunkt borde därför inte värmetrögheten för olika materialval vara en avgörande parameter i ett så pass kallt klimat som Sverige. Vad det gäller kylbehov så står samtliga scenarier, bortsett från scenario 11 (tegelyttervägg och mellanbjälklag av trä) för en betydande minskning av kylbehov jämfört med referensscenariot. Så beroende på om man planerar att använda någon form av kyla för byggnaden så borde detta vara en aspekt att ta hänsyn till. Speciellt är det alltså referensmodellen samt materialkombinationen av tegelyttervägg och träbjälklag som bör undvikas för en förbättrad utnyttjande av värmetrögheten för kyla. Analysen av överhettning för de olika scenarierna visar på att det är främst mellanbjälklag av betong som verkar vara en bidragande faktor för en ökning av överhettningstimmar. Det handlar dock inte om några väldigt stora skillnader i överhettningstimmar, som mest uppvisas en minskning på ungefär 70 h. Detta är dock en faktor som har påverkan om ingen aktiv kylsystem skulle finnas, och även om passiva kylsystem skulle sättas in så skulle troligtvis olika materials värmetröghet kunna ha en viss påverkan på antal överhettningstimmar.

Eftersom energin för uppvärmning inte skiljer så mycket mellan de olika scenarierna skiljer sig följaktligen inte heller dess CO₂-ekv. utsläpp markant. Men om skillnaden i CO₂-ekv. utsläpp till följd av uppvärmning mellan olika scenarier tycks vara relativt obetydlig så skiljer sig däremot CO₂-ekv. utsläpp för olika scenarier till följd av materialtillverkning desto mer. Det är därför av högsta vikt att ta hänsyn till materialval för att minska de utsläpp som bidrar till klimatpåverkan under de tidiga skedena av byggprocessen. Det byggnadsmaterialet som enskilt bidrar till mest CO₂-ekv. utsläpp är betong.

7. Fortsatta studier

Det här exjobbet skulle gå att utveckla i flera riktningar. Ett förslag är att inkludera flera byggnadsdelar, det vill säga titta på olika material för fler delar av stommen än ytterväggar och mellanbjälklag. Detta skulle bidra med en större datamängd som skulle göra det lättare att dra tydliga slutsatser. Det skulle också vara intressant att kunna titta på i vilken grad olika byggnadsdelar bidrar till utnyttjandet av värmetrögheten, och

därmed vilka delar som är mest relevanta att anpassa utifrån detta. En annan aspekt som skulle gå att utveckla är att fokusera på samma byggnadsdelar som i denna studie men titta på en större variation av material. Man skulle dels kunna titta på fler material som klassificeras som värmetröga men även jämföra dessa mot mindre värmetröga material. Speciellt hade detta varit intressant i kombination med en LCA studie då man kan ställa de energibesparing som erhålls från de värmetröga materialen mot vilken klimatpåverkan de har under hela materialets livstid.

En annan riktning för arbetet är att göra analyser av andra byggnader för en ökad möjlighet att kunna generalisera resultaten. Dels analyser av andra förskole- eller skolbyggnader som har samma användningsområde och antagligen har en relativt liknande utformning, men även analyser för andra typer av byggnader som har andra behov och krav. Eftersom tidigare studier även visat på en större skillnad i energibehov mellan olika värmetröga material i varmare klimat i jämförelse med kallare klimat så skulle även detta vara en intressant aspekt att undersöka närmare.

En annan del som inte är inkluderad in denna studie är kostnadsaspekten för materialval. Detta är en parameter som mycket väl är relevant i beslutet av material, och en parameter som i vissa fall kan vara förklaring till att klimatvänliga eller värmetröga material väljs bort för billigare material med sämre egenskaper i detta avseende.

Slutligen skulle det även vara möjligt att bygga vidare på livscykelanalysen. Om man hade den informationen som krävs skulle man kunna genomföra en grundligare LCA där man inkluderar alla delar, även exempelvis transport och byggprocessen. I den här studien har även de inkluderade materialerna valts så generellt som möjligt då specifik information inte har varit tillgänglig i den fas projektet befinner sig i. För ännu mer specifika resultat utifrån livscykelanalysen skulle information om exempelvis leverantörer av material behövas.

Referenser

- Abel, E., Elmroth, A. (2016), Byggnaden som System, 4:e Upplagan. Studentlitteratur: Lund.
- Aste, N., Angelotti, A., Buzzetti M. (2009), "The influence of external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings", Energy Build, Vol. 41 No. 11, 1181–1187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>.
- BBR 2011:6. Konsoliderad version av Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR.
- Boverket, 2017. Öppen data - Dimensionerande vintertertemperaturer (DVUT 1981–2010) för 310 orter i Sverige. Tillgänglig online: <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/oppna-data/dimensionerande-vinterutetemperatur-dvut-1981-2010> (2022- 03-07)
- Boverket, 2019. Introduktion till livscykelanalys (LCA). Tillgänglig online: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/> (2022-04-20)
- Boverket, 2021. Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn. Tillgänglig online: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/> (2022-04-22)
- Boverket, 2022. Termiskt klimat. Tillgänglig online: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/> (2022-03-10)
- Brickarchitecture, 2017. Why brick? Tillgänglig online: <https://brickarchitecture.com/about-brick/why-brick/why-brick> (2022-05-02)
- Byggforsk, 1997. Planläggning av betongelementbygg. Tillgänglig online: https://www.byggforsk.no/dokument/300/planlegging_av_betongelementbygg (2022-04-02)
- Byggforsk, 2001. Massive treelementer. Typer og bruksområder. Tillgänglig online: https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader (2022-04-02)
- Ekvall, T. (2006), "Miljöaspekter på val av stommaterial i byggnader", IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f4735d6/1628416528393/FULLTEXT01.pdf9>
- Encyclopedia, 2022. Thermal Inertia. Tillgänglig online: <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/thermal-inertia> (2022-05-22)
- Erlandsson, M et al. (2018), "Minskad klimatpåverkan från flerbostadshus. Underlagsrapport. Sveriges Byggindustrier", IVL Svenska Miljöinstitutet.

- <https://www.ivl.se/download/18.72aeb1b0166c003cd0d1d5/1542035270063/C350.pdf>.
- Folkhälsomyndigheterna, 2022. Vägledning för bedömning av termiskt inomhusklimat och temperatur. Tillgänglig online: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/tillsynsvagledning-halsoskydd/temperatur/termiskt-inomhusklimat-och-temperatur/> (2022-05-22)
- Hagentoft, CE., Sandin, K. (2017), Byggnadsfysik- så fungerar hus, 1: a Upplagen. Studentlitteratur: Lund.
- Heier, J., Bales, C., Martin, V. (2012), "Thermal energy storage in Swedish single family houses", The 12th International Conference on Energy Storage. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:607607/FULLTEXT02.pdf>
- Isover. Värmetröghet. 2011. Hållbart byggande del 3-Värmetröghet. vad betyder det för byggnadsutformningen? Tillgänglig online: <https://www.isover.se/news/hallbart-byggande-del-3-varmetroghet-vad-betyder-det-byggnadsutformningen> (2022-02-05)
- Isover, 2022. Guide för konstruktionslösningar. Tillgänglig online: <https://www.isover.se/applications> (2022-03-17)
- Liljenström, C et al. (2014), "Byggandets klimatpåverkan", IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.ivl.se/download/18.2aa2697816097278807f384/1525081550712/B2217.pdf>
- Luleå Kommun, 2021. Förbättra husets klimatskal. Tillgänglig online: <https://www.lulea.se/boende--miljo/energi-klimat-el--varme/klimatsmart-boende/forbatta-husets-klimatskal.html> (2022-03-23)
- Länsstyrelsen i Dalarnas län, 2020. God inomhusmiljö i förskola och skola. Tillgänglig online: <https://www.effect4buildings.se/wp-content/uploads/5-God-inomhusmiljo-i-skola-och-forskola.pdf> (2022-02-13)
- Matsushima, D. (2018), Thermal Inertia-Based Method for Estimating Soil Moisture, DOI: 10.5772/intechopen.80252
- Naturvårdsverket, 2022. Energieffektivisering i bostäder och lokaler. Tillgänglig online: <https://www.naturvardsverket.se/arnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimat-och-energin/energieffektivisering/energieffektivisering-i-bostader-och-lokaler/> (2022-05-17).
- Orosa, José A., Oliveira, Armando C. (2012), "A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment", *Renew Energy*, Vol. 37, No. 1, 89–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.009>
- Reilly, A., Kinnane, O. (2017), "The impact of thermal mass on building energy consumption", *Applied Energy*, Vol. 198, Pages. 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>
- Sandin, K. (2010), Praktiskt byggnadsfysik. Uppl. 1,3. Lund: Studentlitteratur

- Stevens, V. et al. (2016). "The effect of Thermal mass on Annual heat Load and Thermal Comfort in Cold Climate Constructions", *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 30, No.1. 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000092
- Sveby, 2015. Brukardata undervisningsbyggnader. Tillgänglig online: <https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2015/12/Sveby-brukarindata-undervisning-prel.pdf> (2022-02-20)
- Svensk Betong, 2022a. Produktionsmetoder. Tillgänglig online: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/allmant-om-betong/produktionsmetod> (2022-04-13)
- Svensk Betong, 2022b. Svensk betongs folder om energi: Betong sparar energi. Tillgänglig online: <https://www.svenskbetong.se/hallbarhet/energieffektivitet> (2022-04-13)
- Svensk Betong, 2022c. Klimatförbättrande betong. Tillgänglig online: <https://www.svenskbetong.se/svensk-betong/press/pressmeddelande/2-ekategoriserad/1169-spridning-av-var-vagledning> (2022-04-15)
- Sveriges Miljömål, 2022. Utsläpp av växthusgaser till år 2045. Tillgänglig online: <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2045/> (2022-06-069)
- TräGuiden, 2021. Värmeegenskaper. Tillgänglig online: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/termiska-egenskaper1/varmeegenskaper/> (2022-04-01)
- Verbeke, s., Audenaert, A. (2018), "Thermal inertia in buiding: A review of impacts across climate and buildings use", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, Part. 3, 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>

Appendix

Bilaga A: Material

I det här avsnittet ges en kortare information om de material som har en central del i de simuleringar som gjorts.

Trä och massivt trä

Trä har låg densitet men hög specifik värmekapacitet och därför ändå hög värmelagringsförmåga. För att utnyttja den höga specifika värmekapaciteten ska träet med fördel placeras mot det uppvärmda utrymmet. Färförskjutningen (η) är stor i massiv trä. Det vill säga det tar lång tid, omkring 10–12 timmar, innan den maximala värmen på utsidan av väggen når insidan. Traditionellt har trähus byggts med träregelstomme och eftersom mängden trä är begränsad i en sådan konstruktion leder detta även till en begränsad värmetröghet. Men vid användningen av massivt trä ökas den totala mängden av trä markant och en sådan konstruktion får då en mycket god värmetröghet (Träguiden, 2021).

Massivt trä har använts för byggnation av broar sedan 1970-talet men har sedan 1990-talet blivit alltmer utbrett även som byggnadsmaterial till byggnader. Massivt trä kan användas som bärande element i bland annat tak, väggar och golvavdelare. Antingen kan hela det bärande systemet byggas upp med massivt trä eller så kan det kombineras med andra material. Massivt trä kan i uppbyggnaden av konstruktionen liknas vid den av betong. Massivt trä har dock ungefär 10 gånger så bra värmekapacitet som betong men trots detta krävs även tilläggsisolering (Byggforsk, 2001). Den typ av massivträ som används är ofta så kallat KL- trä. KL-trä består av minst tre skikt med ihopsatta plankor (ofta från gran eller furu) där vartannat skikt ligger i 90 grader mot det föregående (Träguiden, 2017).

Trä är ett bra material att jobba med i klimatsynpunkt. Själva produktionen av träprodukter har ett förhållandevis litet energibehov och de restprodukter som bildas används till stor del som biobränsle. Ett trähus kommer under hela sin livstid ta upp och lagra koldioxid. Denna koldioxid kommer dock släppas ut när byggnaden uppnått sin livstid i bruk, men till skillnad från andra koldioxidutsläpp så bidrar dessa utsläpp inte till nya halter koldioxid i atmosfären då det kan tas upp av nyplanterade träd och fungerar därför mer som ett kretslopp.

Betong

Värmelagring i betongelement är mycket god, i en kubikmeter betong lagras cirka 2 400 kJ vid en grads temperaturhöjning. Överskottsvärme som förekommer i denna typ av byggnad kan i stor utsträckning tillvaratas med förutsättningen att betongen är åtkomlig för inomhusluften, men eftersom betong inte är särskilt värmeisolerande bör det alltid kombineras med isolering av olika slag (Byggforsk, 1997). Gällande ytterväggar i

betong finns det två alternativ, platsgjuten alternativt prefabricerad betong. Vid användning av platsgjuten betong är betongen färsk och pumpas in i former vid byggnation medan prefabricerad betong skapas färdiga byggnadsdelar på fabrik som sedan fraktas ut till byggarbetsplatsen (Svensk Betong, 2022a). Ett typexempel på väggar av betong skulle kunna vara en betongstomme med en inre betongvägg (150mm) samt isolering (220mm).

I framställningen av betong behövs fyra råvaror: cement, ballast, vatten och tillsatser. Den mest miljöbelastande processen i framställningen är förbränning av kalkstenen eftersom det då frigörs en stor mängd koldioxid. Alla färdiga konstruktioner och byggnader av betong tar dock naturligt upp koldioxid i en process som kallas för karbonatisering. Enligt forskning som Svensk Betong har tagit del av så tar de betongkonstruktioner som finns idag i Sverige upp sammanlagt 300 000 ton koldioxid per år. I processen reagerar koldioxid med betongens kalciumhydroxid och bildar kalciumkarbonat. Denna process gör att betongen med tiden kommer att återgå mer och mer till sitt ursprungstillstånd som kalksten (Svensk Betong, 2022a).

Tegel

Tegel har använts som byggnadsmaterial i flera tusen år. Tegel framställs genom att under mycket hög temperatur bränna lera. Tegel är ett hållfast material som har en livslängd på omkring 100 år. Tegel har mycket goda termiska egenskaper och inte minst ur ett väremtröghetsperspektiv. Under varma dagar buffrar tegel värme mycket bra och under soliga vinterdagar lagras värme i materialet för att sedan långsamt släppas ut (Brick Architecture, 2017).

Produktionsprocessen av tegel är inte så miljöbelastande då de element som krävs för att tillverka tegel endast är lera, sand och vatten samt att de inte orsakar några markföroreningar då de inte reagerar med eller släpper ut giftiga ämnen. Tegel har även goda återvinningsmöjligheter. De kan användas för nya byggnationer eller för andra områden som exempelvis en ingrediens i gjuten eller prefabricerad betong (Brick Architecture, 2017).

Bilaga B: Ekvationer för inhomogena skikt

Densiteten för ett inhomogent material räknas ut enligt ekvation 2, och enligt samma princip räknas även värmeledningsförmågan ut. Den specifika värmekapaciteten räknas ut genom att använda resultaten från ekvation 2, 3 och 4 i ekvation 5.

$$\rho_{\text{inhomogent material}} = \frac{\text{Bredd isolering}}{\text{Avstånd regler (cc avstånd)}} \cdot \rho_{\text{isolering}} + \frac{\text{Bredd regel}}{\text{Avstånd regler (cc avstånd)}} \cdot \rho_{\text{regel}} \quad (2)$$

$$c_{\text{isolering}} = \left(\frac{\text{bredd isolering}}{\text{Avstånd regler (cc avstånd)}} \right) \cdot \rho_{\text{isolering}} \quad (3)$$

$$c_{\text{regel}} = \left(\frac{\text{bredd regel}}{\text{Avstånd regler (cc avstånd)}} \right) \cdot \rho_{\text{regel}} \quad (4)$$

$$c_{\text{inhomogent material}} = \frac{(c_{\text{isolering}} + c_{\text{regel}}) \cdot \rho_{\text{inhomogent material}}}{c_{\text{isolering}} + c_{\text{regel}}} \quad (5)$$