



# Examensarbete

**Byggingenjör 180 hp / Examensarbete  
inom byggteknik, 15,0 hp**

## **Energieffektivisering av Asfalttillverkning: Ett hållbart tillvägagångssätt genom värmelagring och varmdosering**

Effektiva åtgärder för energibesparingar och  $CO_2$ -  
minskning.

Halmstad 2024-05-23

Ahmad Alhoushan & Ahmad Almasri



HÖGSKOLAN  
I HALMSTAD



---

## Sammanfattning

Byggbranschen strävar efter klimatneutralitet till 2045 – 2050 med fokus på samarbete, innovation och effektiv resursanvändning för att minska växthusgasutsläpp och främja hållbara byggmetoder. Detta examensarbete vid Byggnadsingenjörsprogrammet, Högskolan i Halmstad undersöker energieffektivisering och optimering av asfalttillverkningsprocessen, särskilt värmelagring i silos, i samarbete med Skanska Industrial Solutions.

Studien tillämpar kvalitativa metoder, inklusive intervjuer med experter och besök på en asfaltsanläggning i Sperlingsholm, Halmstad. Den teoretiska ramen omfattar hållbar utveckling, hållbara vägnät, varmblandad asfalt (HMA), samt design och material för värmelagringssilos.

Forskningsmetodiken inkluderade datainsamling, intervjuer, studiebesök och simuleringar med COMSOL Multiphysics för att analysera temperaturförändringar och jämföra olika silodesignalternativ. Autodesk AutoCAD användes för att skapa 2D-ritningar.

Resultaten betonar energieffektivitet och hållbarhet i asfalttillverkning, med potential att minska växthusgasutsläpp genom optimerad silodesign och isolering. Specifikt visar implementeringen av värmelagrande silos en signifikant minskning av oljeförbrukning och  $CO_2$ -utsläpp. Studien rekommenderar vidare forskning för validering och förbättring i verkliga produktionsmiljöer och bidrar med insikter om hållbara byggmetoder, understrykande behovet av teknisk innovation för att möta miljöutmaningarna inom byggbranschen.

Nyckelord: Asfalttillverkning, Värmelagring, Silodesign, Värmeisolering, Hållbarhet.



---

## Abstract

The construction industry strives for climate neutrality by 2045-2050 with a focus on collaboration, innovation, and efficient use of resources to reduce greenhouse gas emissions and promote sustainable construction methods. This degree project from the Building Engineering program at Halmstad University investigates energy efficiency and optimization of the asphalt manufacturing process, especially heat storage in silos, in collaboration with Skanska Industrial Solutions.

The study applies qualitative methods, including interviews with experts and visits to an asphalt plant in Sperlingsholm, Halmstad. The theoretical framework includes sustainable development, sustainable road networks, hot mix asphalt (HMA), and design and materials for heat storage silos.

The research methodology included data collection, interviews, field visits and simulations with COMSOL Multiphysics to analyse temperature changes and compare different silo design options. Autodesk AutoCAD was used to create 2D drawings.

The results emphasize energy efficiency and sustainability in asphalt manufacturing, with the potential to reduce greenhouse gas emissions through optimized silo design and insulation. Specifically, the implementation of heat storage silos shows a significant reduction in oil consumption and  $CO_2$  emissions. The study further recommends research for validation and improvement in real production environments and contributes with insights into sustainable construction methods, underscoring the need for technological innovation to meet the environmental challenges in the construction industry.

**Keywords:** Asphalt production, Heat storage, Silo design, Thermal insulation, Sustainability.



---

## Förord

Detta examensarbete är avslutningen på vår utbildning till Byggingenjörprogrammet vid Högskolan i Halmstad. Examensarbetet utfördes hos Skanska Industrial Solutions i samarbete med Skanska maskinteknik.

Författarna vill tacka alla intervjupersoner på Skanska Sverige AB såsom andra företag för att de ställt upp och gjort detta examensarbete möjligt. Författarna vill även rikta ett stort tack till våra handledare, Kim Holm och Björn Nilsson från Skanska maskinteknik, samt till vår handledare, Mohsen Soleimani Mohseni vid Högskolan i Halmstad. Dessa personer har bidragit med råd och stöd och har varit till stor hjälp under arbete med detta examensarbete.

Slutligen vill författarna tacka Moamar Alhoushan, Adjunkt, Civilingenjör, maskinteknik som hjälpt oss under arbetet med detta examensarbete med tips, råd och varit ett bra stöd när vi behövt diskutera något och delat med oss hans lärorika kunskaper och erfarenheter.

Halmstad 2024-05-23



---

Ahmad Alhoushan

*AHMAD ALMASRI*

---

Ahmad Almasri



---

## Definitioner av begrepp och förkortningar

*C2CA = Concrete to cement and aggregates*

*BTU = British thermal unit*

*HMA = Hot Mixed Asphalt*

*Mg / Lane mile =  $\mu\text{g}$  / körfält amerikansk mil*

*kWh = kilo watt hour*

*RTD = Residence Time Distribution*

*WBS = Work breakdown structure*

*CO<sub>2</sub> = Koldioxid*

*$\rho$  = Densitet (kg/m<sup>3</sup>)*

*$\rho$  = Densitet (kg/l)*

*d = Materialets tjocklek (m)*

*c<sub>p</sub> = Specifik värmekapacitet för ämnet (J/kg · K).*

*$\lambda$  – värde = Termisk konduktivitet*

*R = Termiskt motstånd (m<sup>2</sup> · k/W).*

*$\alpha$  = Termisk diffusivitet*

*T<sub>ut</sub> = Utomhustemperaturen i °C*

*T<sub>in</sub> = inomhustemperaturen i °C*

*$\Delta T$  = Temperaturskillnaden mellan de två kropparna °C eller K*

*$\Phi_{in}$  = Inre diameter*

*$\Phi_{ut}$  = Inre diameter*

*A = Tvärsnittsarean genom vilken värmen överförs*

*Q = Mängd värme som överförs genom materialet*

*$\Delta Q$  = Mängd värme som överförs*

*Q = Energieffekten i watt (W)*

*m = Massa av ämnet*

*V = Volymen (kg/m<sup>3</sup>)*

*°C = Celsius grader*

*K = Kelvin*

*g CO<sub>2</sub> – e/kWh = gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme*

*kg CO<sub>2</sub> – e/kWh = kilogram koldioxidekvivalenter per kilowattimme*

*l/h = Flöde*

*kJ/kg = Energiinnehåll*

*$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$  = Energiflödes hastighet / Energiförbrukning i megajoule per timme*

*$\eta$  % = Verkningsgrad i procent*

*l = liter*



---

## Innehållsförteckning

<b>Förord</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	7
<b>1.2 Syfte</b> .....	7
<b>1.3 Mål</b> .....	8
<b>1.4 Frågeställningar</b> .....	8
<b>1.5 Avgränsning</b> .....	8
<b>1.6 Observation och Antaganden</b> .....	9
<b>1.6.1 Observation</b> .....	9
<b>1.6.2 Antaganden</b> .....	9
<b>2 Teoretisk referensram</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Hållbar Utveckling</b> .....	9
<b>2.2 Vikten av att bygga hållbara vägnät</b> .....	10
<b>2.3 Produktionsprocess för varm asfaltblandning (HMA)</b> .....	10
<b>2.4 Den roterande torken</b> .....	11
<b>2.5 Silos</b> .....	11
<b>2.5.1 Silos, bakgrund och eventuella problem 1</b> .....	11
<b>2.5.2 Flödesmönster inom silos</b> .....	11
<b>2.5.3 Stressfördelningen inom silos</b> .....	12
<b>2.6 Vilket material är mest lämplig att bygga silon i?</b> .....	12
<b>2.6.1 Silos i armerad betong</b> .....	12
<b>2.6.2 Armerad betong som byggmaterial</b> .....	13
<b>2.6.3 Att återvinna betong</b> .....	13
<b>2.6.4 Silos i metall</b> .....	14
<b>2.6.5 Att bygga i rostfritt stål</b> .....	14
<b>2.8 Designkriterier</b> .....	14
<b>2.8.1 Återanvändning i stället för återvinning</b> .....	14
<b>2.8.2 Transportföreskrifter</b> .....	15
<b>3 Värmeisolering</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Vad är värmeisolering?</b> .....	17
<b>3.2 Hur fungerar värmeisolering?</b> .....	17
<b>3.3 Vad är termisk konduktivitet?</b> .....	17

---

3.4	Vad är termiskt motstånd? .....	18
3.5	Vad är värmekapacitet? .....	18
3.6	Vad är specifik värmekapacitet? .....	18
3.7	Vad är densitet? .....	18
3.8	Vad är termiska diffusivitet? .....	19
3.9	Vilka fördelar kan uppnås genom användning av värmeisolering? .....	19
<b>4</b>	<b>Byggnadsisolering .....</b>	<b>20</b>
4.1	Vad är god byggnadsisolering? .....	20
4.2	Byggisoleringsmaterial .....	20
4.3	Konventionella isoleringsmaterial .....	21
4.3.1	Organiska isoleringsmaterial .....	21
4.3.2	Oorganiska isoleringsmaterial .....	22
4.4	Toppmoderna isoleringsmaterial .....	22
4.5	Hållbara isoleringsmaterial .....	22
4.6	Vanligaste typerna av värmeisoleringsmaterial och deras egenskaper .....	23
4.6.1	Mineralull .....	23
4.6.2	Cellglas / Skumglas .....	24
4.6.3	Cellulosa .....	25
4.6.4	Aerogeler .....	26
4.6.5	Polyuretan .....	27
4.6.6	Vakuumisoleringspaneler (VIP) .....	28
<b>5.0</b>	<b>Metod / Genomförande .....</b>	<b>29</b>
5.1	Arbetsätt .....	29
5.2	Litteratur .....	31
5.3	Datainsamling .....	31
5.3.1	Intervjuer & Studiebesök .....	31
5.4	Analysarbete .....	31
5.5	Optimering av asfalttillverkningsprocessen .....	32
5.6	Metodik för Simulering & Design i COMSOL Multiphysics .....	33
5.6.1	COMSOL Multiphysics .....	33
5.6.2	AutoCad .....	33
5.6.3	Design & Simulering 1 förutsättningar .....	33
5.6.4	Design & Simulering 2 förutsättningar .....	34

---

---

5.6.5 Parametrar vid asfaltproduktion.....	34
<b>6 Resultat.....</b>	<b>35</b>
6.1 Design & Simulering 1.....	35
6.2 Design & Simulering 2.....	40
6.3 Energi- och CO <sub>2</sub> -Utsläppberäkning.....	44
6.3.1 Energiberäkning baserat på Design & Simulering 2.....	44
6.3.2 CO <sub>2</sub> - Utsläppberäkning.....	45
<b>7 Analys &amp; Diskussion.....</b>	<b>47</b>
7.1 Hållbar utveckling och energieffektivisering .....	47
7.2 Materialvalutvärdering .....	47
7.3 Metod och genomförande i studien .....	49
7.4 Resultatanalys av simuleringar, beräkningar och intervjuer.....	49
<b>8 Slutsatser .....</b>	<b>52</b>
8.1 Optimerad Värmelagring för Temperaturreduktion.....	52
8.2 Minskade energi- och CO <sub>2</sub> -utsläpp miljövinster .....	52
8.3 Framtida forskningsområden .....	52
Referenser (A-Ö).....	53
Bilagor .....	57



---

## 1 Inledning

I inledningen beskrivs syftet, frågeställningarna och målen för examensarbetet. Dessutom presenteras bakgrunden, avgränsningarna och observation och antaganden för studien.

### 1.1 Bakgrund

I Sveriges ambitiösa mål om nettonollutsläpp av växthusgaser år 2045 har uppmärksamheten kring klimatpåverkan ökat. För att nå detta mål har aktörer som är involverade i planering och konstruktion av svensk transportinfrastruktur strävat efter att halvera sin klimatpåverkan år 2030 jämfört med år 2015. Samtidigt är det viktigt att förstå att det övergripande beslutet om nettonollutsläpp inte nödvändigtvis är en direkt följd av denna specifika sektors påverkan. Det representerar snarare en bredare nationell strategi för att möta klimatmålen. Dock är det viktigt att notera att byggsektorn och anläggningssektorn bidrar till en del av den totala klimatpåverkan. Enligt Andersson & Ekström (2023) är asfaltindustrin aktivt engagerad i att minska sin klimatpåverkan redan från råvaruutvinning till ballasttillverkning och asfaltproduktion. Därför har många studier utförts för att visa den totala miljöpåverkan. Resultaten från dessa studier skapar ett underlag för beslut angående åtgärder. (Liljenström et al. 2019)

Tillsammans med företaget Skanska AB har vi diskuterat en åtgärd som kan minska klimatpåverkan från asfaltverken. Genom att förvärma aggregaten med hjälp av förnybar energi och lagring i stora värmeisolerade silos samt genom att implementera varmdosering i stället för kalldosering i den roterande torken, kommer vi att kunna minska energianvändningen och klimatpåverkan.

Genom detta examensarbete ska en omfattande analys av ett specifikt problem inom asfalttillverkningsprocessen presenteras, där vi planerar identifiera orsaken till problemet och utveckla en hållbar lösning. För att kunna adressera problemet analyseras produktionsprocessen och hur vi kan påverka olika delar för att uppnå en effektivare och mer hållbar produktionsprocess.

### 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att minska klimatpåverkan från asfalttillverkningen genom att identifiera orsaken till problemet och lösa det specifika problemet i produktionsprocessen samt implementering av lösningen.

Det görs genom de två delmålen

- 1: kartlägga produktionsprocessen på asfaltverket.
- 2: Identifiera stadiet i produktionsprocessen där utveckling med avseende på minskad klimatpåverkan kan implementeras.

---

### 1.3 Mål

Målet med studien är att skapa en lagringsbehållare eller silo med effektiv isolering och material som kan hålla stenmaterialet vid 60 – 100 °C. Detta syftar till att minska användningen av fossila bränslen för torkning och därigenom påskynda produktionsprocessen.

Fördelar med idén:

- Bidrar till Sveriges och Skanskas klimatmål för 2045 – 2050.
- Minskad uppvärmningstid för stenmaterialet vid varmdosering (60 – 100°C) jämfört med kalldosering.
- En tydlig minskning av energiförbrukning och CO<sub>2</sub>-utsläpp uppnås under torkningsprocessen, vilket leder till miljövinster.

### 1.4 Frågeställningar

Hur påverkas temperaturen på bergkrossmaterialet i en isolerad silo vid förvärmning till 60 – 100°C, och hur varierar denna temperatur över tiden innan överföring till torken?

Följdfråga

- 1- Vilken typ av byggisolerings- och konstruktionsmaterial används för att säkerställa att temperaturen hos den lagrade stenmaterialen hålls inom intervallet 60 – 100°C?

### 1.5 Avgränsning

1. Geografiskt område: Studien begränsas till Asfaltverket i Sperlingsholm, Halmstad. Denna anpassning förenklar och konkretiserar insamlingsprocessen av data.
2. Tidsram: Analys av temperaturer på bergkrossmaterialet över specifika månader under året. Denna period kommer att anpassas för att undvika de månaderna asfaltverken normalt inte är i drift.
3. Materialval och konstruktion: Undersökningen fokuserar på att identifiera och motivera valen av de optimala konstruktionsmaterialen, isoleringsmaterialen och dimensionerna för silon som säkerställer maximal temperaturstabilitet.
4. Konstruktionsstabilitet: Studien inkluderar inte en djupgående analys eller utformning av silon med hänsyn till konstruktionsstabilitet.
5. Flödesmönster: Utformning av silon beaktas inte med avseende på optimala flödesmönster.
6. Den ekonomiska aspekten kommer endast att behandlas ytligt och på en enklare nivå.

---

## 1.6 Observation och Antaganden

### 1.6.1 Observation

Genom att införa förvärmning av bergkrossmaterial med hjälp av förnybar energi, särskilt uppvärmning till minst 60 °C, observerar vi en minskning av energianvändningen i den roterande torken. Förvärmning med förnybar energikälla kommer dessutom att resultera i en förkortning av uppvärmningstiden i den roterande torken, som i sin tur kommer att förkorta tiden på hela tillverkningsprocessen.

### 1.6.2 Antaganden

Vi antar att:

Användningen av förvärmningsprocess av stenmaterialen med hjälp av en förnybarenergikälla kommer att leda till en minskning av den tidigare totala energianvändningen som är baserad på icke förnybar energikälla. Vi antar dessutom att minskningen av energianvändningen kan leda till en minskning av klimatpåverkan som kommer från asfaltverken.

## 2 Teoretisk referensram

För att ge bakgrund till denna studie skrivs det teoretiska ramverket. Här förklaras det på en djupare nivå vad hållbar utveckling är, relevant bakgrund om asfaltproduktion, silos, värmeisolering och byggnadsisolering. Dessutom utforskas även de olika isoleringsmaterialen som är mest förekommande på marknaden och som behandlas i denna studie. Det teoretiska ramverket anses framför allt bidra till en djupare förståelse för varför vi har valt att designa silon på det sättet och vilka kriterier vi har valt.

### 2.1 Hållbar Utveckling

Vad som påverkar valet av byggmaterial samt byggisoleringsmaterialet kan variera från ett projekt till ett annat. Valet påverkas av bland annat behov, föreskrifter, begränsningar och rekommendationer. Olika byggmaterial och isoleringsmaterial har sina egna fördelar och nackdelar, men en kritisk faktor att överväga inom byggbranschen är hur dessa material kan påverka den hållbara utvecklingen av samhällsbyggnad.

Med hållbar utveckling menas ”Hållbar utveckling är en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov.” och hållbar utveckling bygger på de tre dimensioner: det sociala, ekonomin och miljön. (Globala Målen 2017). Den här studien fokuserar mest på den ekologiska faktorn.

Ekologisk hållbarhet fokuserar på att hantera och lösa miljöutmaningar på ett sätt som främjar bevarandet av resurser och minimerar skadlig påverkan på levande organismer och ekosystem. Målet är att skydda naturresurser på lång sikt och förhindra uppkomsten av negativa effekter. (Dahlin, 2014)

## 2.2 Vikten av att bygga hållbara vägnät

Ökningen av världsbefolkning samt den globala urbaniseringsgraden skapar en betydande efterfrågan på nya vägnät. Byggnationen av nya vägnät har väsentliga konsekvenser för hållbarheten. Enligt (Liljenström et al. 2019) har studier i Sverige utförts för att bedöma den årliga klimatpåverkan och den primärenergianvändningen av svensk transportinfrastruktur visat att:

- De årliga utsläppen av växthusgaser från byggnad och förvaltning av svensk transportinfrastruktur för väg, järnväg, luft och sjö beräknades vara 2,8 miljoner ton koldioxidekvivalenter.
- Den relaterade årliga primärenergiförbrukning beräknades vara 27 TWh.

Väg- och järnvägsinfrastruktur stod för den största klimatpåverkan och primärenergianvändning. Enligt Liljenström et al. (2019) stod väginfrastrukturen för 66 % av klimatpåverkan och 82 % av primärenergianvändning. Järnvägsinfrastrukturen hade 23 % andel av den totala klimatpåverkan och 11 % andel av primärenergianvändningen. Däremot hade flygplatser och hamnar en relativt liten betydelse för det totala resultatet. Där hamnar och flygplatser stod för 3 % och 8 % av klimatpåverkan, respektive 3 % och 4 % av primärenergianvändningen.

Forskaren Muench har avslöjat att energianvändningen under vägbyggnation i USA kan jämföras med den energimängd trafiken skulle använda under 1 eller 2 år, då den totala koldioxidutsläppen varierar mellan 200 och 600 Mg/Lane mile. Följaktligen är det nödvändigt att överväga hållbara strategier som kan främja en mer hållbar produktionsprocess vid anläggande av vägnät. (Muench 2010)

Författaren Thives and Ghisi (2017), beskriver behovet av energi för att producera värme vid tillverkning av varmblandad asfalt och betonar att minskad värmeanvändning är avgörande för att minska energianvändningen, utsläpp av växthusgaser och miljöpåverkan. För att uppnå detta mål föreslås användning av lågtemperaturasfalttekniker. Vanliga energikällor i anläggningar för asfaltblandning inkluderar fossila bränslen som petroleumdestillation, naturgas och kol för att värma och torka aggregaten, samt elektricitet från energibolag för att driva övriga maskiner som trumsvarvning, transportband och flyghissar. Enligt Thives and Ghisi (2017) krävs ungefär 300 000 BTU som motsvarar 87,92 kWh, för att torka och värma aggregat för att producera 1 ton varm asfalt. Detta motsvarar cirka 7,6 – 11,4 liter bränsleolja eller diesel, eller cirka 2.5 till 3.5 *therm natural gas*, vilket motsvarar 7,127 – 9,972 m<sup>3</sup> naturgas.

## 2.3 Produktionsprocess för varm asfaltblandning (HMA)

1. **Asfaltcementproduktion:** Asfaltcement (bindemedel) produceras först på en specifik produktionsanläggning och transporteras sedan till anläggningar för asfaltblandning.

2. **Lagring och uppvärmning av bindemedel:** Bindemedlen lagras i stora behållare och värms upp för att säkerställa flytande konsistens och för att korrekt belägga aggregaten.

3. **Förberedelse av aggregat:** Aggregaten, som är de material som ingår i asfaltblandningen, transporteras från lager till torkar där de värms upp till en temperatur mellan 150 och 200 °C.

4. **Blandning:** Uppvärmda aggregat blandas med uppvärmt bindemedel för att producera den slutliga HMA-blandningen.

5. **Produktion av HMA:** Den färdiga HMA-blandningen används sedan för att skapa olika asfaltprodukter för väganläggningar. (Peinado et al. 2011)

## 2.4 Den roterande torken

Roterande tork är en komponent som är en del av produktionsprocessen i asfaltverken. Torken används i en anläggning för varm asfaltblandning (HMA), för uppvärmning och torkning av aggregaten som används i asfalttillverkningen. Aggregat i asfaltblandningen doseras kallt från de lagringsbehållare de förvaras i till torkar, där de värms upp till en temperatur mellan 150 och 200°C. Torken är en kritisk komponent för att förbereda stenmaterialen inför asfaltblandningen. De flesta roterande tork drivs med flytande tung eldningsolja, naturgas, mikroniserat kol, träpulver etc, vilket har en enorm klimatpåverkan. Dock är det svårt att uppnå liknande resultat på temperaturen samt på upphetningstiden om torktrumman drivs av el från en förnybar energikälla. (Peinado et al. 2011)

## 2.5 Silos

### 2.5.1 Silos, bakgrund och eventuella problem 1

Att lagra pulver och granulärt material (t ex kol, cementmalm, etc ) i trattar och silos och dess flöde genom gravitation har länge varit av intresse för både akademiska och industriella kretsar. Trots att en silo kan verka som det mest lämpliga alternativet för lagring av bulkmaterial, kräver dess framgångsrika drift noggrann hänsyn till flera kriterier såsom storlek, materialval och modellering av flödesmönster. Författaren Saleh et al (2018) noterar att den ideala silon bör kunna rymma den nödvändiga mängden produkt på en minimal golvyta samtidigt som den säkerställer en regelbunden flödesprocess utan problem. Vissa problem som kan påverka den ideala bilden av en silo är *funnel flow*, *arching*, *rat-hole*, *dead zone formation*, *irregular flow*, *storage residence time*, *flooding*, *segregation*, *settling*, *caking*, *self-heating* och explosioner. För att uppnå den ideala konstruktionen krävs det att silons geometri väljs noga med tanke på hög lagringskapacitet och jämn partikelflödesprocess. För att uppnå den mest optimala och homogena komposition av innehållet i en silo krävs det förståelse för många olika faktorer. En av dessa faktorer är modelleringen av flödesmönster. (Saleh et al. 2018)

### 2.5.2 Flödesmönster inom silos

Termen flödesmönster förekommer i samband med tömningen av en silo och dess påverkan på hastighetsprofiler och ”Residence Time Distribution (RTD)”. Flödesmönstret skiljer sig betydligt mycket beroende på olika faktorer men faktorerna som spelar den viktigaste rollen är siloformen och öppningen.

För konvergerande kanaler/zoner, som koniska och kilformade trattar, tillåter radiallyt flöde partiklarna inom denna konvergerande zon att röra sig radiallyt utåt från centrum av zonen mot väggarna eller gränserna. Däremot är radiallyt flöde inte längre giltigt för cylindriska silos. Närvaron av olika zoner under tömningen av grova partiklar visade sig under flera experimentella studier. Dessa zoner inkluderar en långsam rörelsezona, en dilaterad kärna (dilated core), en död zon och en fritt fallande zon. Dessa zoner representerar olika faser av tömningen och påverkar flödets dynamik.

En zon som kan vara intressant att få lite djupare förståelse för är fritt fallande zonen. Det är en relativt liten zon där partiklarna förlorar kontakt med varandra och faller fritt. Denna zon spelar en viktig roll i gravitationsflöde av material och påverkar bland annat massflödesberäkning. Se bilagor, figur 1 & 2. (Saleh et al. 2018)

### **2.5.3 Stressfördelningen inom silos**

Att förstå stressfördelningen inom silor och deras betydelse för strukturell och mekanisk design, säkerställer en hållbar design som leder till eliminering av skador på silostrukturer under tömning. Det finns två huvudkategorier av stressfördelningsmodeller, de som beräknar statiska tryck och de som inkluderar övertryck under tömningen. Stressfältet uppstår i statiska tillstånd under fyllning medan i dynamiskt tillstånd under tömning. (Saleh et al. 2018)

## **2.6 Vilket material är mest lämplig att bygga silon i?**

Det finns ett brett utbud av byggmaterial som kan användas för att konstruera silon. Dock begränsas dessa val då det bulkmaterial som ska lagras i dem kräver hög beständighet och egenskapen att vara hållfast. De två huvudalternativen som kan uppfylla dessa krav är metall och betong.

### **2.6.1 Silos i armerad betong**

Liksom andra silos byggda av andra material uppfyller silos i armerad betong liknande funktioner. Dock har den typen av silos sina för- och nackdelar som kan leda till såväl minimal som enorma strukturella misslyckanden. Dessa misslyckanden beror på fler olika faktorer, exempelvis:

- Inre skador på skal-väggarna som kan leda till att fukt tränger sig in i skalväggarnas konstruktion och i sin tur utsätter armeringsjärnen för korrosion.
- Otillräcklig kunskap om betongsilokonstruktion och brist på detaljerade designstandarder. ”The four globally accepted silo design codes are British Standard BS EN 1991-4:2006, Australian Standard AS 3774-1996, American Society of Agricultural Engineers ANSI/ASAE EP433 DEC1988 (R2011), and American Concrete Institute ACI 313-97 “(Maraveas,2020). Dock har det pågått mycket arbete för att ta fram en designstandard som är en del av den europeiska standard Eurocode 3 del 4.2, dock omfattar den endast metallsilos och inte alla typer av silos. (Rotter 1998)
- Utformningen av betongsilorna påverkar deras långsiktig hållbarhet och integritet. Strukturen i sin helhet påverkas under tiden av faktorer såsom fyllnings- och

---

avlastningstryck. Är betongsilon placerad utomhus påverkas den dessutom av väderförhållanden samt termiska förhållanden.

- Den geologiska faktorn påverkar betongsilons stabilitet och hållbarhet vid placering på mindre porösa jordarter exempelvis: lerjord. Placeringen på mindre porösa jordarter kan leda till att silon utsätts för allvarliga risker i form av fundamentala misslyckanden. Misslyckanden förekommer i form av sprickbildning som inträffar vid tjällyftning. Fenomenet tjällyftning innebär att vattnet i grunden fryser och leder till att marken expanderar och orsakar skador på konstruktionen. Det beror helt och hållet på att dåligt dränerande jord eller de icke porösa jordarterna har höga fukt- kapaciteter.

### **2.6.2 Armerad betong som byggmaterial**

Betong är ett material som tillverkas genom att blanda olika naturresurser, Dessa naturresurser är begränsade. Därför är det viktigt att använda det på ett sätt som främjar hållbarheten. Betongstrukturer utgör en stor del av den nationella infrastrukturen i många länder och påverkar samhällets produktivitet i helhet. Därför betraktas försämringar av betongstrukturer som en utmaning för byggindustrin. Detta understryker vikten av att bygga hållbara betongstrukturer för att bevara den mänskliga säkerheten och minska miljöpåverkan.

Den dominerande typen av försämring som inträffar i armerade betongstrukturer är korrosion av armeringsjärnen i själva betongen. Dessutom finns det andra faktorer som kan leda till en försämring i betongstrukturernas långsiktiga prestanda, liksom frost-tö och alkali-aggregatreaktioner. Frost-tö är i princip cykler av frysning och upptining som på lång sikt kan orsaka skador genom att vattnet som destilleras efter frost expanderar och kontraherar inom betongen. Den expansionen leder till sprickbildning i betongen som i sin tur leder till en försämring av betongens hållbarhet. Alkali-aggregatreaktion leder till liknande försämringar, dock inträffar den när reaktivt kiseldioxidhaltigt aggregat reagerar med alkalier i betongen (Gjørsv 2011).

### **2.6.3 Att återvinna betong**

Enligt Lotfi et al. (2015) är bygg- och rivningsavfall en av de största avfallskategorierna inom EU. Avfallet från betong är ett av de dominerande materialen inom bygg- och rivningsavfall. Därför har behovet uppstått att hitta lösningar och tekniker för att återvinna betongavfallet med fokus på att minska klimatpåverkan och byggkostnaderna. En av dessa tekniker är C2CA, som står för "Concrete to Cement and Aggregate"

Lotfi et al (2015) presenterar denna återvinningsprocess som en av lösningarna som har forskats fram för att minska de höga volymer betong från avfall och omvandla det till högkvalitativa aggregat och cement för användning i ny betongproduktion.

C2CA är en betongåtervinnings teknik där delar av betongstrukturer nedmonteras och krossas i efterhand till aggregat och fint material i kornstorlek. Den mekaniska styrkan hos den återvunna aggregaten säkerställs genom att använda autogen fräsning, vilket är

---

ett steg i återvinningsprocessen där löst murbruk tas bort från ytan på aggregaten. Med hjälp av C2CA-tekniken kan dessutom  $CO_2$ -utsläppen minska vid cementproduktion.

#### **2.6.4 Silos i metall**

Metallsilos består av flera delar som samverkar för att bilda en gemensam skalstruktur, där olika typer av bulkmaterial och vätskor lagras. Belastningen från bulkmaterialen är komplicerad, men med tillräcklig kunskap och korrekt konstruktionsform kan metalliska silos uppfylla hållfasthets- och hållbarhetskraven. (Rotter 1998)

#### **2.6.5 Att bygga i rostfritt stål**

Rostfritt stål är ett järnbaserat material som används i olika sammanhang, ett av dessa sammanhang är strukturella tillämpningar. Det som kännetecknar rostfritt stål är kombinationen av mekaniska styrkefördelar som är karakteristiska för järnlegeringar, och den höga korrosionsbeständighet som främst uppstår på grund av dess höga innehåll av krom. (Minakshi Vaghani 2014).

Rostfritt stål är ett material som används särskilt i utmanande miljöer där den kan utsättas för olika väderförhållanden, såsom kustområden och industriella miljöer där korrosion kan vara ett bekymmer. Trots dess höga kostnad i jämförelse med andra metaller kan rostfritt stål vara ett kostnadseffektivare val. Detta beror på att rostfritt stål har en lång livslängd och kräver minimalt underhåll, vilket gör det till ett kostnadseffektivt val i strukturella tillämpningar (Dier, 1993).

Rostfritt stål förekommer i olika legeringar beroende på legeringens kromhalt. Dessa legeringar består huvudsakligen av järn, krom, nickel och i vissa fall molybden. Dessa olika legeringar ger upphov till tre huvudtyper av rostfritt stål, austenitiska, ferritiska och austenitisk-ferritiska (duplex). Där var och en har sina unika egenskaper som passar till olika användningsområden, exempelvis används austenitiska stål mest i arkitektoniska och strukturella sammanhang där den kännetecknas av sin mikrostruktur. Rostfritt stål jämförs ofta med kolstål när det gäller dess mekaniska egenskaper, eftersom rostfritt stål har en lägre proportionell gräns än kolstål. Den proportionella gränsen är den punkten där ett material börjar bete sig plastiskt under belastning. Det tyder på att rostfritt stål kan böja sig mer än kolstål innan det deformeras permanent. Denna skillnad innebär inte att rostfritt stål är mycket sämre i böj-motstånd, utan att de två olika materialen har annorlunda egenskaper och är bättre i vissa sammanhang och lite sämre i andra (Minakshi Vaghani 2014).

### **2.8 Designkriterier**

#### **2.8.1 Återanvändning i stället för återvinning**

Utvinningen av naturresurser bör minska rejält för att främja hållbarheten och minska det ohållbara trycket på miljön, vilket i sin tur skapar en mer hållbar framtid för de kommande generationerna. I den hållbara framtiden skall de kommande generationerna inte påverkas negativt av sättet vi utnyttjar naturresurserna. Enligt (Selvaraj and Chan 2024) står byggindustrin för 59% av utvinningen av naturresurser. Andelen anses öka

betydligt i framtiden med avseende på den globala infrastrukturutvecklingen. Därför är det viktigt att hitta alternativa lösningar för att minska miljöpåverkan som kommer från utarmning av naturresurser.

En lösning som presenteras av Selvaraj and Chan (2024), är direkt återanvändning av stålelement från gamla konstruktioner i nybyggnadsprojekt. Återanvändningsprocessen kommer att ersätta den nuvarande tekniken som går ut på att riva och sedan försöka återvinna materialen. Den nya tekniken leder till en minskning i miljöpåverkan, genom att undvika behovet av ny naturresursutvinning och energikrävande återvinning för att producera material. Selvaraj and Chan (2024) belyser vikten av att implementera principen för cirkulär ekonomi inom byggsektorn. Cirkulär ekonomi är ett system där resurser används effektivare genom att minska avfall och förlänga livslängden på produkter och material. Detta innebär att resurser återanvänds och återvinns i stället för att bara använda och slänga dem, vilket bidrar till att minska den negativa miljöpåverkan från byggindustrin och andra sektorer. Dessutom bidrar implementeringen av cirkulär ekonomi i byggindustrin till:

- Minskade koldioxidutsläpp: genom användning av alternativa tekniker som direkt återanvändning av konstruktionselement och utnyttjande av befintliga material.
- Effektivare resursanvändning: med hjälp av cirkulär ekonomi minskar beroendet av ny naturresursutvinning.
- Ökad produktivitet och lägre kostnader vid direkt återanvändning av befintliga strukturella element.

Liksom allt annat i världen har cirkulär ekonomi både fördelar och nackdelar. Selvaraj and Chan (2024) presenterar i sin rapport de nackdelarna som hinder och utmaningar, vilket kan fördröja implementeringen av cirkulär ekonomi i byggbranschen. Hindren delas i två huvudkategorier, ledningsmässiga hinder och tekniska hinder. Under lednings kategorin är de viktigaste hindren, dyr ”återanvändning process” och ”ovisshet om affärsmodell för cirkulär ekonomi”. I den tekniska kategorin är de viktigaste hindren, ovisshet om styrkan hos återanvända strukturella element och brist på designverktyg och vägledning för återanvändning av strukturella komponenter. Trots hindren som kan fördröja implementering av cirkulär ekonomi i byggbranschen, finns det flera potentiella lösningar och strategier för att övervinna dessa hinder. En av lösningar till de tekniska hindren är att införa standarder för icke-destruktiva testningsmetoder och certifieringssystem för återanvända strukturella element. Dessutom finns det flertal strategier och lösningar till ledningsmässiga hinder, exempelvis: Utveckling av affärsmodeller som beaktar kostnadsbedömning för demontering och återanvändning samt samordning mellan intressenter inom byggsektorn.

### **2.8.2 Transportföreskrifter**

Valet att återanvända silon i stället för att återvinna dem kräver att de är utformade för enkel transport. Det är essentiellt att förstå de regler och krav som styr transporten för att säkerställa smidiga och säkra transporter. Enligt Transportstyrelsens föreskrifter får

transport av bred odelbar last med en total bredd på högst 350 centimeter utföras med ett lämpligt fordon eller fordonståg på vägen. Lasten skall vara placerad på ett sätt som minimerar dess skjutning i sidled. Dessutom måste fordonet vara korrekt utmärkt med varningsskyltar, breddmarkeringsskyltar och andra nödvändiga varningsanordningar. Föraren måste vara medveten om färdens krav och begränsningar, inklusive bestämmelser om tidpunkt, sikt och kommunikation med andra fordon i närheten. För transport av lång last som inte kan delas i två eller flera delstater får längden på lasten vara högst 30 m.

### **Största tillåtna bredd**

“5 § Trots 4 kap. 15 § trafikförordningen (1998:1276) får vid transport av bred odelbar last, fordonets eller fordonstågets bredd inklusive last vara högst 350 centimeter. Undantaget gäller endast om villkoren i 6–34 §§ är uppfyllda. Är bredden högst 310 centimeter gäller dock endast villkoren i 6–19 §§ för undantaget. Ska transporten ske på väg eller gata enligt bilaga 1 får bredden vara högst 310 centimeter.”

### **Lastens placering**

“6 § Lasten ska vara placerad på sådant sätt att den i sidled skjuter ut så lite som möjligt utanför fordonet. “

### **Framkomlighet**

“7 § Innan färden påbörjas ska föraren ha förvissat sig om att färdvägen 1. är framkomlig med hänsyn till vägarbeten, hinder i höjd- och sidled och andra liknande förhållanden som kan förutses, och 2. inte berörs av föreskrifter som begränsar den största tillåtna bredden på fordon.”

### **Utmärkning**

“8 § I den utsträckning som föreskrivs i 9, 12–14 och 17 §§ ska fordon eller fordonståg som transporterar bred odelbar last vara försedda med varningslykter och utmärkta med andra lykter, breddmarkeringsskyltar, varningsskyltar och reflexer. Skyltar, lykter och reflexer ska vara i ett sådant skick att de kan upptäckas och förstås av andra trafikanter. Breddmarkeringsskyltar och varningsskyltar ska vara väl synliga framifrån och bakifrån. Vid färd under mörker, i skymning eller gryning och i övrigt när det är påkallat av väderleken eller andra omständigheter ska skyltarna vara belysta.”

### **Största tillåtna längd**

”6 § Trots 4 kap. 17 § trafikförordningen (1998:1276) får vid transport av lång odelbar last, fordonets eller fordonstågets längd inklusive last vara högst 30,0 meter. Undantaget gäller endast om villkoren i 7–21 §§ är uppfyllda”. (Transportstyrelsen, 2023)

---

## 3 Värmeisolering

### 3.1 Vad är värmeisolering?

Termisk isolering är material eller en kombination av material som har till en uppgift att minska värmeöverföringen mellan fasta föremål, vätskor eller gaser genom att införa en barriär mellan dem. Alltså det fördröjer värmeöverföringen in i eller ut ur en byggnad på grund av dess höga termiska resistans. (Al-Homoud 2005 & Concept Group LLC)

### 3.2 Hur fungerar värmeisolering?

Värmeisolering fungerar genom att begränsa värmeöverföringens hastighet mellan objekt. Detta uppnås genom att använda material med låg värmeledningsförmåga och genom att förhindra konvektion och strålning. Isoleringmaterial skapar små luftfickor som bromsar värmeöverföring, och stängda cellstrukturer minskar strålningsöverföring. Ångspärrar används för att förhindra fuktgenomträngning. Kombinationen av dessa mekanismer avgör isoleringens effektivitet.

Förutom termisk ledningsförmåga eller även kallat värmeledningsförmåga betecknas  $\lambda$ , finns det andra fysiska egenskaper som kan vara relevanta vid valet av isoleringsmaterial. Dessa inkluderar:

- Densitet  $\rho$
- Tjocklek  $d$
- Specifik värmekapacitet  $c_p$
- Termiskt motstånd  $R$
- Termisk diffusivitet  $\alpha$

### 3.3 Vad är termisk konduktivitet?

Termisk konduktivitet även kallat värmeledningsförmåga betecknas  $\lambda$ -värde. Enligt Al-Homoud (2005), definieras värmeledningsförmåga som tidshastighet med vilken värme överförs genom ett homogent material när det befinner sig i ett stationärt tillstånd. Det mäts i enheten watt per meter per Kelvin ( $W/mK$ ) och är ett viktigt mått på ett materials förmåga att leda värme. Genom att förstå värmeledningsförmågan kan man jämföra olika material och bedöma deras effektivitet som värmeisolering. Det är viktigt att poängtera att värmeledningsförmågan är beroende av materialets medeltemperatur och fuktinnehåll, vilket gör det till en nyckelfaktor vid valet av lämpliga isoleringsmaterial för olika tillämpningar och användningsområde. Ju lägre värdet av  $\lambda$  (lambda), desto bättre prestanda när det gäller att isolera värme.

Matematiskt uttrycks detta som:

$$\lambda - \text{värde} = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad [\text{Ekv. 1}].$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

### 3.4 Vad är termiskt motstånd?

Termiskt motstånd även kallat värmemotstånd är ett mått på hur bra eller dåligt ett material kan leda värme, alltså ett mått på motståndet av värme flöde på grund av olika processer såsom ledning, konvektion och strålning. Termiskt motstånd, mätt i kvadratmeter per Kelvin per watt ( $m^2 \cdot k/W$ ), är starkt beroende av materialets egenskaper såsom värmeledningsförmåga, tjocklek och densitet Al-Homoud (2005).

Matematiskt uttrycks detta som:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [Ekv. 2]$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

### 3.5 Vad är värmekapacitet?

Värmekapacitet är den mängd energi som krävs för att höja temperaturen på ett specifikt ämne med en grad Celsius. Det kan också ses som förhållandet mellan den mängd energi som överförs till ett objekt och den resulterande temperaturökningen. Enheten för värmekapacitet är Joule per grad Celsius ( $J/^\circ C$ ). (Värmekapacitivitet - Mängden Energi För Att Värma Upp Ett Kilo En Grad, 2021)

Matematiskt uttrycks detta som:

$$Q = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \quad [Ekv. 3]$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

där Q representerar mängden värmeenergi som överförs, m är ämnets massa, c är ämnets specifika värmekapacitet och  $\Delta T$  är temperaturförändringen.

### 3.6 Vad är specifik värmekapacitet?

Specifik värmekapacitet är den mängd energi som behövs för att höja temperaturen på en viss mängd av ett ämne med en grad Celsius. Material med hög specifik värmekapacitet har god lagringsförmåga, dvs det tar tid för materialet att absorbera värme innan dess temperatur höjs, och den lagrade värmen kan senare nyttjas. Det är alltså en egenskap hos material som ger termisk massa och mäts vanligtvis i joule per kilogram per Kelvin ( $J/kg \cdot k$ ). (GreenSpec, 2024. Insulation materials - thermal properties)

Matematiskt uttrycks detta som:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad [Ekv. 4]$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

### 3.7 Vad är densitet?

Densiteten är förhållandet mellan ett materials massan och dess volym. Densitet uttrycks i enheter som kilogram per kubikmeter ( $kg/m^3$ ) eller gram per kubikmeter ( $g/m^3$ ). Hög densitet innebär att ett material har låg termiska diffusivitet samt hög termiska massa,

vilket i sin tur kan leda till att lagra värme väl och reagera långsamt på temperaturförändringar. (GreenSpec, 2024. Insulation materials - thermal properties)

Matematiskt uttrycks detta som:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [Ekv. 5]$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

### 3.8 Vad är termiska diffusivitet?

Termiska diffusivitet mäter materialets förmåga att leda värmeenergi i förhållande till dess förmåga att lagra eller hålla värmeenergi. Det är en viktig faktor att ta hänsyn till vid val av material för ju lägre värde på termiska diffusivitet ett material har, desto trögare sprids värme genom den. (GreenSpec, 2024. Insulation materials - thermal properties)

Matematiskt uttrycks detta som:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [Ekv. 6]$$

*Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018)*

### 3.9 Vilka fördelar kan uppnås genom användning av värmeisolering?

Värmeisolering i byggnader eller i andra användningsområde kan erbjuda en rad fördelar. För det första minskar den behovet av mekaniska eller elektriska system för att upprätthålla komfort, vilket sparar energi och resurser. Ekonomiska fördelar inkluderar betydande energibesparingar med låga driftkostnader se figur 3.1. Dessutom minskar isoleringen miljöpåverkan genom att minska utsläpp och främja resurseffektivitet. Andra fördelar inkluderar förbättrad kundnöjdhet, ökad termisk komfort, minskad bullernivå, bibehållen byggnadsstruktur, förebyggande av kondensation och förbättrat brandskydd.

## KEY BENEFITS OF BUILDING INSULATION



*Figur 3.1 Viktiga fördelar med att använda byggnadsisolering. Monodomiki.Gr (2024).*

---

## 4 Byggnadsisolering

Global energikonsumtion förväntas öka med 53 % inom de kommande tio åren, en ökning drivet av industriell och urban aktivitet samt befolkningsökning. Byggnadsisolering identifieras som en effektiv metod för att minska denna ökning genom att begränsa värmeförluster i byggnader. Materialval, livscykelanalys och användning av lämpliga isoleringsmaterial betonas som avgörande faktorer för att uppnå energieffektivitet och minska miljöpåverkan. Alltså byggnadsisolering anses vara en viktig aspekt för energibesparande metod samt minskar den negativa miljöpåverkan från växthusgasen som byggnader släpper ut. Isolering är material som används för att minska hastigheten av värmeutsläpp/värmeupptag genom det avsedda inneslutna utrymmet. (Aditya et al., 2017)

### 4.1 Vad är god byggnadsisolering?

Byggnadsisolering är en term som vanligtvis syftar till att tillämpa material eller tekniker för att minimera eller begränsa överföringen av värme från den ena sida till den andra. Men när vi pratar om byggnadsisolering så handlar det inte bara om att klimatskalet som ska isoleras, utan även många andra installationer kräver god isolering för att fungera optimalt. (Swedisol, 2024)

En god isolering bidrar till många andra viktiga aspekter och innebär följande egenskaper:

- Väl isolerad – avser isoleringsmaterial med lågt  $\lambda$  – värde.
- Lång livslängd
- Återvinningsbar
- Brandskydd
- Ljudisolerande
- Fuktsäker
- Säker att använda

### 4.2 Byggisoleringsmaterial

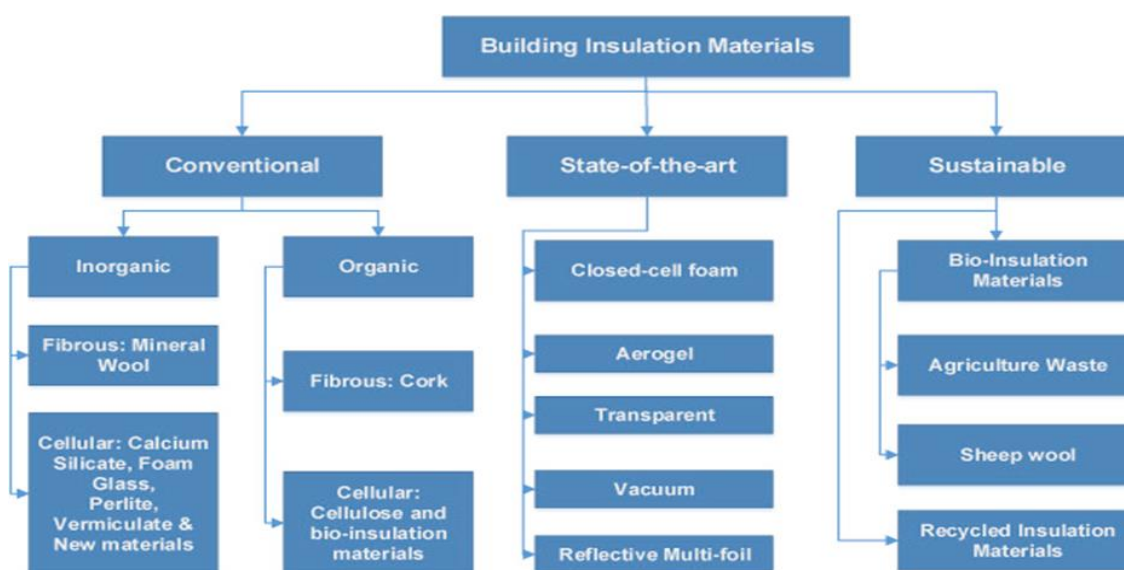
Isoleringsmaterial i byggnader spelar en avgörande roll för att förbättra byggnaders energieffektivitet och miljöprestanda (Salihbegović & Salihbegović, 2020). Dessa material är konstruerade för att reducera värmeöverföring genom väggar, tak och golv, vilket minskar behovet av konstgjord uppvärmning eller kylning. Genom att använda innovativa och energieffektiva isoleringsmaterial, såsom återvunnet papper, tyger som strimlade jeans och extruderad polystyrenvärmesolering, kan byggare markant minska energianvändningen och utsläppen av växthusgaser inom byggsektorn (Życzyńska et al., 2020).

Dessa isoleringsmaterial bidrar inte bara till att spara pengar för byggnadsägare, utan de främjar också en hälsosammare och mer hållbar miljö. Förutom att förbättra energieffektiviteten erbjuder byggnadsisoleringsmaterial även många andra fördelar se avsnitt 4.1. Genom att använda högkvalitativa isoleringsmaterial kan byggare skapa mer

bekväma och miljövänliga bostäder eller arbetsutrymmen för de boende. Dessutom kan dessa material bidra till de övergripande ekonomiska fördelarna med gröna byggnader. Till exempel minskar användningen av naturligt dagsljus i kontorsbyggnader inte bara energikostnaderna utan ökar också produktiviteten hos arbetarna.

Det är också viktigt att beakta faktorer utöver bara byggnadens fysiska egenskaper. Drift och underhåll, boendes beteende och inomhusmiljö har också en betydande inverkan på byggnadens prestanda. Att ta hänsyn till dessa faktorer är avgörande för att skapa hållbara och effektiva byggnader för framtiden.

Byggisoleringsmaterial klassificeras i tre huvudtyper inkluderar:



Figur 4.1 Klassificering av byggnads isoleringsmaterial. Kumar D, Alam M, Zou PXW, Sanjayan J and Memon RA, (2020).

### 4.3 Konventionella isoleringsmaterial

Konventionella isoleringsmaterial är material som redan finns på marknaden och används ofta i byggnader. Det betonas också att dessa material kan delas in i två huvudkategorier: organiska och oorganiska isoleringsmaterial. Se figur 4.1

#### 4.3.1 Organiska isoleringsmaterial

Organiska isoleringsmaterial är en typ av konventionell isolering som härstammar från kolhaltiga föreningar, närmare bestämt naturliga växtmaterial och förnybara resurser. Exempel på organiska isoleringsmaterial inkluderar träull, cellulosa, expanderad gummi, träfiber, polystyren och fårull. Det finns en ökande popularitet för organiska isoleringsmaterial på grund av deras attraktiva egenskaper, såsom förnybarhet, återvinningsbarhet, icke-toxicitet, miljövänlighet och krav på låg energiförbrukning vid produktion. Trots fördelarna med organiska isoleringsmaterial bör noteras att oorganiska isoleringsmaterial vanligtvis erbjuder högre termiska isolerings egenskaper och kan vara mer kostnadseffektiva men ha samma termiska prestanda. Aditya et al. 2017.

---

### 4.3.2 Oorganiska isoleringsmaterial

Till skillnad från organiska isoleringsmaterial är oorganiska isoleringsmaterial baserade på icke-förnybara resurser, men de utnyttjar rikligt tillgängliga material. Exempel på oorganiska isoleringsmaterial kan vara mineralull, såsom stenull, glasull och slaggull, anses vara ett typiskt exempel på oorganiskt isoleringsmaterial. Dessutom innefattar oorganiska cellulära isoleringsmaterial, kalciumsilikat, skumglas, perlit och vermikulit.

### 4.4 Toppmoderna isoleringsmaterial

Enligt Kumar et al. (2020), befinner sig toppmoderna isoleringsmaterial fortfarande i forsknings- och utvecklingsstadiet med begränsad kommersiell produktion. Dessa material kännetecknas av avancerade egenskaper, såsom låg värmeledningsförmåga, men kan vara förknippade med högre kostnader.

Några av de toppmoderna isoleringsmaterialen inkluderar:

**Stängt cellskum:** Ett isoleringsmaterial med en struktur där cellerna är helt stängda, vilket förhindrar luft- eller gaspenetrering.

**Aerogeler:** Ett extremt lätt material med exceptionell värmeisoleringsförmåga, ofta kallad "frusen rök".

**Gasfyllda paneler:** Paneler fyllda med gaser som argon eller krypton för att minska värmeöverföringen.

**Transparenta isoleringsmaterial:** Material som kombinerar värmeisolerering med transparens, lämplig för användning i fönster eller andra transparenta ytor.

**Vakuumisoleringspaneler:** Paneler med mycket lågt tryck inuti för att minimera värmeöverföring genom ledning och konvektion.

**Reflekterande multifolieisoleringsmaterial:** Lager av reflekterande material för att avleda värmeenergi och minska värmeöverföringen.

**Nano isolerande material:** Använder nanoteknik för att skapa material med överlägsen isoleringsförmåga på mikroskopisk nivå.

**Dynamiska isoleringsmaterial:** Material vars isolerings egenskaper kan justeras eller anpassas beroende på behov eller yttre förutsättningar.

### 4.5 Hållbara isoleringsmaterial

Hållbara isoleringsmaterial utmärker sig genom att ha minimal miljöpåverkan under produktionsfasen. Enligt Kumar et al. (2020) framhåller dessa material sin överlägsenhet när det gäller miljöpåverkan jämfört med andra typer av isoleringsmaterial, särskilt under produktionsskedet. Denna slutsats belyser den betydande miljövänliga karaktären hos hållbara isoleringsmaterial.

Naturliga isoleringsmaterial utgör en viktig kategori och inkluderar material som härstammar från jordbruks- och skogsrester samt fårull. Deras naturliga ursprung bidrar till att minska den övergripande miljöpåverkan. Återvunna isoleringsmaterial utgör en annan viktig del av hållbar isolering och omfattar vanligtvis cellulosa, gummi,

bomullsavfall, polystyrenfibrer och glasfibrer. Dessa material representerar ett steg mot en cirkulär ekonomi och minskar behovet av att nyttja nya resurser.

#### 4.6 Vanligaste typerna av värmeisoleringsmaterial och deras egenskaper

I detta avsnitt presenteras några utvalda byggisoleringsmaterial, en djupare beskrivning av de mest förekommande typerna av värmeisoleringsmaterial, deras karakteristiska egenskaper, användningsområde samt för- och nackdelar. Genom en omfattande studie av mineralull, cellglas, cellulosa, aerogeler, polyuretan och vakuumisoleringspaneler avser vi att kartlägga deras termiska egenskaper och strukturer. Denna vetenskapliga genomgång syftar till att belysa de material som uppvisar optimala egenskaper för hållbar värmeisolering och som kan bidra till en mer klimatneutral miljö. Dessutom är syftet att förstå skillnaderna mellan materialen och identifiera vilka som är mer lämpliga och mindre lämpliga för tillämpning inom författarnas design och simulering.

Byggnadsisoleringsmaterial spelar en viktig roll för att förbättra energieffektiviteten i byggnader och upprätthålla bekväma inomhusmiljöer och det är lika viktigt att detta tillämpas i byggbranschen som i alla andra industrier för att kunna röra oss mot en hållbar och klimatneutral värld (Nemry et al, 2010). Enligt författaren Al-Homoud MS (2005), finns det inget enskilt isoleringsmaterial som är bäst i alla avseenden. Olika material har olika styrkor och svagheter.

##### 4.6.1 Mineralull

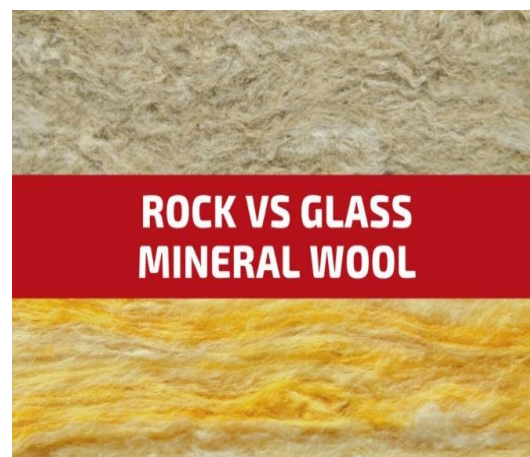
**Egenskaper:** Mineralull tillhör typen oorganiskt isoleringsmaterial och finns bland annat som lösull, fasta skivor, isolermattor och rörisolering. Enligt Kowatsch (2010) finns det tre typer av mineralull, och dessa består av stenull, glasull samt slaggull. Men de främsta är glasull och stenull. Se figur 4.2.

Glasullen, som beskrivs av företaget (ISOVER Sverige 2024), kännetecknas av sin låga vikt, flexibilitet och goda hållfasthet. Den används främst i mjuka isoleringsprodukter såsom mellan trä- och stålreglar, rörsålar och teknisk isolering.

Stenull används i situationer där höga temperaturer eller hög tryckhållfasthet krävs. Tillverkad genom att smälta och spinna stenråvara till tunna trådar, behandlas den sedan med bindemedel och kapas till önskad form. Dess egenskaper, inklusive värmemotstånd och brandklassificering, gör den lämplig för olika bygg- och teknikapplikationer. Dock betraktas stenull som den säkraste ur ett brandskyddsperspektiv. (Bärtås 2022)

$\lambda - \text{värde} = 0,030 - 0,050 (W/m\ k)$ , intervallvärden för både typerna av mineralull. (Aditya et al., 2017) & (Kumar et al. 2020)

$\rho_{\text{stenull}} = 40 - 200 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ ,  $\rho_{\text{glasull}} = 10 - 100 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ . Enligt Kumar et al. (2020)



Figur 4.2 Bild på stenull vs glasull. Danzey-Smith G, (2023)

$$C_p = 800 - 1000 \left( \frac{J}{kgK} \right). \text{ Enligt Kumar et al. (2020)}$$

**Användningsområde:** I väggar, tak, bjälklag samt installationer. Finns också skivor som kan användas som markisolering, till exempel under betongplattor. (Papadopoulos 2005)

**Fördelar:** Utmärkt isoleringsförmåga till ett överkomligt pris och uppfyller de flesta önskvärda egenskaper för effektiv isolering. (se avsnitt 4.1) Mineralull är ett populärt isoleringsmaterial på grund av dess utmärkta brandbeständighet och akustiska egenskaper (Su & Zhang, 2012)

**Nackdelar:** ”Mineralull betraktas av många felaktigt som okänsligt material när det gäller fukt. Typiska luktbeskrivningar som dyker upp vid höga fuktnivåer är räkskaldsdoft som härrör från tillsatsmedel vid produktionen vid mineralull. En uppenbar nackdel vid en ev. uppfuktning i produkten är att fuktkapaciteten är låg. Det innebär att små mängder vatten kan höja relativa luftfuktigheten till känsliga nivåer”, Alltså mineralull, trots att den ofta betraktas som okänslig för fukt, faktiskt kan absorbera fukt och avge en obehaglig lukt. Dess låga fuktkapacitet innebär att även små mängder vatten kan höja luftfuktigheten till skadliga nivåer. (Hållbara Hus - Fakta Om Mineralull, 2019)

#### 4.6.2 Cellglas / Skumglas

**Egenskaper:** Cellglas är ett organiskt material som är tillverkat av glas och kol som i en värmeprocess jäser och bildar miljontals små celler med en sluten struktur. Efter framställningen skärs materialet till block eller skivor, beroende på användningsområde se figur 4.3. Den är värmetålig, suger inte åt sig fukt och har hög tryckhållfasthet samtidigt som det är lätt att bearbeta. (Vad Är Cellglasisolering? 2024)

$$\lambda - \text{värde} = 0,038 \left( \frac{W}{mK} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

$$\rho_{\text{stenull}} = 100 - 200 \left( \frac{kg}{m^3} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

$$C_p = 210 \left( \frac{J}{kgK} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

**Användningsområde:** I väggar, tak, rör och grunder. Fungerar utmärkt som bärande material. (Papadopoulos 2005)

**Fördelar:** Ett hållbart återbruksmaterial som är både miljövänligt och har en lång livslängd, samtidigt som det är brandsäkert, tål tryck och är motståndskraftigt mot fukt. (Bärtås, 2022)

**Nackdelar:** Tillverkningen av detta material kräver en del energi, och dess isoleringsprestanda är något lägre än för konventionella isoleringsmaterial. (Bärtås, 2022)



Figur 4.3 Cellglasisolering i olika former. GLT Products, (2024)

### 4.6.3 Cellulosa

**Egenskaper:** Cellulosaisolering är ett organiskt isoleringsmaterial och är tillverkat av återvunnet material, vilket gör det till ett miljövänligt val. Det är också effektivt för att minska luftläckage och har bra termisk prestanda. Det kan dock vara benäget att absorbera fukt och kan kräva ytterligare åtgärder för att förhindra mögeltillväxt. Cellulosaisolering kräver också professionell installation, vilket ökar den totala kostnaden. (Hurtado et al., 2016)



*Figur 4.4 Cellulosaisolering i takvinden. ISOLERAB, (2022)*

Cellulosaisolering finns både som lösull och i fasta skivor. Används främst som lösull. Finna två olika typer – träfiber och pappersull. Cellulosa har en förmåga att ta upp fukt från omgivningen utan att vara i direkt kontakt med vatten. Även om det finns vissa positiva effekter av det, går det inte att säga att Cellulosan för att förhindra mögel och även materialets brandmotstånd.

$$\lambda - \text{värde} = 0,037 - 0,042 \left( \frac{W}{mK} \right). \text{ Enligt (Kumar et al. 2020)}$$

$$\rho = 30 - 80 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right). \text{ Enligt (Kumar et al. 2020)}$$

$$C_p = 1300 - 1600 \left( \frac{J}{\text{kgK}} \right). \text{ Enligt (Kumar et al. 2020)}$$

**Användningsområde:** I väggar, bjälklag och tak. Se figur 4.4 för hur Cellulosa installeras i vindsbjälklaget. (Papadopoulos 2005)

**Fördelar:** Cellulosaisolering är mycket lufttät och har hög densitet, vilket ger effektiv isolering med hög värmekapacitet.

**Nackdelar:** Jämfört med traditionella fibrer har cellulosaisolering vissa nackdelar som begränsar dess bredare användning i bygg- och renoveringsprojekt. Dess höga hygroskopisitet samt användning av icke-miljövänliga borater för att minska brandrisken. Dessutom risk för mögeltillväxt är faktorer som kan påverka dess lämplighet och hållbarhet över tid (Hurtado et al., 2016) & (Goda Gärningar, 2021).

#### 4.6.4 Aerogeler

**Egenskaper:** Aerogeler tillhör toppmoderna isoleringsmaterial, är ett material med mycket låg densitet och hög porositet, vilket gör det extremt lätt och effektivt för isolering. Det består främst av luft, upp till 90 %, och kan användas för tunnare isolering i byggapplikationer för energieffektivitet och minskad väggjocklek. Dess höga porositet ger också bra fuktreglering för en bekväm inomhusmiljö. Aerogeler blandas vanligtvis med andra material som puts, mineralull eller fibrer. (Göth, A. 2017) & (Kumar et al. 2020)



Figur 4.5 Aerogeler. Falak A, 2024

$$\lambda - \text{värde} = 0.013 - 0.021 \left( \frac{W}{mK} \right). \quad (\text{Kumar et al. 2020})$$

$$\rho = 70 - 150 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right). \quad (\text{Kumar et al. 2020})$$

$$C_p = 1000 \left( \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right).$$

**Användningsområde:** Olika former av Aerogeler visas i figur 4.5, men än så länge är Aerogeler i utvecklingsstadiet och används inte i någon större utsträckning. De produkter som finns är i regel uppblandade med andra material, till exempel puts, mineralull eller andra fibrer. (Papadopoulos 2005)

**Fördelar:** Aerogeler är ett mycket effektivt isoleringsmaterial med utmärkt värmeprestanda. De är extremt lätta och har låg värmeledningsförmåga.

Absorberar höga temperaturer och vibrationer utan att förlora form eller effektivitet. Ger tunnare isoleringslager för enklare installation och underhåll. Skyddar mot fukt, korrosion. Bidrar till ökad energieffektivitet och minskade kostnader över tiden. (Firwin, 2023)

**Nackdelar:** Aerogeler kan dock vara dyra och ömtåliga, vilket gör dem mer lämpade för specialiserade applikationer (What is Aerogel? 2021).

#### 4.6.5 Polyuretan

**Egenskaper:** Polyuretan eller så kallad PUR är ett organiskt isoleringsmaterial. Det är ett mångsidigt material med låg vikt, hög styrka och utmärkta isolerings egenskaper. Det skapas genom att blanda polyol och isocyanat för att bilda polyuretanskum, som finns i både öppna och slutna celler. Materialet finns både som skivor och som skum. Polyuretanskummet sväller och expanderar och skapar på så sätt god utfyllnad. (Vad är Polyuretan?, 2024)



Figur 4.6 Polyuretan i skumform. Proconizo.Az, (2024).

$$\lambda - \text{värde} = 0.022 - 0.035 \left( \frac{W}{mK} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

$$\rho = 30 - 160 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

$$C_p = 1300 - 1450 \left( \frac{J}{\text{kgK}} \right). \text{ (Kumar et al. 2020)}$$

**Användningsområde:** Används bland annat vid isolering av kylskåp, fjärrvärmerör och andra installationer. Skivor används främst i sandwichelement och i paneler. Skum kan även sprutas på plats i byggnadens konstruktionsdelar (tak, väggar, grund) se figur 4.6. (Papadopoulos 2005)

**Fördelar:** Polyuretanisolering är känd sin tålighet mot fukt, mögel och brand. Dessutom är materialet lätt att hantera tack vare dess flexibilitet. Den är också mångsidig och kan användas i olika applikationer som byggnadsisolering, apparater och transporter. (Engels et al., 2013) & (Bärtås, 2022)

**Nackdelar:** Prisnivån för polyuretan är högre än för konventionella isoleringsmaterial (Bärtås, 2022).

#### 4.6.6 Vakuumisoleringspaneler (VIP)

**Egenskaper:** Vakuumisoleringspaneler, eller VIP tillhör toppmoderna isoleringsmaterial. Denna typ av isolering utgör idag en av de mest avancerade formerna av värmeisoleringsmaterial tillgängliga på marknaden. I jämförelse med konventionella isolerings typer såsom mineralull och cellplast, visar VIPs enastående prestanda med en betydligt lägre värmeledningsförmåga, vanligtvis mellan 0,002 och 0,005  $\left(\frac{W}{mK}\right)$ . Även efter 25 års användning och exponering för luft och vattenånga, bibehåller de fortfarande en imponerande termisk effektivitet på ungefär 0,008  $\left(\frac{W}{mK}\right)$ . (Jelle, 2016)

Kärnan i VIP:s består ofta av isolerande material såsom silikagel eller pyrogena kiseldioxidpartiklar, placerade inuti en vakuumsförseglad påse eller en metallbehållare. Denna design minimerar värmeledning genom att eliminera luft och därigenom förhindrar konvektion och konduktion, vilket resulterar i en extremt hög termisk resistans.

$\lambda$  – värde = 0.0035 – 0.008  $\left(\frac{W}{mK}\right)$ . (Kumar et al. 2020)

$\rho$  = 160 – 230 (Kg/m<sup>3</sup>). (Kumar et al. 2020)

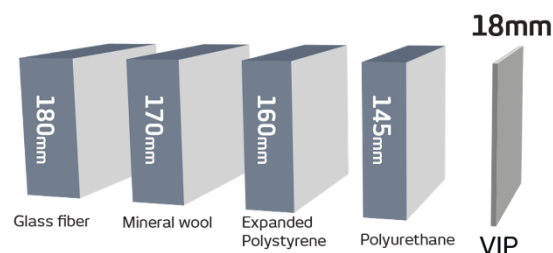
$C_p$  = 800 (J/kgK). (Kumar et al. 2020)

**Användningsområde:** Framför allt används det i specialkonstruktioner och i trånga utrymmen. Det finns tillgängligt som lösa paneler och sandwichpaneler för tak, väggar och golv.

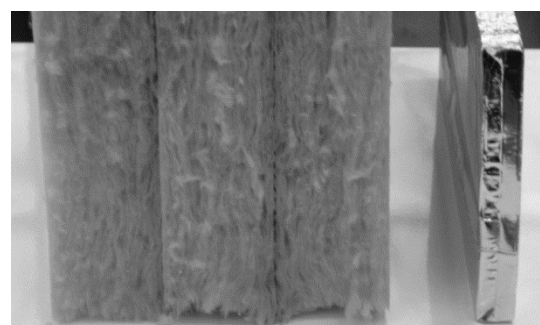
**Fördelar:** Extremt bra isoleringsförmåga eller så kallat superisolerande material, flexibelt, brandsäkert och miljövänligt (kan återanvändas). (Bärtås, 2022)

VIP:er utmärker sig genom sin termiska effektivitet, med minimal värmeledning tack vare deras luftfria design, vilket ger långsiktig prestanda. Deras smala profil sparar utrymme och kostnader vid byggande se figur 4.7 & 4.8, samtidigt som de är lätta, hållbara och motståndskraftiga mot fukt. VIP:er bidrar till energibesparingar och miljöskydd med sina mångsidiga tillämpningar och återvinningsbara komponenter. (Insulation Superstore, 2024)

**Nackdelar:** Kostnaden för VIP isolering är betydligt högre än för traditionella isoleringsmaterial, vilket begränsar dess användning. VIP isolering är känsliga för mekanisk skada. En punkterad panel kan förlora sitt vakuum och därmed öka dess värmeledningsförmåga (Bärtås, 2022).



Figur 4.7 VIP tjocklek jämfört med andra isoleringsmaterial. (D Avery, (2022)



Figur 4.8 En jämförelse i tjocklek mellan mineralull och vakuumisoleringspanel med likvärdig termisk prestanda. (Tenpieriik and Cauberg 2007)

---

## 5.0 Metod / Genomförande

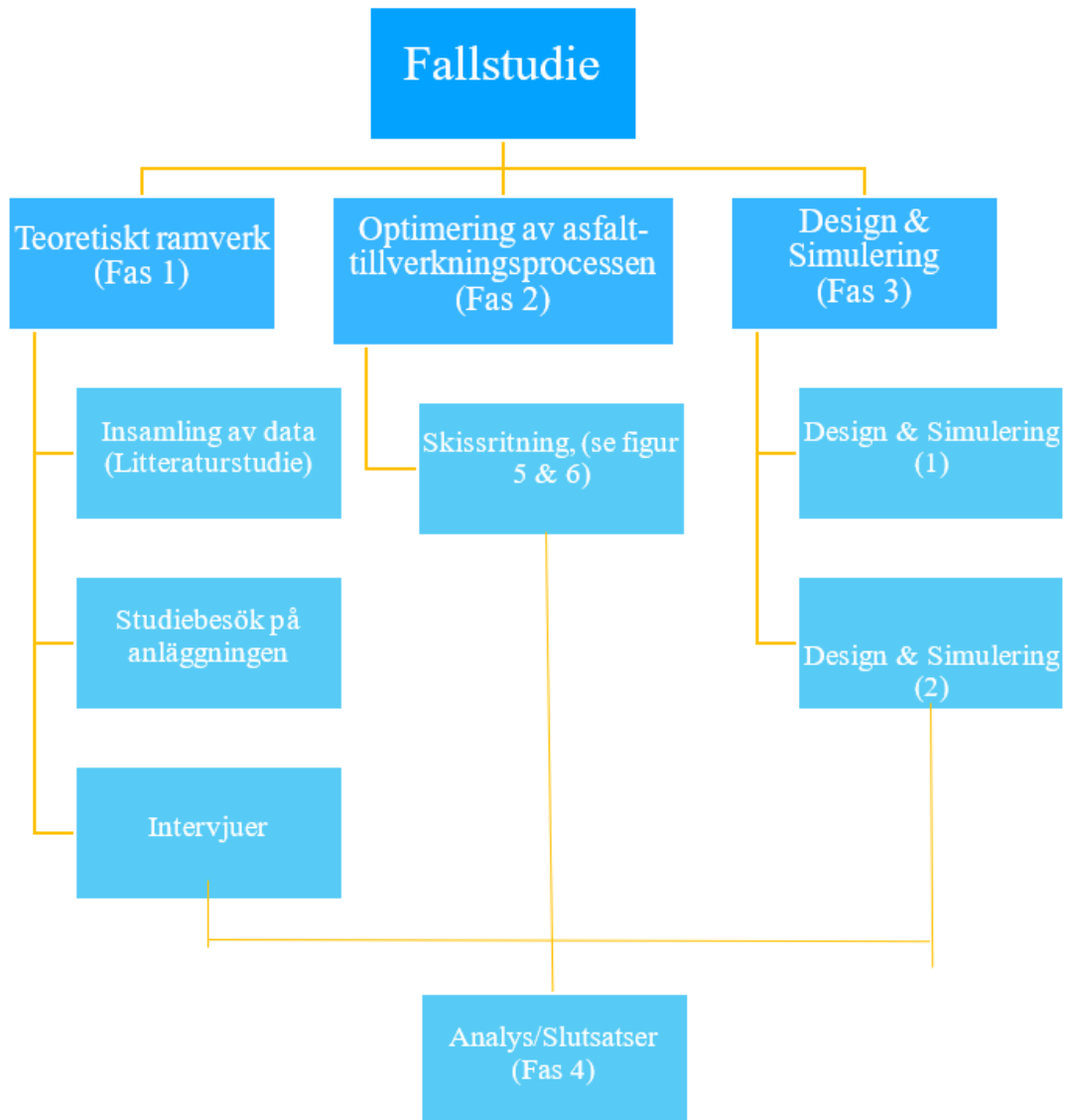
Syftet med detta kapitel är att förklara hur författarna har arbetat i detta examensarbete med litteratursökning, datainsamling och design & insamling av parametrar för vidare energiberäkningar i studien.

### 5.1 Arbetssätt

Arbetet har genomförts i samarbete med Skanska Industrial Solutions för att utforska potentialen för energieffektivisering av torkningsprocessen vid asfalttillverkning. En central aspekt har varit att undersöka möjligheten att lagra värme genom implementering av lagringsbehållare, där stenmaterialet kan förvaras vid höga temperaturer med hjälp av förnybar energi och sedan utnyttjas i tillverkningsprocessen. Diskussioner har förts angående olika tillämpningar för värmelagring, inklusive design av lagringsanordningar och val av lämpliga material såsom stål och byggisolering.

För att besvara forskningsfrågorna har en kombination av kvalitativa och kvantitativa metoder genomförts, inklusive intervjuer med experter från Skanska såsom andra företag och flera besök på asfaltverket i Sperlingsholm, Halmstad för att samla in data om lagring av asfalt, produktionsmängder och andra relevanta parametrar. För analys av studien kommer mjukvaran COMSOL Multiphysics att användas för design samt jämföra temperaturförändringar över tid. Minst två olika designalternativ och simuleringar/matematiska modeller kommer att studeras baserat på design och materialegenskaper för att beräkna den mest effektiva temperaturhållningen över tid. Denna metodik möjliggör en noggrann och vetenskaplig strategi för att bedöma hur effektiva olika system för värmelagring är vid tillverkning av asfalt.

Arbetssättet i detta examensarbete kan indelas i fyra faser (enligt Figur 5.1). Fas ett är teoretisk ramverk som i sin tur är indelad på följande sätt: insamling av data (Litteratursökning), intervjuer och studiebesök har genomförts som underlag för teoriavsnittet, fas två är optimering av asfalttillverkningsprocessen, som består av en skiss över hur ett framtida asfaltverk skulle kunna se ut efter implementering av stenmaterialets förvaringsbehållare. Fas 3 går ut på att undersöka temperaturhållning hos två olika design & simuleringar, alltså resultatet och slutligen fas 4 är analys och slutsatser, i denna del kommer vi att analysera och dra våra slutsatser baserat på de första tre nämnda faserna i arbetssättet.



*Figur 5.1* Arbetsättet för examensarbetet i form av WBS.

---

## 5.2 Litteratur

Litteraturen har hämtats via söktjänsten OneSearch som är kopplad till Högskolan i Halmstads bibliotekskatalog och högskolans databaser. Litteraturen som har använts för att skapa den teoretiska ramen kommer från olika vetenskapliga artiklar och böcker. Dessutom har litteratur samlats från olika företagswebbsidor och myndighetsföreskrifter via olika internetsökmotorer som Google, Google Scholar och ScienceDirect.

## 5.3 Datainsamling

För att besvara de angivna forskningsfrågorna har en datainsamling gjorts, i detta examensarbete har intervjuer och studiebesök utgjort denna del. I detta avsnitt beskrivs målet med intervjuerna samt studiebesöken.

### 5.3.1 Intervjuer & Studiebesök

Syftet med intervjuerna och studiebesöken är att få ett helhetsperspektiv om hur asfaltverk fungerar, asfalttillverkningsprocessen i Sperlingsholm, Halmstad, vilka faktorer som påverkar energianvändningen, materialegenskaper, nuvarande använda lagringsbehållare och byggisoleringsmaterial.

#### Intervjupersoner

När det kom till val av personer som skulle intervjuas var målet att träffa expertis inom området som skulle underlätta vår forskning kring ämnet genom att ge tydliga svar på de frågorna vi satt som milstolpar till detta examensarbete. De personer som intervjuades var:

- Björn Nilsson, Teknik-Specialist, Skanska.
- Tobias Pålsson, Teknik-Specialist, Skanska.
- Håkan Glöckner, Försäljningschef, Industri på Paroc AB.
- Moamar Alhoushan, Adjunkt, Civilingenjör, Maskinteknik.

#### Intervjuteknik

Intervjuerna bokades i förväg och upp till två timmar avsattes för varje intervju. Intervjuerna skedde öga mot öga såsom digitala möten via Teams eller Zoom kommunikationsapplikationer, detta för en smidig kontakt med intervjupersonen, för att få en mer öppen dialog och mer utförliga svar. Vi la fokus på att ha formulerade frågor i förväg för att undvika tidslöseri och undvika frågor där svaret kan vara ”JA” eller ”Nej”. Detta gäller för att få en bättre förståelse för våra frågor, vid vissa tillfällen så skickades frågeformuläret i förväg, då var det frågor som man behövt ta reda på svar innan de återkopplar till oss och andra frågeformulär skett under möten för att svara mer rakt och ärligt. (Se bilaga A för intervjufrågorna)

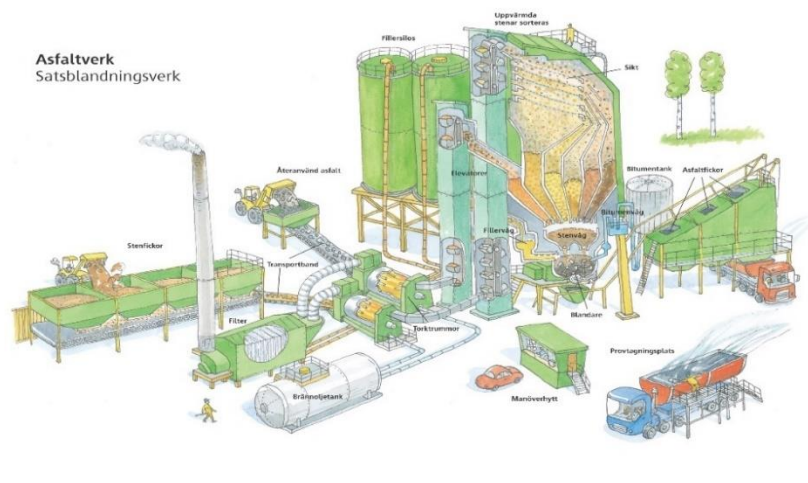
## 5.4 Analysarbete

Analysarbete kan indelas i tre delar, först analys av simuleringens resultat, för det andra analys av resultatet från intervjuerna, för det tredje en analys av teori vs empiri.

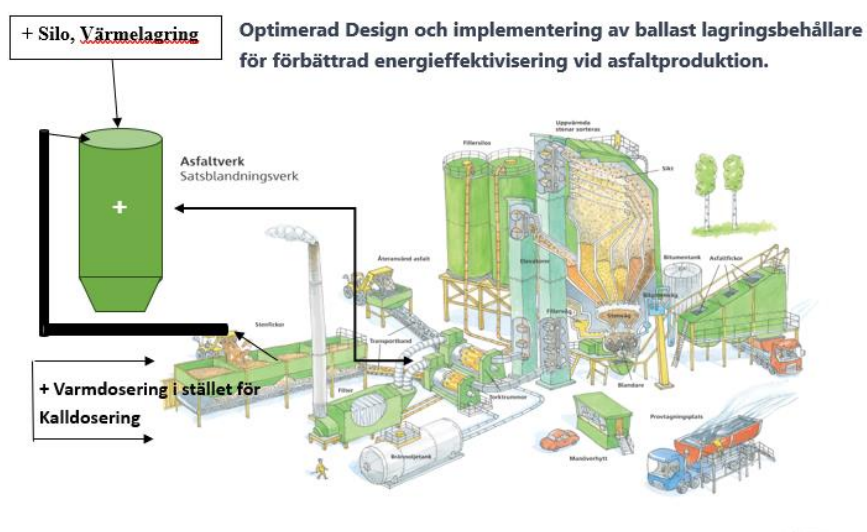
## 5.5 Optimering av asfalttillverkningsprocessen

Ett specifikt asfaltverk valdes för att genomföra studien, och all tillgängliga prestandadata för anläggningen samlades in i ett tidigt skede från Skanska samt andra företag inom detta område som rekommenderades från våra handledare på Skanska. För att få en helhetsbild av tillverkningsprocessen användes Asfaltboken 2020 som en värdefull resurs, tillsammans med intervjuer med både handledare och erfarna tekniska specialister såväl från Skanska som från andra företag.

En detaljerad kartläggning av tillverkningsprocessen utfördes för att skapa en tydlig bild av utgångsläget. Därefter justerades ritningen och designen för den nya optimerade asfalttillverkningsprocessen efter införandet av den nya silon för värmelagring, samt för att illustrera hur det nya asfaltverket skulle se ut. Material för lagring i silon studerades och valdes baserat på vetenskapliga källor med fokus på energieffektivitet samt med strävan att använda hållbara och återanvändningsbara material för att stödja och vara en del av klimatmålen inom byggindustrin. (se figur 6 & 7)



Figur 5.2 Det befintliga asfaltverket, bild från Skanska Industrial Solutions



Figur 5.3 Skissritning av det Optimerade Asfaltverket, Egna tillägg

## 5.6 Metodik för Simulering & Design i COMSOL Multiphysics

I detta avsnitt kommer vi att gå igenom de grundläggande förutsättningarna som ligger till grund för både design och simuleringar. Vi kommer att noggrant granska alla aspekter som påverkar designprocessen, inklusive val av material, mätningar, dimensioner på silon och alla andra relevanta faktorer som är nödvändiga för att skapa en genomtänkt design. Dessutom kommer vi att presentera en kort introduktion till den simuleringsmjukvaran som används i denna studie, beskriva tillvägagångssättet och alla steg som har genomförts med hjälp av COMSOL Multiphysics & Autodesk AutoCad.

### 5.6.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics är en svenskutvecklad mjukvara för modellering och simulering med hjälp av matematisk modelleringsteknik. Med COMSOL kan användare modellera och analysera flera fysiska fenomen samtidigt, såsom värmeöverföring, elektromagnetism, strömningsdynamik och strukturmekanik. Det är ett mångsidigt verktyg som används inom alla ingenjers-, tillverknings- och vetenskapliga forskningsområden för att modellera system med flera fysikfenomen. Dessutom i COMSOL kan användare få insikter i systembeteende, optimera design och fatta informerade beslut utan att behöva genomföra dyra och tidskrävande experiment. (COMSOL, 2024)

### 5.6.2 AutoCad

Autocad är mjukvara som används för att skapa, redigera och visualisera 2D- och 3D ritningar och modeller. Mjukvaran används främst inom arkitektur, konstruktion, tillverkning och ingenjörsvetenskap. Autocad möjliggör för användarna att skapa exakta ritningar med olika geometriska former, text, symboler och linjer.

### 5.6.3 Design & Simulering 1 förutsättningar

Första Silons egenskaper är givna från insidan mot utsidan:

$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$				
$\varnothing \text{ inne} = 3000 \text{ mm}$				
Beteckning	d (mm)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$C_P$ (J/kgK)
$d_{inre \text{ stålscikt}}$	10	7760	18	460
$d_{isolering, \text{ stenull}}$	100	150	0,03	900
$d_{yttre \text{ stålscikt}}$	5	7760	18	460
$\varnothing \text{ ute} = 3230 \text{ mm}$				
$T_{ut} = 15^{\circ}\text{C}$				
Mesh = Finer				

### 5.6.4 Design & Simulering 2 förutsättningar

Andra Silons egenskaper är givna från insidan mot utsidan:

$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$				
$\varnothing$ inne = 3000 mm				
Beteckning	d (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$C_p$ (J/kgK)
$d_{inre}$ stålskikt	10	7760	18	460
$d_{isolering, stenull}$	2 x 170	150	0,03	900
$d_{andra}$ stålskikt	2	7760	18	460
$d_{isolering, VIP}$	18	200	0,003	800
$d_{yttre}$ stålskikt	3	7760	18	460
$\varnothing$ ute = 3246 mm				
$T_{ut} = 15^{\circ}\text{C}$				
Mesh = Finer				

### 5.6.5 Parametrar vid asfaltproduktion

För att beräkna energianvändningen och minskningen av koldioxidutsläpp krävdes flera faktorer som utgångspunkt för energiberäkningen. Dessa faktorer baserades på empiriska värden givna av Skanska. Nedan finns en tabell med de relevanta parametrarna.

Parameter	Värde	Enhet
Ballast	240	ton/h
Olja	7	l/ton
Energiinnehåll olja	42 967	kJ/kg
Densitet olja	823	kg/m <sup>3</sup>
Specifik värmekapacitet stenmaterial	733	J/kgK
Densitet stenmaterial	2700	kg/m <sup>3</sup>
Verkningsgrad ( $\eta$ )	52	%
Energiförbrukning	59 769	MJ/h
Energi absorberad av ballast	39 360	MJ/h
Energiförluster i form av spillvärme	20 409	MJ/h

---

## 6 Resultat

I detta kapitel presenteras alla våra resultat från design, simuleringar, energi- och  $CO_2$ -utsläppberäkningar på ett tydligt sätt. Dessutom presenteras tydligt våra två förslagna designer och simuleringar. De två simuleringarna baseras på särskilda förutsättningar där vi varierar typen av isoleringsmaterial, tjockleken på olika skikt och den totala diametern på Silon se avsnitt 5.6.3 & 5.6.4. Syftet med att genomföra två olika designer och simuleringar är att visa hur vi med ökad tjocklek på hållbara isoleringsmaterial men också isoleringsmaterial som befinner sig i utvecklingsstadiet kan påverka resultatet av att lagra värme som i sin tur kan minska värmeförlusterna genom byggnader eller i vårt fall förvaringsbehållare.

Design och Simulering 1 innefattar färre isoleringsskikt och endast ett isoleringsmaterial. Detta val gjordes för att tydligare kunna utvärdera resultaten av Design och Simulering 2. I Design och Simulering 2 inkluderar vi rostfritt stål av en sådan sort som tål höga temperaturer, en mix av högkvalitativa byggisoleringsmaterial för att demonstrera en betydande minskning av värmeförlusterna. Detta kan i sin tur utnyttjas för att minska energibehovet och därmed  $CO_2$ -utsläppen.

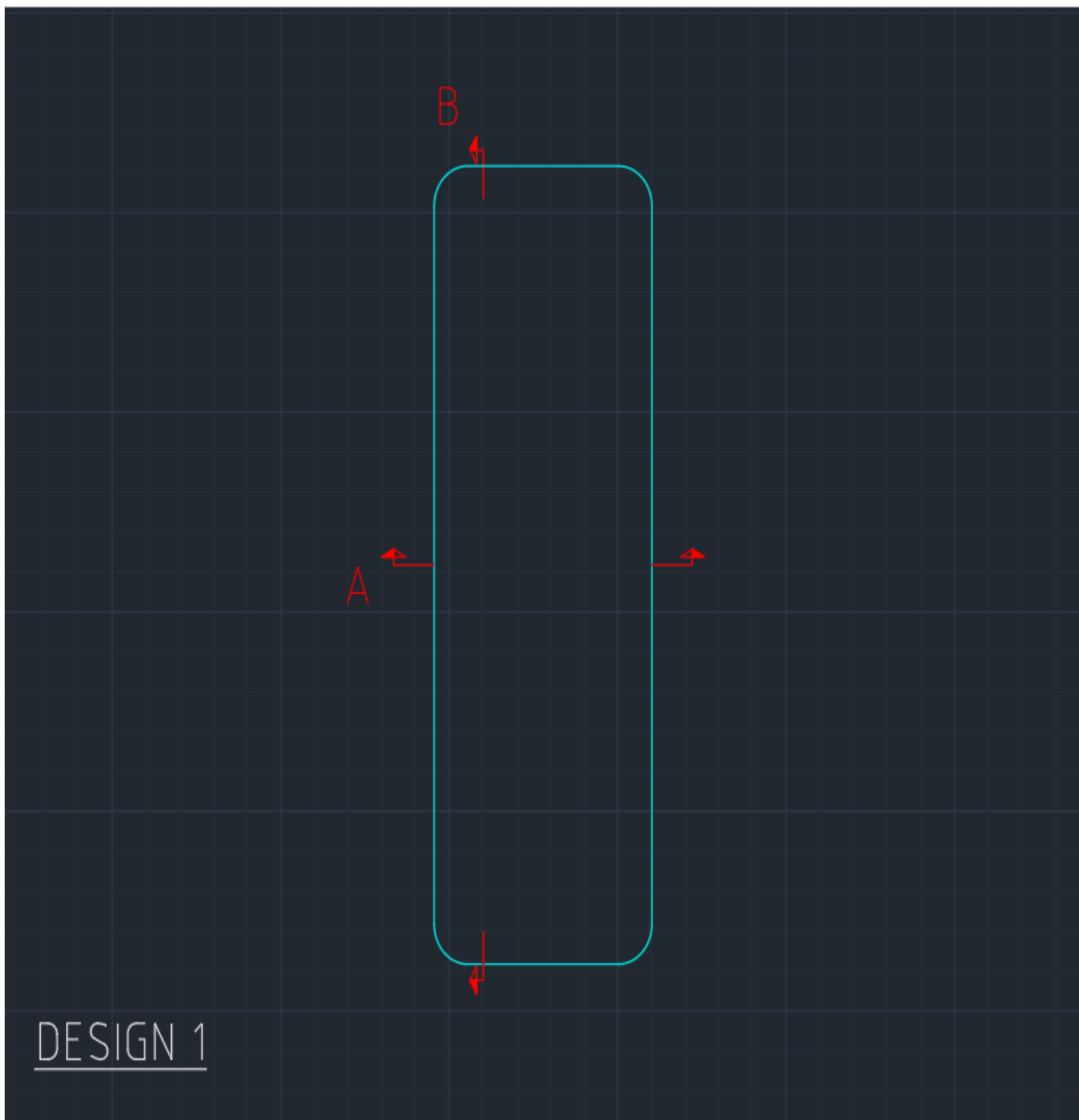
För att kunna fortsätta med projektet och genomföra våra energiberäkningar behövde vi först simulera vår design. Baserat på resultaten från Design & Simulering 2 kan vi sedan göra våra energiberäkningar. Vi fick fram att temperaturen som förvarades under en viss tidsperiod var 91 °C, som visas i Figur 6.2.5. Detta värde är avgörande för att kunna använda det som en utgångspunkt för våra energiberäkningar när det gäller uppvärmning av stenmaterial i torken.

### 6.1 Design & Simulering 1

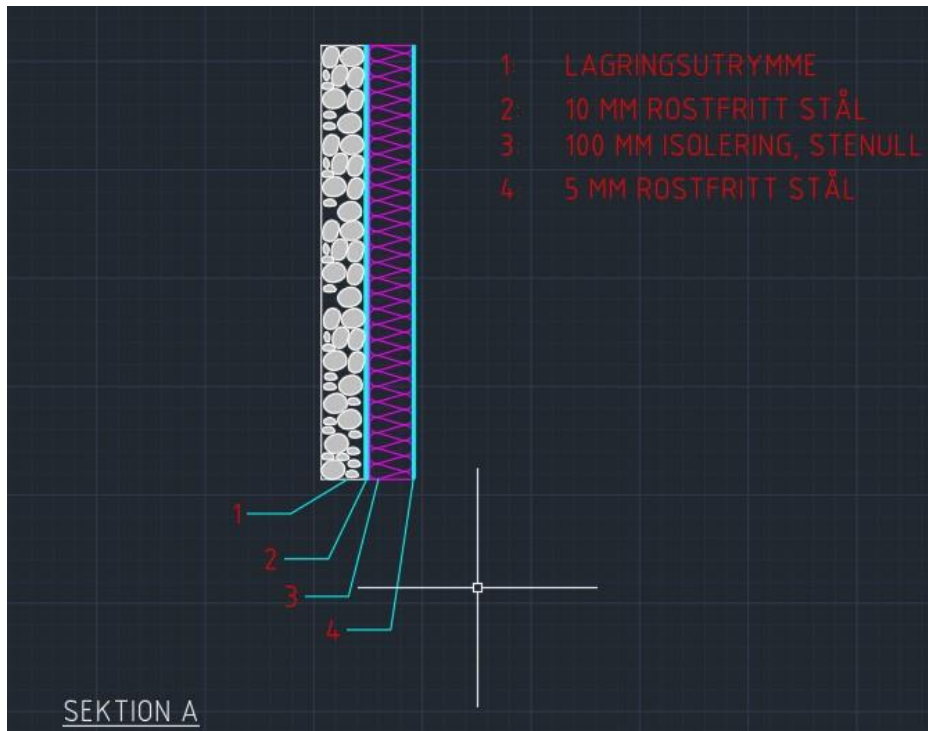
I detta avsnitt visas sammanställningen av våra resultat från Design & Simulering 1:

**AutoCAD-ritningar:** Vi presenterar enkla 2D-ritningar som illustrerar konstruktionen av silorna, inklusive detaljer om materialen som väggen består av. Se figur 6.1.1, 6.1.2 & 6.1.3.

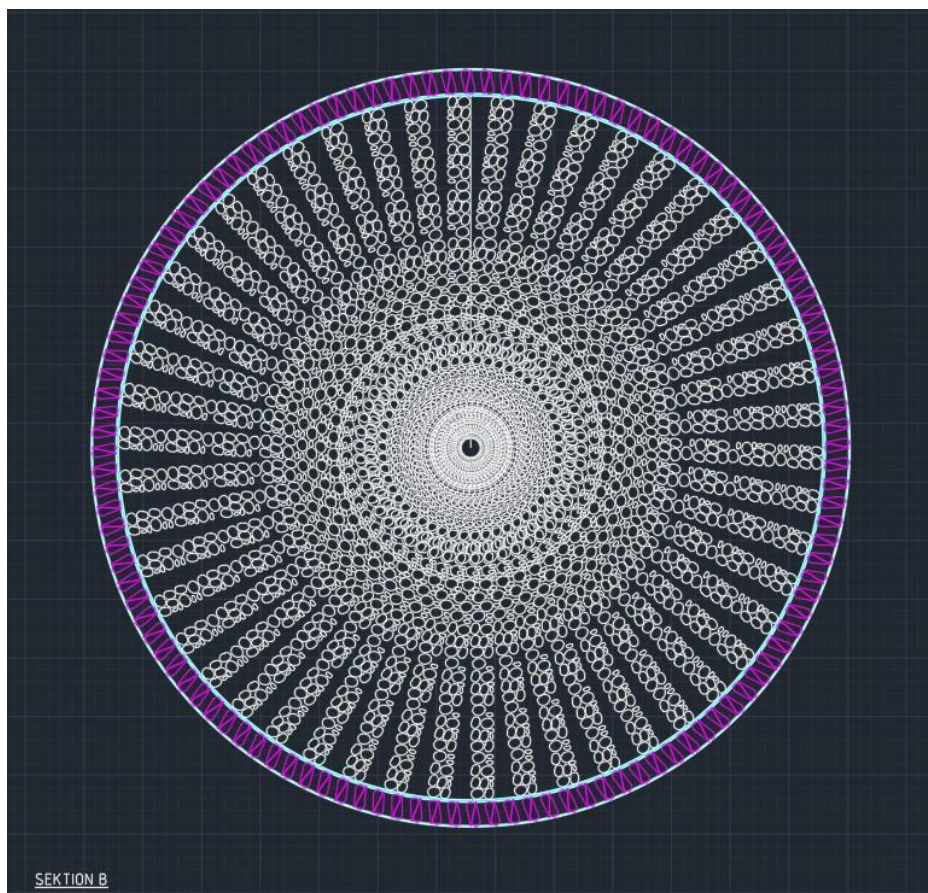
**COMSOL Multiphysics-simuleringar:** Vi redovisar temperaturförändringar med hjälp av termiska färgskalor se figur 6.1.4, linjekurvor samt exakta värden på temperaturförändringarna i tabellformat. Se figur 6.1.5 & 6.1.6.



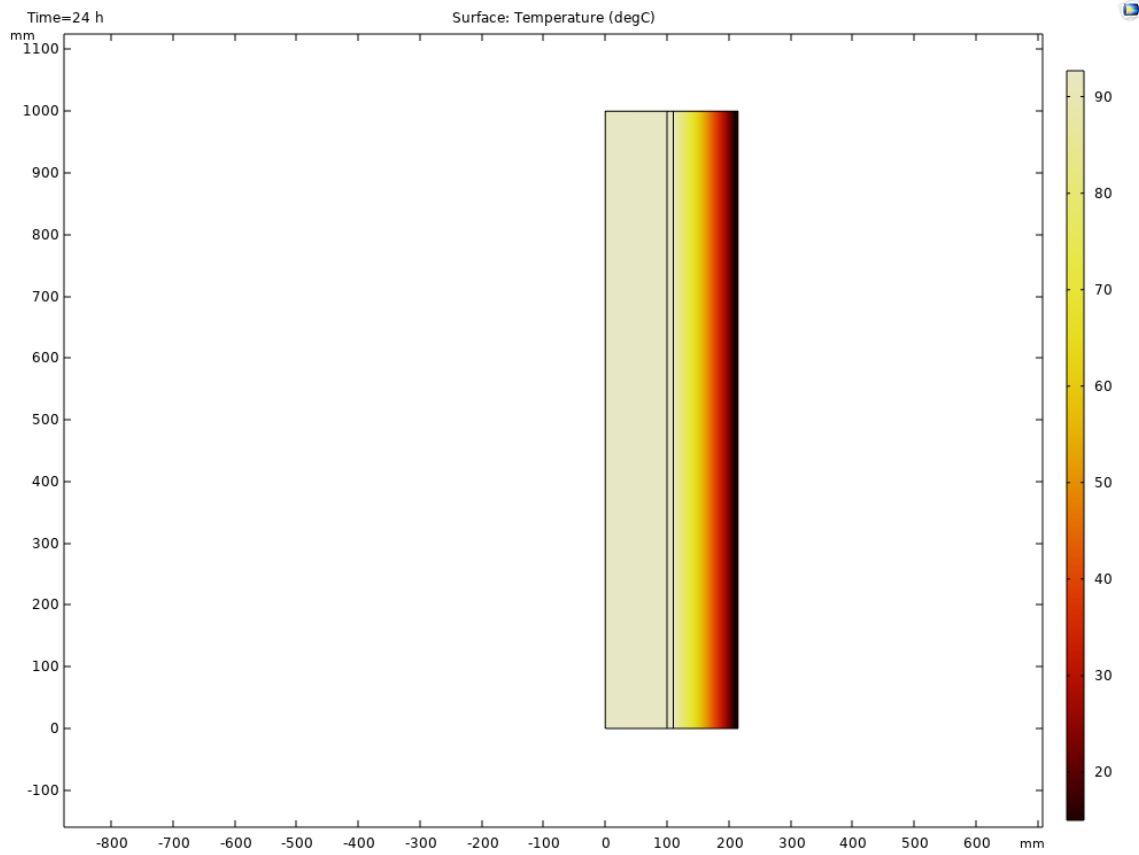
*Figur 6.1.1 2D ritning av silon från utsidan.*



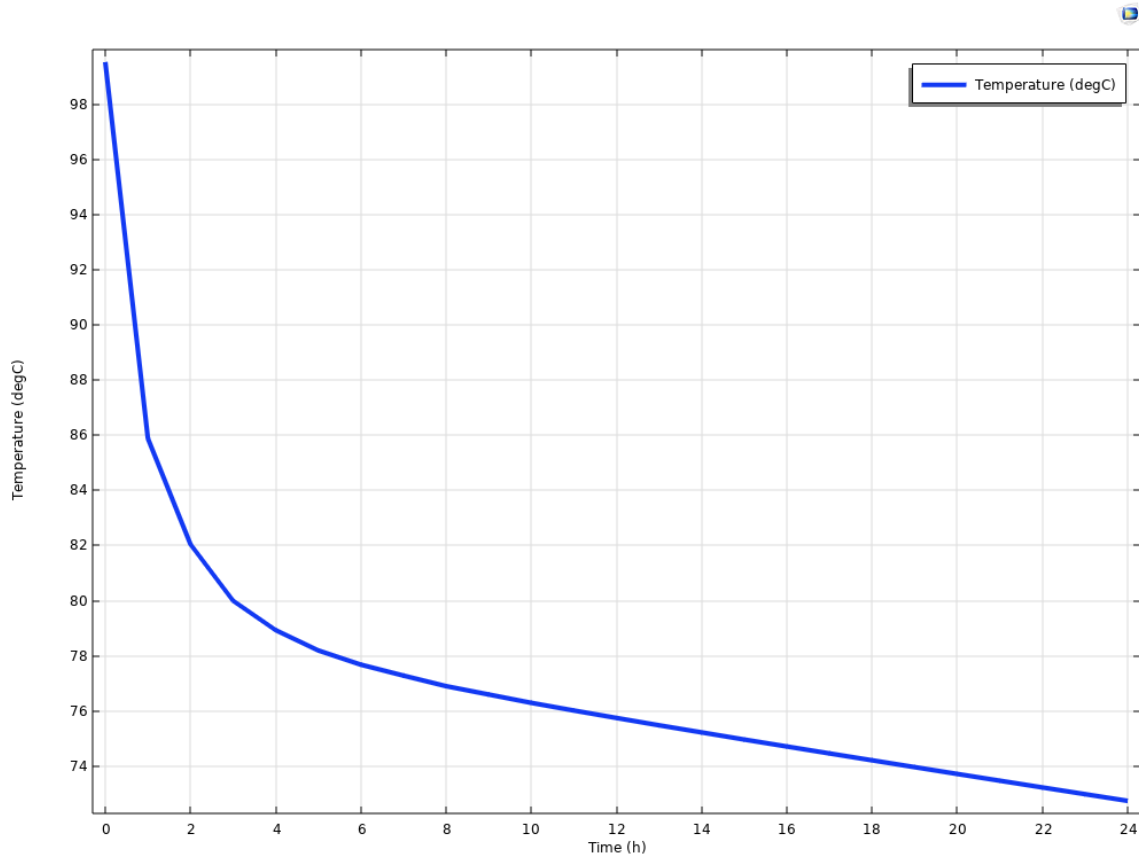
Figur 6.1.2 snitt genom silons vägg



Figur 6.1.3 snitt genom silon, vy från ovasida.



**Figur 6.1.4** Temperaturförändring i termiska färgar.



**Figur 6.1.5** linjekurva som visar temperaturförändring i förhållande till tiden.

I figur 6.1.5 visas simuleringsresultatet som en linjekurva som visar temperaturförändring över tid för Design & Simulering 1. Det är tydligt att temperaturen på stenmaterialet minskar och når ungefär 71–73 °C under totalt 24 timmar.

Temperaturförändring i förhållande till tiden

% Model:	Design & Simulering 1	
% Version:	COMSOL 6.0.0.318	
% Date:	Apr 18 2024, 11:06	
% Table:	Table 1 - Line Average 1	
% Time (h)		Temperature (degC)
0		99.51870959972433
1		85.88210106412538
2		82.04616339414217
3		80.00124452027308
4		78.93602223285492
5		78.20031783032825
6		77.68491614504376
7		77.28891437761419
8		76.90648369439118
9		76.60406723917801
10		76.30165078396486
11		76.02368439505953
12		75.75408624938669
13		75.48842561557981
14		75.23024011868289
15		74.97205462178599
16		74.7203574465457
17		74.46903780424837
18		74.21979617692521
19		73.97228931539271
20		73.72517517778338
21		73.48037651482922
22		73.23557785187505
23		72.99259471780293
24		72.75023296393849

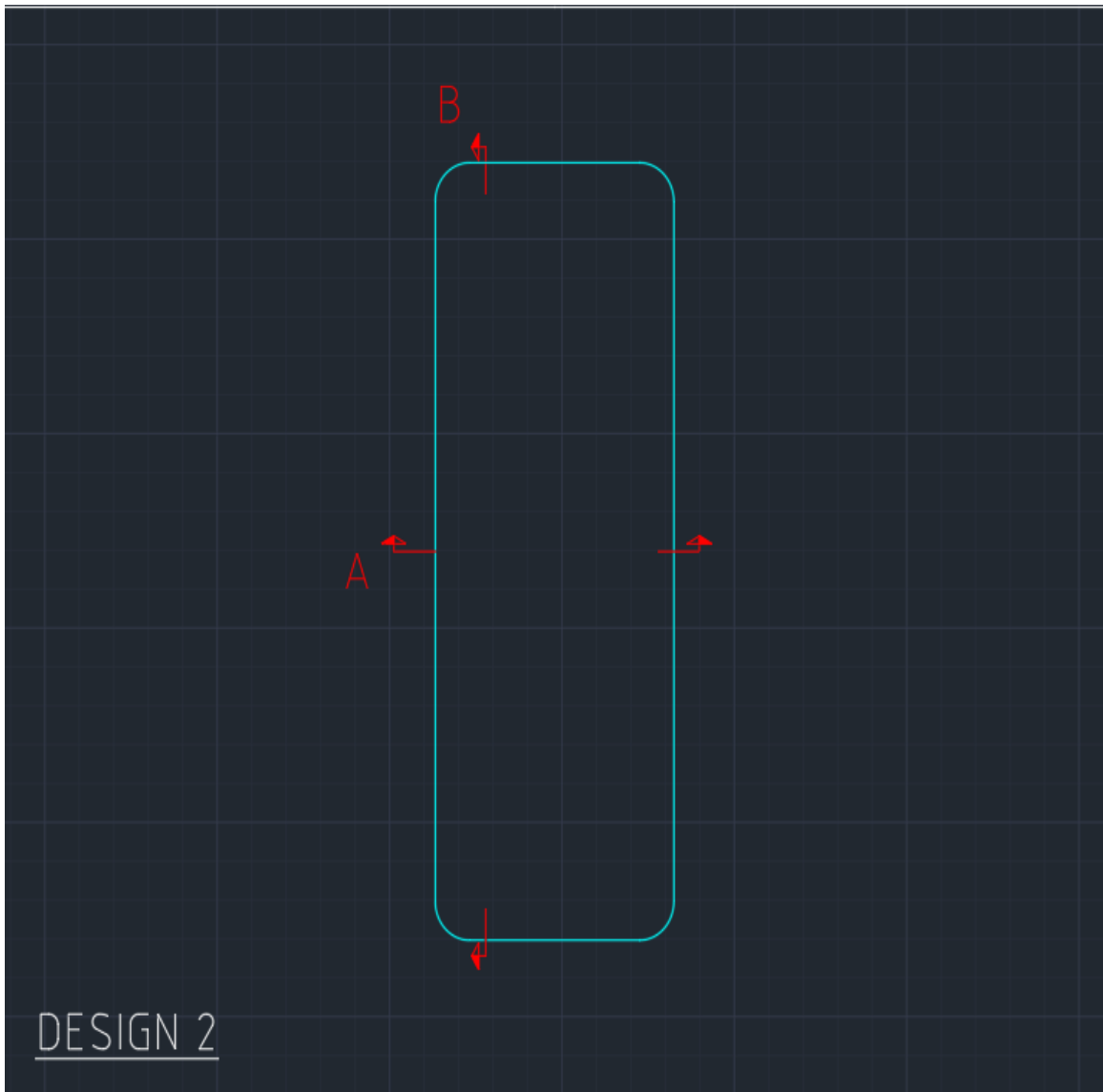
*Figur 6.1.6 Tabell som visar exakta värden från linjekurvan.*

## 6.2 Design & Simulering 2

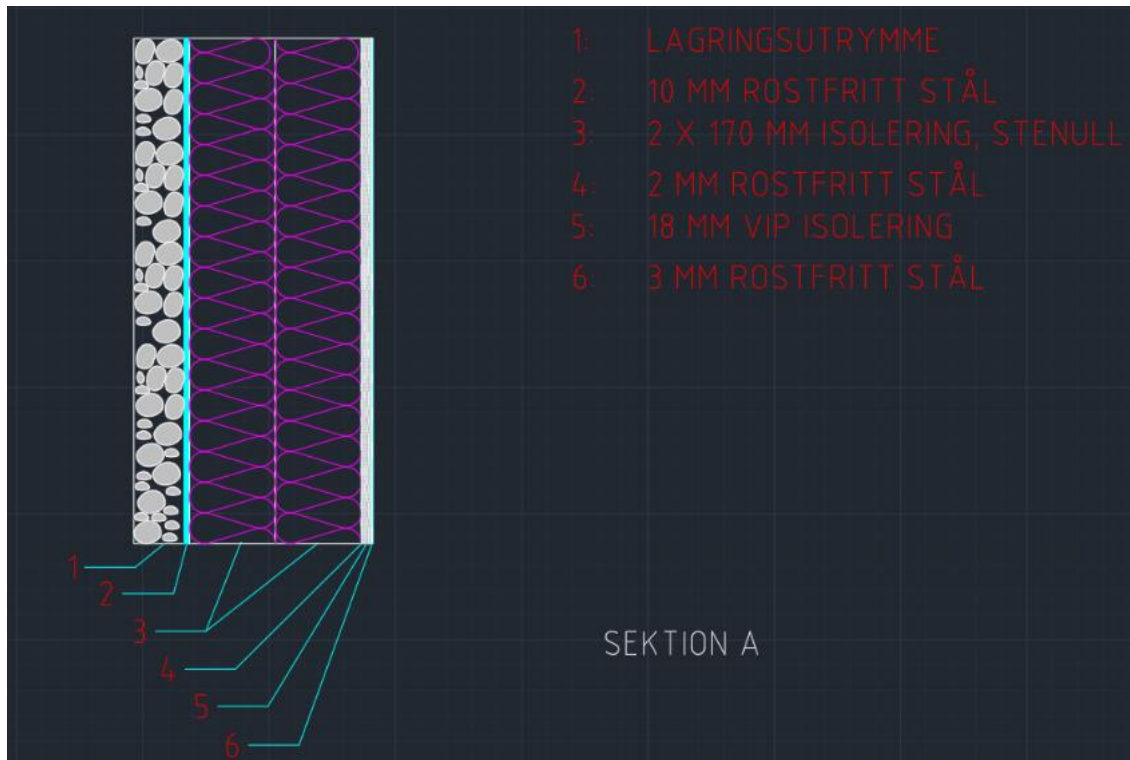
I detta avsnitt visas sammanställningen av våra resultat från Design & Simulering 2:

AutoCAD-ritningar: Vi presenterar enkla 2D-ritningar som illustrerar konstruktionen av silonerna, inklusive detaljer om materialen som väggen består av. Se figur 6.2.1, 6.2.2 & 6.2.3.

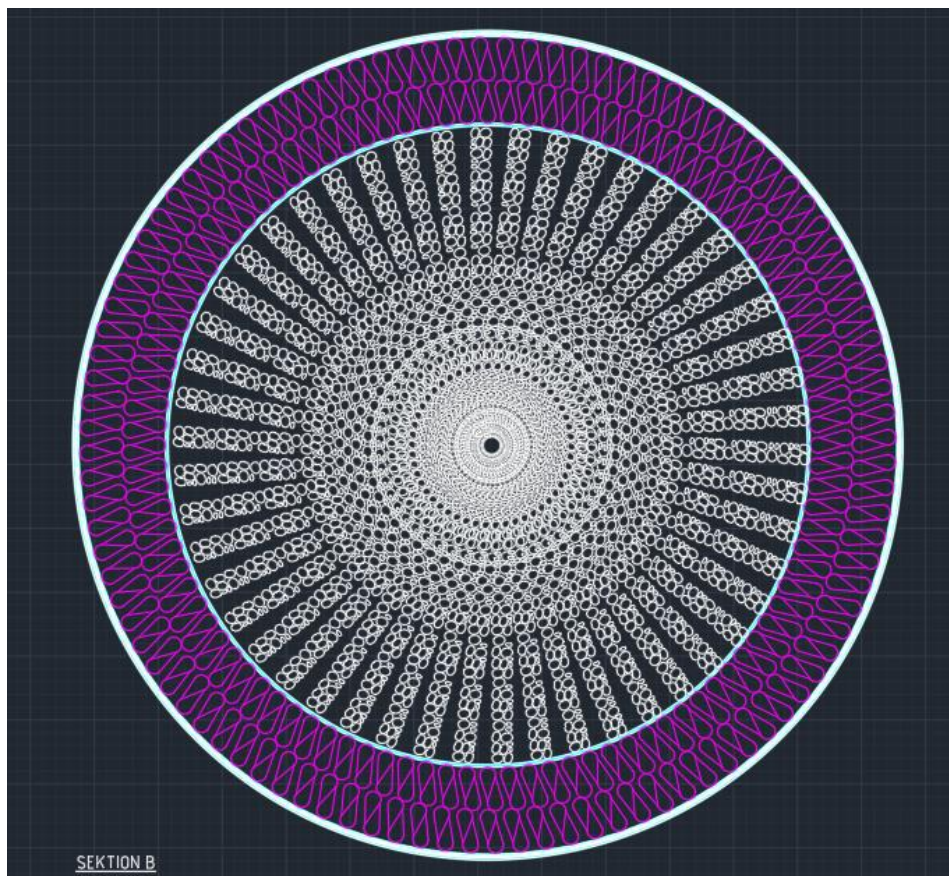
COMSOL Multiphysics-simuleringar: Vi redovisar temperaturförändringar med hjälp av termiska färgskalor se figur 6.2.4, linjekurvor samt exakta värden på temperaturförändringarna i tabellformat. Se figur 6.2.5 & 6.2.6.



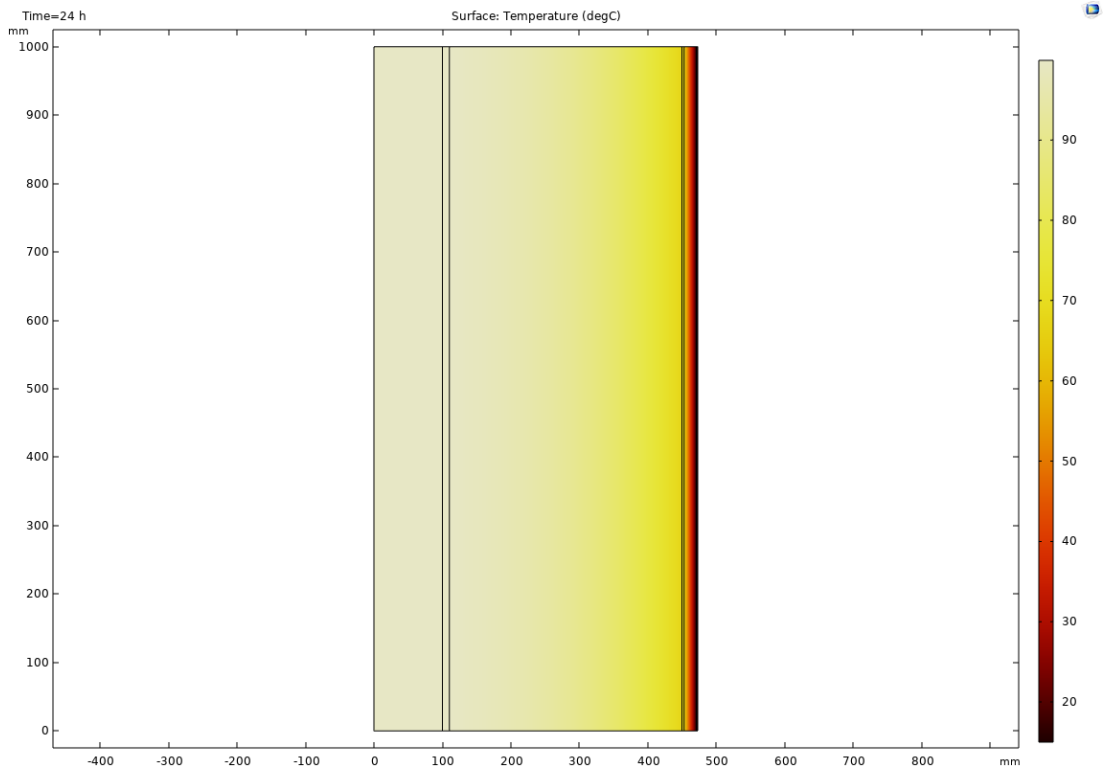
*Figur 6.2.1 2D ritning av silon från utsidan.*



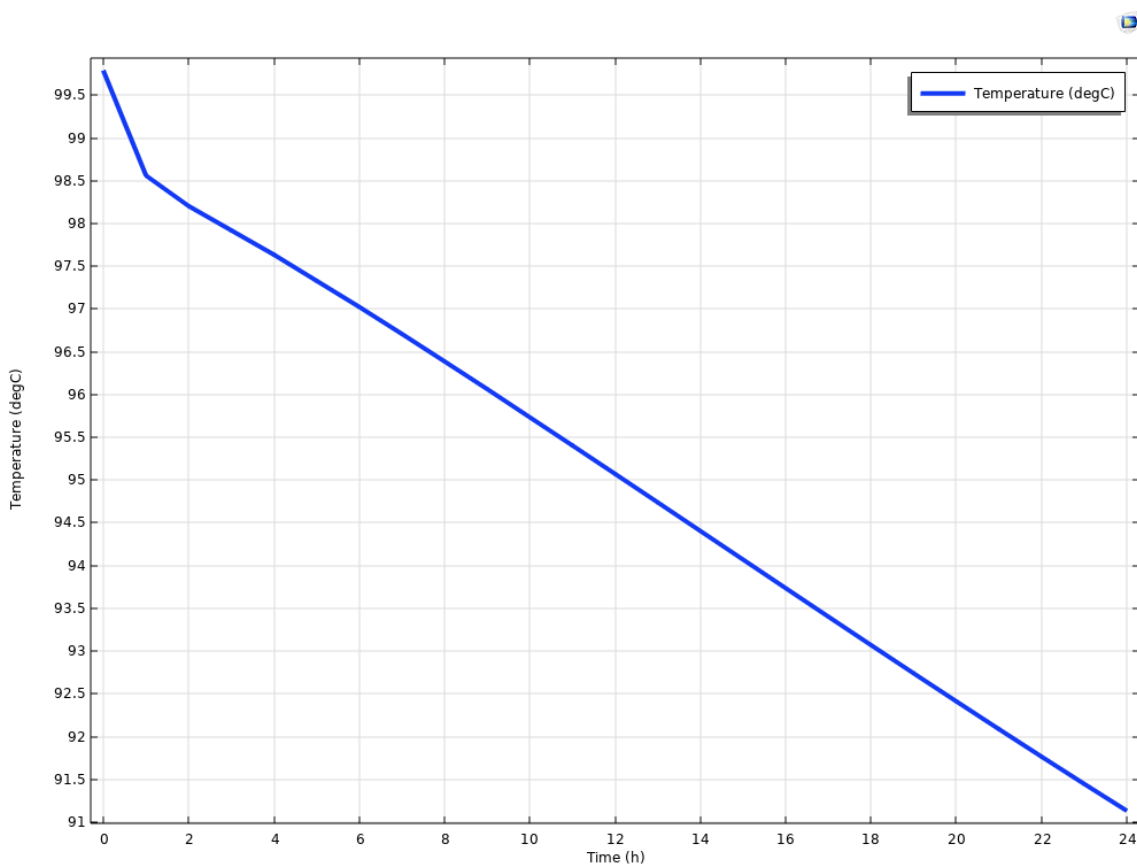
Figur 6.2.2 snitt genom silons vägg.



Figur 6.2.3 Snitt genom silon, vy från ovasida.



Figur 6.2.4 Temperaturförändring i termiska färger



Figur 6.2.5 linjekurva som visar temperaturförändring i förhållande till tiden (Design 2)

I figur 6.2.5 visas simuleringsresultatet som en linjekurva som visar temperaturförändring över tid för Design & Simulering 2. Man ser tydligt att temperaturen på stenmaterialet minskar och når ungefär 91–92 °C under totalt 24 timmar.

Temperaturförändring i förhållande till tiden

% Model:	Design & Simulering 2	
% Version:	COMSOL 6.0.0.318	
% Date:	Apr 18 2024, 12:18	
% Table:	Table 2 - Line Average 2	
% Time (h)		Temperature (degC)
0		99.78707653462769
1		98.560613201674
2		98.20382895819115
3		97.91995555583492
4		97.63554074047538
5		97.33023384760443
6		97.02492695473347
7		96.70923622950426
8		96.38786166325889
9		96.06435193998304
10		95.73430690100632
11		95.40426186202954
12		95.0724519869647
13		94.73913541088282
14		94.40504705668842
15		94.07089469985664
16		93.73633667762259
17		93.40343115918942
18		93.07130895440535
19		92.74119046715555
20		92.41354385073132
21		92.08823870726756
22		91.7665398364039
23		91.44784109170638
24		91.13308381689453

Figur 6.2.6 Tabell som visar exakta värden från linjekurvan.

## 6.3 Energi- och CO<sub>2</sub>-Utsläppberäkning

### 6.3.1 Energiberäkning baserat på Design & Simulering 2

För att bestämma mängden olja eller energiförbrukning som krävs per ton stenmaterial används värmekapacitetsformeln se [Ekv.3], med hänsyn till tiden som krävs för att värma upp en ton stenmaterial, vilket är cirka 10 minuter se bilaga A, intervju person 1. I denna beräkning antar vi en uppvärmningstid på 10 minuter, vilket motsvarar 600 sekunder.

$$\text{Värmekapacitetsformeln: } Q = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \quad [\text{Ekv. 3}]$$

Hela beräkningen kan också förenklas med en enda formel, vilket kan sammanfattas som:

$$\text{Bränsle uppvärmningsvärde: } Q \text{ (l/h)} = \frac{Q \text{ (kW)} \cdot 3600}{\text{Energiinnehåll} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \cdot \eta \cdot \rho_{\text{olja}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)}$$

Där:

- Q är effekten i watt (W).
- m är massan av ämnet i kilogram (kg).
- c är den specifika värmekapaciteten för ämnet i joule per kilogram och Kelvin (J/kg·K).
- ΔT är temperaturförändringen i Kelvin (K) eller Celsius (°C).
- t är tiden för värmeöverföringen i sekunder (s).

Givet: se 5.6.5 Parametrar vid produktion

Parameter	Värde	Enhet
Starttemperatur för stenmaterial ( $T_{in}$ ), se Avsnitt 5.6.4 Design & Simulering 2, Figur 6.2.6	91	°C
Önskad Temperatur för stenmaterial ( $T_{ut}$ )	200	°C
Massa m	1000	kg

$$Q = \frac{1000(\text{kg}) \cdot 733 \text{ (J/kgK)} \cdot (200 - 91)^\circ\text{C}}{600 \text{ (s)}} = 13\,316\text{W} = 13,316 \text{ kW}$$

$$\text{Energianvändningen i kg/s} = \frac{Q \text{ i kW}}{\text{Energiinnehåll} \cdot (\mu)}$$

Vilket ger:

$$\text{Energianvändningen i kg/s} = \frac{13,316 \text{ kW}}{42\,967 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 52\%} = 5,96 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

För att få det i kg/h multiplicerar vi med 3600, vilket ger:

$$5,96 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \cdot 3600 = 2,1456 \text{ kg/h}$$

Nu behöver vi konvertera oljans densitet från  $\text{kg/m}^3$  till  $\text{kg/l}$ , eftersom vi vill ha resultatet i  $\text{l/h}$  per ton stenmaterial.

Vi vet att:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ liter}$$

Så, om vi delar  $823 \text{ kg/m}^3$  med 1000, får vi densiteten i  $\text{kg/l}$ :

$$\text{Densitet i kg/liter} = \frac{823 \text{ kg/m}^3}{1000} = 0,823 \text{ kg/l}$$

Nu kan vi använda detta värde för att genomföra divisionen:

$$\frac{2,1456 \text{ kg/h}}{0,828 \text{ kg/l}} = 2,59 \text{ l/h, olja flöde som förbrukas per ton stenmaterial.}$$

### 6.3.2 $\text{CO}_2$ - Utsläppberäkning

För att beräkna  $\text{CO}_2$ -utsläppen per ton stenmaterial behöver vi ha tillgång till utsläppsfaktorer för växthusgasutsläpp. Dessa utsläppsfaktorer används för att beräkna utsläppen för de vanligaste energislagen. Värdena anges vanligtvis i gram eller kilogram koldioxidekvivalenter per energienhet.

Enligt en tabell presenterad av Naturvårdsverket, specifikt "Klimatklivet - Vägledning om beräkning av utsläppsminskning" från 2023, varierar koldioxidfaktorn för olja mellan 288 och 295 ( $\text{g CO}_2 - \text{e/kWh}$ ), inklusive förbränning, produktion och distribution av oljan.

För  $\text{CO}_2$ -beräkning nedan kommer vi att använda medelvärdet på 291 ( $\text{g CO}_2 - \text{e/kWh}$ ) för olja. Sedan kan vi använda detta värde tillsammans med mängden energi som används för att producera en ton stenmaterial för att beräkna de totala  $\text{CO}_2$ -utsläppen för processen.

Dessutom behöver vi veta hur mycket energi frigörs när man bränner upp 1 liter olja eller bensin och detta har en teknisk expert från Skanska besvarat. se bilaga A, Intervjupersonen 1, "När man bränner upp 1 liter olja eller bensin, frigörs ungefär 10–12  $\text{kWh/l}$ ". I  $\text{CO}_2$ -beräkningen nedan väljer vi 10  $\text{kWh/l}$ . Men värdet på hur mycket energi som frigörs kan beräknas enligt:

Givet: se 5.6.5 Parametrar vid produktion

- Energiinnehåll = 42 967 kJ/kg
- Olja densitet i  $\text{kg/l} = 0,823 \text{ kg/l}$
- Vi vet att: 1 kWh = 3600 kJ

$$\text{Energiinnehåll per liter} = \text{Energiinnehåll} \cdot \rho_{\text{olja}}$$

$$\text{Energiinnehåll per liter} = 42\,967 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,823 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \approx 35\,362 \text{ kJ/l}$$

$$\frac{35\,362 \text{ kJ/l}}{3600 \text{ kJ}} \approx 9,823 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}, \text{ mängden energi som frigörs när man bränner upp en liter olja.}$$

Från tidigare avsnitt 6.3.1 Energiberäkning har vi kommit fram till värdet 2,59  $\text{l/h}$ , mängd olja som förbrukas per ton stenmaterial.

---

Alltså:

$$10 \text{ kWh/l} \cdot 2,59 \text{ l/h} = 25,9 \text{ kW}$$

Därefter multiplicerar vi det erhållna värdet med koldioxidfaktorn för olja:

$$25,9 \text{ kW} \cdot 291 \text{ (g } CO_2 - \text{ e/kWh)} = 7536,9 \text{ (g } CO_2)$$

Nu behöver vi konvertera från g  $CO_2$  till kg  $CO_2$  utsläpp:

Vi vet att:

$$1 \text{ kg} = 1000\text{g}$$

Så, om vi delar 7536,9 (g  $CO_2$ ) med 1000, får vi mängden utsläpp i (kg  $CO_2$ ):

$$\frac{7536,9 \text{ (g } CO_2)}{1000} = 7,5369 \text{ (kg } CO_2), \text{ mängden } CO_2 \text{ som utsläpps per tillverkning av en ton stenmaterial.}$$

---

## 7 Analys & Diskussion

I detta kapitel analyserar samt diskuterar vi hållbar utveckling och energieffektivisering, materialvalutvärdering, metodiken för vår studie. Vi analyserar resultaten från simuleringar, beräkningar och intervjuer för att identifiera förbättringsmöjligheter och effekterna av våra förslag.

### 7.1 Hållbar utveckling och energieffektivisering

Hållbar utveckling är en central faktor inom dagens samhällsplanering och industriella processer. För att kunna bidra till klimatneutralitetsmålet fram till 2045–2050 ligger stort fokus på forskningsinvesteringar och samarbete inom byggindustrin för att främja en mer hållbar värld. Trots att asfalttillverkning i sig inte är en särskilt komplex process, är det viktigt att nämna att en betydande del av  $CO_2$ -utsläppen kommer från asfalttillverkningen. Att minska dessa utsläpp är avgörande för att minska den globala uppvärmningen och skydda miljön.

En betydande del av asfalttillverkning kräver även stora mängder olja. Genom att minska denna oljeberoende och i stället fokusera på innovation och optimering av maskiner för att fungera på förnybara energikällor kan vi bevara naturresurserna för framtida generationer. Dessutom öppnar minskade utsläpp från asfalttillverkning upp möjligheter för utveckling av mer hållbara alternativ, såsom återvunnen asfalt och permeabla ytor. Genom att energieffektivisera och minska utsläppen från asfalttillverkningen kan vi främja en mer hållbar infrastruktur och minska vår miljöpåverkan på lång sikt.

### 7.2 Materialvalutvärdering

Efter ett neutralt övervägande av de olika materialens egenskaper och vilka kriterier vi hade framstod rostfritt stål, en kombination av stenull och VIP byggisoleringsmaterial som det lämpligaste valet för att konstruera silon. De designkriterierna vi hade var:

- Långsiktig hållbarhet
- Potentialen för återanvändning
- Korrosionsbeständighet, eftersom silon kommer att utsättas för olika väderförhållanden då den kommer att placeras utomhus.

Enligt det teoretiska ramverket kunde vi fastställa att betongsilos är robusta och kan vara hållbara, men de kan också vara mottagliga för skador som korrosion av armeringsjärn och sprickbildning på grund av geologiska faktorer som tjällyftning. En annan nackdel med betongsilos är bristen på standarder och designkriterier. Bristen kan leda till strukturell deformation och kan utsätta människor i närheten för fara. Trots att återvinning av betong kan bidra till att minska miljöpåverkan och byggkostnader genom tekniker som C2CA, kan processen vara komplex då det innebär att betongen bryts ner och dess komponenter separeras.

Rostfritt stål anses ha fler fördelar inom aspekten långsiktig hållbarhet. Genom implementeringen av principer för cirkulär ekonomi kan både behovet av ny naturresursutvinning och miljöpåverkan minskas. Tekniken går ut på att demontera stål-element från gamla konstruktioner för att sedan återanvända dem i nya byggnadsprojekt.

---

Tekniken erbjuder en direkt och kostnadseffektiv metod för återanvändning. Återanvändningskriterier sätter dessutom fokus på flyttbarhet med tanke på att silon är en sammankopplad konstruktion. Med detta i åtanke har vi utgått från Trafikverkets föreskrifter angående maximal bredd samt längd för konstruktioner som silos och andra odelbara laster.

Rostfritt stål är känt för sin korrosionsbeständighet, vilket gör det idealiskt för användning i utmanande miljöer där betong kan vara mer sårbart. Silos, särskilt de som är placerade utomhus eller som utsätts för fuktiga förhållanden kan utsättas för korrosion och strukturell försämring över tid. Genom att välja rostfritt stål som byggmaterial anses behovet av regelbundet underhåll och reparationer till följd av korrosionsskador minska. Detta resulterar i långsiktiga besparingar och minskar risken för strukturell deformation.

Studien har fördjupat sig i byggisoleringsmaterial, och syftet med det var att få en förståelse för grunden för isoleringsmaterial, skillnader och val av material för olika applikationer. Valet att kombinera stenull och VIP isoleringsmaterial som det mest lämpliga valet för designen har drivits av följande faktorer. Stenull utmärker sig genom sin höga temperaturlåghet och motståndskraft mot mekanisk skada, vilket gör dem mycket flexibla för olika designkrav. Dessutom uppfyller stenull de flesta önskvärda egenskaperna för effektiv isolering, vilket utförligt diskuteras i avsnitt 4.1. Dessa hållbara och miljövänliga egenskaper möjliggör återanvändning och återvinning samt bidrar till betydande energibesparingar och minskad klimatpåverkan från asfalttillverkning.

VIP-isolering kompletterar vår design genom att erbjuda utmärkt isoleringsprestanda med minimal tjocklek jämfört med andra isoleringsmaterial. Dessutom bibehåller VIP sin isolerings prestanda under en betydande livslängd på upp till 25 år, varefter dess termiska egenskaper endast minskar marginellt. Detta ger hög termisk effektivitet och minskar behovet av utrymme för isolering. Genom att kombinera VIP-isolering med stenull kan vi skapa en isolerings lösning som är både effektiv och kostnadseffektiv. Denna kombination balanserar prestanda och ekonomi och leder till en hållbar infrastruktur för asfalttillverkning med minskad klimatpåverkan.

Kombinationen av stenull & VIP isoleringsmaterial är bara en startpunkt för designen och simuleringen. Med tanke på att VIP-isolering fortfarande befinner sig i en utvecklingsfas innebär det att det finns behov av fortsatt förbättring för valet av byggisolering. Det kräver ytterligare forskning och utveckling för att identifiera mer effektiva och hållbara alternativ. Det är också viktigt att undersöka olika kombinationer av material för att se hur de fungerar tillsammans och om de kan implementeras i praktiken. Vidare är det av vikt att utforska nya material och teknologier för att ytterligare minska miljöpåverkan och främja en mer hållbar byggindustri.

---

### 7.3 Metod och genomförande i studien

Användningen av olika metoder i vår studie har resulterat i en omfattande och djupgående undersökning av hur man kan energieffektivisera asfalttillverkningen och minska miljöpåverkan vid produktion av asfalt. De metoder som har använts i studien, inklusive fakta från olika vetenskapliga artiklar, intervjuer, studiebesök, simuleringar och beräkningar, har spelat en avgörande roll för att nå målet med studien.

#### Intervjuerna & studiebesöken

Intervjuer med experter och studiebesök på asfaltverket bidrog till insamlingen av primärdata som var värdefull för studiens resultat och slutsatser. Genom dessa interaktioner kunde vi få en djupare förståelse för hur asfaltverken fungerar i praktiken, de specifika utmaningarna inom asfalttillverkningsprocessen och de faktorer som påverkar energianvändningen, hur mjukvaran COMSOL Multiphysics fungerar samt vilka byggisoleringsmaterial finns ute i marknaden och vad som kännetecknar de mest använda isoleringsmaterialen.

#### AutoCad

Mjukvaran har använts för att skapa ritningar och visualisera de två olika designalternativen. Ritningarna möjliggjorde en tydlig presentation av våra idéer och underlättade förståelsen för projektet. Genom att visa strukturella detaljer kunde vi identifiera eventuella brister och göra nödvändiga justeringar innan simuleringen i COMSOL Multiphysics utfördes.

#### Simuleringarna med hjälp av COMSOL Multiphysics

Att skapa simuleringar med hjälp av mjukvaran COMSOL Multiphysics gav oss möjligheten att modellera och analysera komplexa fysikaliska fenomen, där värmeöverföring var i fokus. COMSOL Multiphysics gav oss dessutom möjligheten att optimera design och ta beslut över vad som passar vår studie bäst genom att simulera olika scenarier och utvärdera deras effektivitet utan att behöva genomföra dyra och tidskrävande experiment. Simuleringarna har varit avgörande för att utforska temperaturförändring över tid och för att skapa en jämförelse av olika designalternativ. Syftet med de olika designalternativen av silon var att kunna utforska och fastställa vilken som blir den optimala designen som uppfyller målet med studien.

#### Beräkningen av energianvändningen och CO<sub>2</sub>-utsläpp

Beräkningsdelen hjälpte oss att kvantifiera resultaten av forskningen och påvisa det övergripande syftet med studien, nämligen att minska energianvändningen och CO<sub>2</sub>-utsläppen vid asfalttillverkning. Genom att använda matematiska beräkningar kunde vi styrka våra slutsatser och påvisa den potentiella miljönyttan med vår lösning.

### 7.4 Resultatanalys av simuleringar, beräkningar och intervjuer

Syftet med denna studie var att förbättra energieffektiviteten och minska klimatpåverkan från asfalttillverkning genom att lösa ett specifikt problem i produktionsprocessen: torktrumman. Genom att använda förnybar energi för uppvärmning av stenmaterialet,

som kan behållas i förvaringsbehållare innan det når torktrumman, och med hjälp av materialval, specifik design, simuleringar samt beräkningar har vi lyckats minska energi- eller oljeförbrukningen och därmed även utsläppen av växthusgaser som är en del av målet för studien.

Resultatet av studien har visat på möjligheten att effektivisera asfalttillverkningen och minska utsläppen av växthusgaser. Genom att särskilt fokusera på optimeringen av värmelagringssystemet i asfalttillverkningsprocessen, specifikt genom Design & Simulation 2, har betydande framsteg uppnåtts. Simuleringen visade att genom att använda en kombination av två olika isoleringsmaterial och tjockare väggar i förvaringsbehållarna kunde materialet bevaras upp till 24 timmar utan att understiga temperaturen 91°C. Vidare visade energiberäkningarna en märkbar minskning av oljeförbrukningen, från dagens nivå på 6–9 l/h per ton stenmaterial till endast 2,59 l/h per ton stenmaterial, men det är värt att nämna att oljeförbrukningen också kan påverkas av fuktinnehållet i stenmaterialet. Denna minskning i oljeförbrukning resulterar direkt i en minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen, med de beräknade utsläppen minskade från dagens 18–25 kg CO<sub>2</sub> per ton stenmaterial till upp 8 kg CO<sub>2</sub> per ton stenmaterial.

Resultaten från intervjuerna utgjorde en nödvändig del av denna studie eftersom författarna därigenom tillfördes betydande insikter som var relevanta för hela studiens omfattning. Genom intervjuerna fick författarna möjlighet att diskutera en mängd relevanta källor, parametrar och metodologier som var centrala för arbetet. Eftersom studien också innefattar element av en fallstudie var insamlingen av data och viktiga parametrar avgörande för att dra slutsatserna. Intervjupersonerna spelade en positiv roll i studiens utförande genom att bidra till en djupare förståelse för asfalttillverkningsprocessen och genom att erbjuda hjälp med verktyg som COMSOL Multiphysics, vilket författarna inte hade använt tidigare. Deras engagemang under studiens gång bidrog till att författarna kunde förvärva värdefull erfarenhet för framtiden. Det finns dock utrymme för förbättringar. På grund av tidsbrist var antalet intervjuer begränsat, och det hade varit fördelaktigt att inkludera fler relevanta företag. Dessutom fanns det brist på jämförbara studier inom området, vilket gjorde det svårt att sätta studiens resultat i ett sammanhang och jämföra dem med andra.

Dessa resultat är starkt kopplade till syftet och målet med studien och visar på den potentiella betydelsen av att implementera energieffektiva metoder i asfalttillverkningen för att minska miljöpåverkan. När vi reflekterar över studiens resultat är det viktigt att notera några potentiella begränsningar. Trots att studien har visat lovande resultat kan det fortfarande finnas faktorer i verkliga produktionsmiljöer som kan påverka effektiviteten och implementeringen av dessa metoder. Ytterligare forskning, studier och tester i mer realistiska produktionsmiljöer kan vara nödvändiga för att validera och förfinas dessa resultat för att sedan implementeras i praktiken. Dessutom är det relevant att diskutera hur våra resultat relaterar till tidigare forskning inom området hållbar asfaltproduktion. Vår studie bidrar till den växande kroppen av forskning som undersöker metoder för att minska klimatpåverkan från byggsektorn och våra resultat baserat på trovärdiga simulationer och beräkningar verkar vara positiva samt visar att tekniska innovationer kan leda till betydande minskningar av växthusgasutsläpp. Det är värt att nämna att det

finns brist på tidigare forskning inom detta område, vilket gjorde det svårt att jämföra våra resultat med andra forskningsstudier. Detta kan bero på att vår studie introducerar en ny idé som vi har utvecklat tillsammans med Skanska.

Slutligen är det viktigt att reflektera över potentiella framtida forskningsområden baserade på våra resultat och insikter. Vidare forskning kan fokusera på att utvärdera implementeringen och långsiktiga effekterna av energieffektiva metoder i verkliga produktionsmiljöer samt utforska andra möjligheter för att förbättra hållbarheten inom asfaltproduktionen. Sammanfattningsvis bidrar vår studie till forskningen om hållbara byggmetoder och belyser behovet av teknisk innovation för att uppnå miljömässiga hållbarhetsmål inom byggsektorn. Genom en noggrann analys av data från simuleringar och energiberäkningar har vi identifierat både möjligheter och utmaningar med att minska växthusgasutsläppen och förbättra hållbarheten inom asfaltproduktionen.

---

## 8 Slutsatser

I detta avsnitt summeras våra slutsatser och de resultat som har uppnåtts i denna studie. Dessutom utforskas potentiella forskningsområden för framtida fördjupning av studien, med fokus på deras relevans för att främja hållbarhet inom byggsektorn.

### 8.1 Optimerad Värmelagring för Temperaturreduktion

Genom användning av högkvalitativt isoleringsmaterial såsom stenull & VIP, samt genom att konstruera lagringsbehållarna med tjockare väggar av tjocka isoleringsskikt och återanvändningsbart rostfritt stål, har vi uppnått en imponerande temperaturreduktion på upp till 91°C. Denna optimering har resulterat i betydande minskning av oljeförbrukningen, vilket ökar energieffektiviteten avsevärt.

### 8.2 Minskade energi- och CO<sub>2</sub>-utsläpp miljövinster

Energiberäkningar visar en dramatisk minskning i oljeförbrukning, med endast 2.59 l/h per ton stenmaterial jämfört med dagens förbrukning på 7–9 l/h per ton stenmaterial. Denna minskning i oljeförbrukning har resulterat i betydande minskningar av CO<sub>2</sub>-utsläpp, med endast upp till 8 kg CO<sub>2</sub> per ton stenmaterial jämfört med de nuvarande nivåerna på 18–25 kg CO<sub>2</sub> per ton stenmaterial. Detta kan leda till betydande möjligheter för att uppnå miljövinster och driva innovationsutveckling inom asfalttillverkning för en mer hållbar värld.

### 8.3 Framtida forskningsområden

Framtida forskning kan rikta in sig på att förbättra valet av isoleringsmaterial, särskilt med tanke på att många sådana material fortfarande är under utveckling. Genom att optimera materialvalen kan man effektivisera värmeisoleringen och därigenom minska energiförluster. Dessutom kan forskningen fokusera på att utveckla konstruktionsmaterial som är mer miljövänliga, vilket skulle bidra till att minska den totala miljöpåverkan från byggbranschen. Integrering av forskningsresultat i en övergripande hållbarhetsram för asfaltproduktion möjliggör en övergripande bedömning av både miljömässiga och ekonomiska fördelar. Simuleringar och energiberäkningar belyser potentialen i innovativa tillvägagångssätt för att minska växthusgasutsläpp och förbättra processernas hållbarhet. Validering och förfining av resultaten genom empirisk forskning och praktiska tester är nödvändiga för att säkerställa effektivitet och hållbarhetsfördelar i verkliga produktionsmiljöer. Framtida forskningsinsatser bör fokusera på att utforska och implementera tekniska innovationer och hållbara metoder för att ytterligare minska växthusgasutsläppen och främja en långsiktig hållbar utveckling inom byggsektorn.

---

## Referenser (A-Ö)

Aditya L, Mahlia TMI, Rismanchi B, Ng H-K, Hasan M, Metselaar HSC, Muraza O and Aditiya HB (2017) A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>.

Al-Homoud MS (2005) Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment* 40 (3) s. 353 - 366. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>,

Andersson, A., & Ekström, L. G. (2023). Hälsa miljö och säkerhet Asfaltboken. Tillgänglig via: <https://asfaltboken.se/halsa-sakerhet-och-miljo/>

Arndt J, Bartel T, Scheuber E and Schilling F (1997) Thermal and rheological properties of granodioritic rocks from the Central Andes, North Chile. *Tectonophysics* 271 (1-2) s. 76 – 80. Tillgänglig via: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195196002181>

Bærens R, Jelle BP and Gustavsen A (2011) Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and buildings* 43 (4) s. 761 – 769. Tillgänglig via: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810004329#sec0080>,

Bårtås L (2022) Isoleringsmaterial – de vanligaste och de mindre vanliga. *Byggahus.se*. Tillgänglig via: <https://www.byggahus.se/bygga/isoleringsmaterial-de-vanligaste-de-mindre-vanliga>.

COMSOL, 2024. About COMSOL - Multiphysics Simulation Software Provider. Tillgänglig via: <https://www.comsol.com/company>.

Concept Group LLC (2022). What is thermal insulation? | Thermal Engineers Explain. Tillgänglig via: <https://conceptgroupllc.com/glossary/what-is-thermal-insulation/>.

Costa C, Mantelli M, Milanese F, Da Silva AK, Rucker CE and Furlan LT (2013) Experimental and numerical study of an asphalt storage tank in a reduced scale. *Applied Thermal Engineering* 56 (1-2) s. 101-109. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.043>

Dahlin, J.E. (2014). Hållbar utveckling - en introduktion för ingenjörer (1). Lund: Studentlitteratur AB.

Dier, A. (1993). *Offshore Application Of Structural Stainless Steel: Background To A Major New Design Manual*. All Days. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.4043/7320-ms>

Energy in buildings. (2017). *Open Learning*. Tillgänglig via: <https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/energy-buildings/content-section-2.2.3>

Engagerad samhälls- och projektutvecklare | skanska.se. (2024). skanska.se. <https://www.skanska.se/>

Engels, H.-W., Pirkl, H.-G., Albers, R., Albach, R. W., Krause, J., Hoffmann, A., Casselmann, H., & Dormish, J. (2013). Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(31), 8292-8305. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>

F. (2023, May 16). Aerogel Insulation Solves a Variety of Insulation Challenges. *Firwin Corporation*. Tillgänglig via: <https://www.firwin.com/blog/aerogel-insulation-solves-a-variety-of-insulation-challenges/>

Fördelar och nackdelar med cellulosaisolering - Goda Görningar. (2021, December 7). *Goda Görningar*. Tillgänglig via: <https://goda-gorningar.se/fordelar-och-nackdelar-med-cellulosaisolering/>

---

Gjørø OE (2011) *Durability of Concrete Structures*. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Springer Science and Business Media LLC 36(2): 151–172. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-010-0033-5>.

Göth, A. 2017. *Aerogelbaserat isoleringsmaterial* | Byggekatalogen. Byggekatalogen. Tillgänglig via: <https://byggekatalogen.byggjant.se/nyheter/aerogelbaserat-isoleringsmaterial/9057>

GreenSpec, (2024). *Insulation materials - thermal properties*. Tillgänglig via: <https://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>

Hållbara hus - Fakta om mineralull. (2019). Tillgänglig via: <https://hallbaratrahus.se/fakta-mineralull.php>

Hurtado PL, Rouilly A, Vandebossche V and Raynaud C (2016) *A review on the properties of cellulose fibre insulation. Building and environment*. Vol. 96, pp. 170-177. Tillgänglig via: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315301311>.

Jelle, B. P. (2016, January 1). *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. Elsevier eBooks. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100546-0.00008-x>

Kowatsch S (2010) *Mineral Wool Insulation Binders*. Springer eBooks. Tillgänglig via: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-04714-5\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-04714-5_10).

Kumar D, Alam M, Zou PXW, Sanjayan J and Memon RA (2020) *Comparative analysis of building insulation material properties and performance*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.

Lakatos, K., & Trník, A. (2019, January 1). *Thermal characterization of fibrous aerogel blanket*. *MATEC Web of Conferences*. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928201001>

Liljenström C, Toller S, Åkerman J and Björklund A (2019) *Annual climate impact and primary energy use of Swedish transport infrastructure*. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. TU Delft OPEN Publishing 19(2). Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.18757/ejtir.2019.19.2.4378>.

Lotfi S, Eggimann M, Wagner E, Mróz R and Deja J (2015) *Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology*. *Construction and Building Materials*. Elsevier BV 95: 243–256. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021>.

Maraveas C (2020) *Concrete Silos: Failures, Design Issues and Repair/Strengthening Methods*. *Applied Sciences*. MDPI AG 10(11): 3938. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.3390/app10113938>.

Muench ST (2010) *Roadway Construction Sustainability Impacts*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. SAGE Publications 2151(1): 36–45. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.3141/2151-05>.

Naturvårdsverket. (2023). *Klimatklivet - Vägledning om beräkning av utsläppsminskning*. Tillgänglig via: <https://www.naturvardsverket.se/>

Peinado D, de Vega M, García-Hernando N and Marugán-Cruz C (2011) *Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer*. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier BV 31(6–7): 1039–1049. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.029>.

Rotter JM (1998) *Metal silos*. *Progress in Structural Engineering and Materials*. Wiley 1(4): 428–435. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.1002/pse.2260010412>.

---

Soleimani-Mohseni, M. et al. (2018) *Formelsamling i energiteknik : formler, tabeller och diagram. Andra upplagan.* Lund: Studentlitteratur AB.

Saleh K, Golshan S and Zarghami R (2018) *A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects.* *Chemical Engineering Science.* Elsevier BV 192: 1011–1035. Tillgänglig via: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>.

Salihbegovic, A., & Salihbegovic, A. (2020). *Natural Materials in Contemporary Low-Tech Architecture.* *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 960(4), 042012. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/4/042012>

*Specifying FOAMGLAS® insulation for guaranteed thermal performance.* (2024). Tillgänglig via: <https://www.foamglas.com/en/advice-center/protection-areas/temperature>

Su Y and Zhang LW (2012) *Research on Properties of Rock-Mineral Wool as Thermal Insulation Material for Construction.* *Advanced materials research.* Tillgänglig via: <https://www.scientific.net/AMR.450-451.618>.

Sundberg, J. (1991). *Termiska egenskaper i jord och berg, Information 12.* Statens geotekniska institut (SGI). Tillgänglig via: <https://www.sgi.se/>

Swedisol, (2024), *Vad är god Isolering?* Tillgänglig via: <https://swedisol.se/isolering>.

Thives LP and Ghisi E (2017) *Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review.* *Renewable & Sustainable Energy Reviews.* Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>.

Trafikverket (2023). *Transport av odelbar last utan dispens.* Trafikverket. Tillgänglig via: <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/Transportdispens/Transport-av-odelbar-last-utan-dispens/>.

Transportstyrelsen, 2023. *Föreskrifter och allmänna råd om färd med lång odelbar last, TSFS 2023:37.* Tillgänglig via: [2023 - Transportstyrelsen](#)

Transportstyrelsen, 2023. *Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om färd med bred odelbar last, TSFS 2023:36.* Tillgänglig via: [2023 - Transportstyrelsen](#)

*Vad är cellglasisolering?* (2024). FOAMGLAS. Tillgänglig via: <https://www.foamglas.com/sv-se/radgivningscenter/general-advice/what-is-cellular-glass-production-process>

*Vad är mineralull?* [internet], 2024. ISOVER Sverige. Tillgänglig via: <https://www.isover.se/faq/vad-ar-mineralull>.

*Vad är Polyuretan?, 2024. – Polyuretan Isolering Gotland AB.* Tillgänglig via: <https://www.polyuretangotland.se/vad-ar-polyuretan/>

*Varför PAROC Stenull? - Paroc.se.* (2024). Tillgänglig via: <https://se.paroc.com/varfor-paroc-stenull>

*Värmekapacitet - mängden energi för att värma upp ett kilo en grad.* (2021, January 18). Tillgänglig via: <https://abergon.se/varmekapacitet>

Vaghani, M., Vasawala, S.A., & Desai, A.K. (2014). "Stainless Steel As A Structural Material: State Of Review." *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, Issue 3, pp. 657-662.

*What are the benefits of vacuum insulated panels? - Insulation Superstore Help & Advice.* (2024, February 16). *Insulation Superstore Help & Advice.* Tillgänglig via: <https://www.insulationsuperstore.co.uk/help-and-advice/product-guides/insulation/what-are-the-benefits-of-vacuum-insulated-panels/>

---

*What is Aerogel, 2024. Aspen Aerogels. Tillgänglig via: <https://www.aerogel.com/about-aerogel/>.*

*Życzyńska A, Suchorab Z, Kočí J and Černý R (2020) Energy Effects of Retrofitting the Educational Facilities Located in South-Eastern Poland. Energies. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.3390/en13102449>.*

---

## Bilagor

### **Figurkällor i rapporten:**

D Avery, (2022) *How are Vacuum Insulation Panels used in buildings?* - VIPA International. VIPA International. Tillgänglig via: <https://vipa-international.org/vacuum-insulation-panels-used-in-buildings/>.

Isolerab AB, (2022) *Våra medarbetare i Dalarna reder ut begreppet cellulosaisolering* - Isolering Dalarna. Tillgänglig via: <https://www.isoleringdalarna.nu/sida/vad-ar-cellulosaisolering-vara-medarbetare-i-dalarna-reder-ut-begreppet>.

Danzey-Smith G, (2023) *Rock Mineral Wool Vs Glass Mineral Wool* | ARC Building Solutions. ARC Building Solutions. Tillgänglig via: <https://www.arcbuildingsolutions.co.uk/knowledge-base/rock-mineral-wool-vs-glass-mineral-wool/>.

GLT Products, (2024) *FOAMglas Fabricate Pipe Insulation*. Tillgänglig via: <https://www.gltproducts.com/products/foamglas-fabricated-pipe-insulation-20201.html>.

Falak A, 2024. *Aerogel - An Innovative Material for Sustainable Building!*. Tillgänglig via: <https://gharpedia.com/blog/aerogel-sustainable-building-material/>.

Kumar D, Alam M, Zou PXW, Sanjayan J and Memon RA, (2020). *Comparative analysis of building insulation material properties and performance*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Tillgänglig via: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.

Monodomiki.Gr (2024). *INSULATION TIPS*. monodomiki.gr. Tillgänglig via: <https://www.monodomiki.gr/eng/blog-details/INSULATION-TIPS>.

Tenpierik M and Cauberg H (2007) *VIP integrated façade designs: the advantage of combining high thermal performance with limited construction thickness*. Tillgänglig via: [https://www.researchgate.net/publication/265053444\\_VIP\\_integrated\\_facade\\_designs\\_the\\_advantage\\_of\\_combining\\_high\\_thermal\\_performance\\_with\\_limited\\_construction\\_thickness](https://www.researchgate.net/publication/265053444_VIP_integrated_facade_designs_the_advantage_of_combining_high_thermal_performance_with_limited_construction_thickness).

Proconizo.Az, (2024). *Polyurethane foam thermal insulation*. Procon izo. Tillgänglig via: <https://proconizo.az/en/thermal-insulation/polyurethane-foam-thermal-insulation-50>.

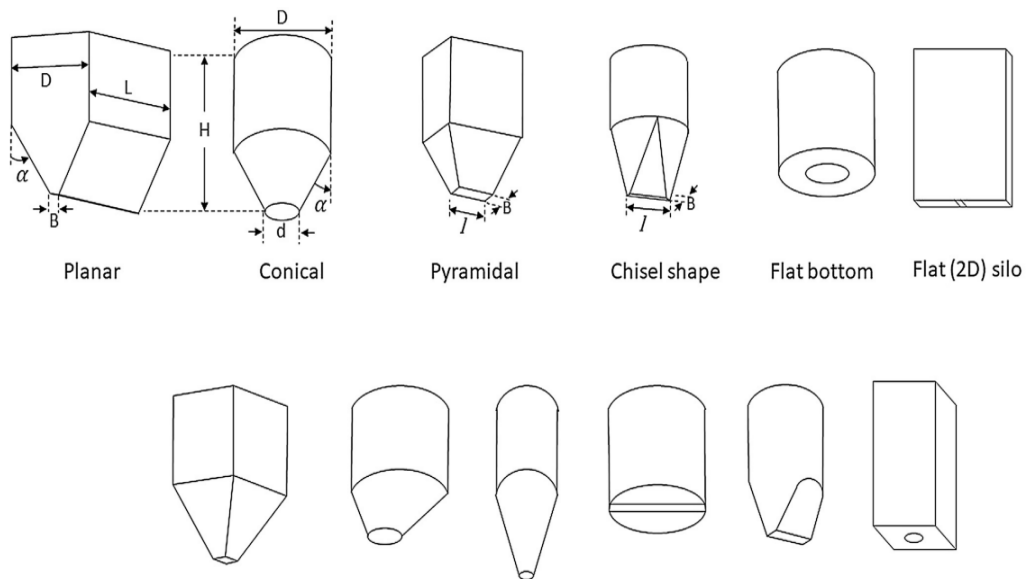


Fig. 1. Examples of different types of silo.

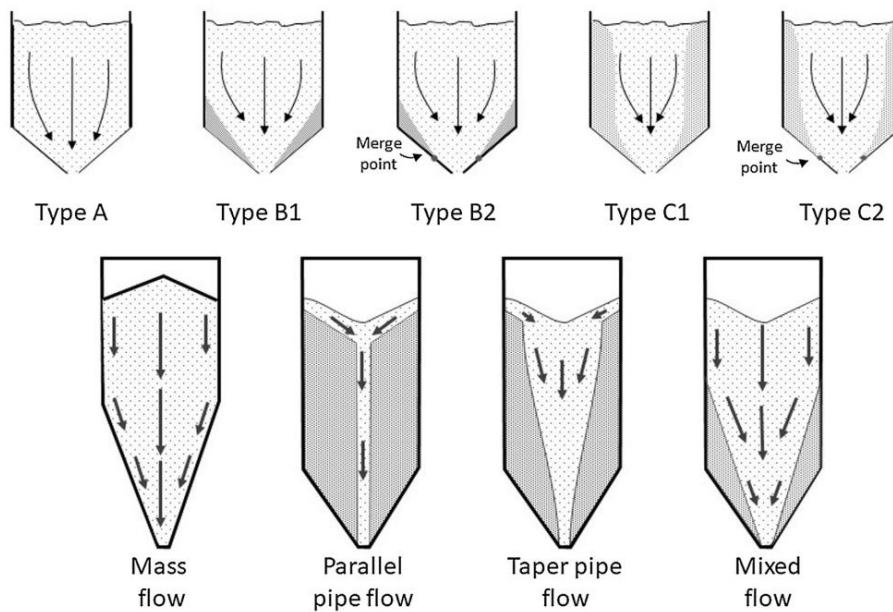


Fig. 2. Classification of different flow patterns in axisymmetric silos (Cizeau et al., 1999).

---

## Bilaga A Intervjufrågor

### Intervjuperson (1): Björn Nilsson, Teknik-Specialist, Skanska.

- **Hur mycket stenmaterial planeras att lagras?**

Cirka 700 ton fördelat på 6 - 8 silos / sorteringar.

- **Kan du ge en detaljerad beskrivning av asfalt produktionsprocessen?**

Asfalt består i princip av sten/ballast i olika storlek, samt ett bindemedel Bitumen

Räknat i vikt % innehåller asfalt cirka 4,5 – 6,5% bindemedel, resten är sten.

Det finns flera olika recept på asfalt.

#### **Kalldosering (1):**

Sten eller ballast i olika storlekar förvaras i kalldoseringen.

Stenarna är uppdelade i olika sorteringar: 0-2, 2-5, 5-8, 8-11, 11-16, 16-22, där siffrorna representerar den minsta och största sten storleken i respektive sortering.

Stenen doseras ner på ett samlingsband i proportion till asfaltreceptet och matas till en torktrumma.

#### **Torktrumma (2):**

Stenen matas in i en roterande torktrumma där den torkas och värms av en brännare.

Trumman ligger i en viss lutning och roterar, vilket förskjuter materialet mot brännaren (motströmstrumma).

Stenen lämnar torktrumman vid en temperatur på ca 180–220 grader Celsius.

#### **Stoftavskiljare (3):**

Under torkningen upprätthålls ett undertryck i trumman för att avlägsna stendamm.

En fläkt suger ut dammet genom en rågas kanal och det sorterade dammet kallas filler och transporteras till en förvaringssilo för återanvändning.

#### **Blandartorn och elevator (4):**

Den uppvärmda stenen lyfts upp i blandartornet av en elevator.

Stenen delas upp i olika storlekar och förvaras i isolerade varmvärmefickor under processen.

De olika sten sorteringarna doseras ner i blandaren via doseringsluckor och vägs upp enligt receptet.

#### **Tankanläggning (5):**

Bindemedlet (bitumen) förvaras i tankar och doseras till blandningen enligt receptet.

Bitumen fylls från tankbilar och doseras till bitumenvågen med pumpar.

#### **Varmmassafickor (6):**

Den färdiga asfalten släpps ner i en transportvagn ("hund") och transporteras till valda fickor för lagring.

Asfalten lagras i varmassafickorna och hämtas sedan av lastbilar för vidare transport.

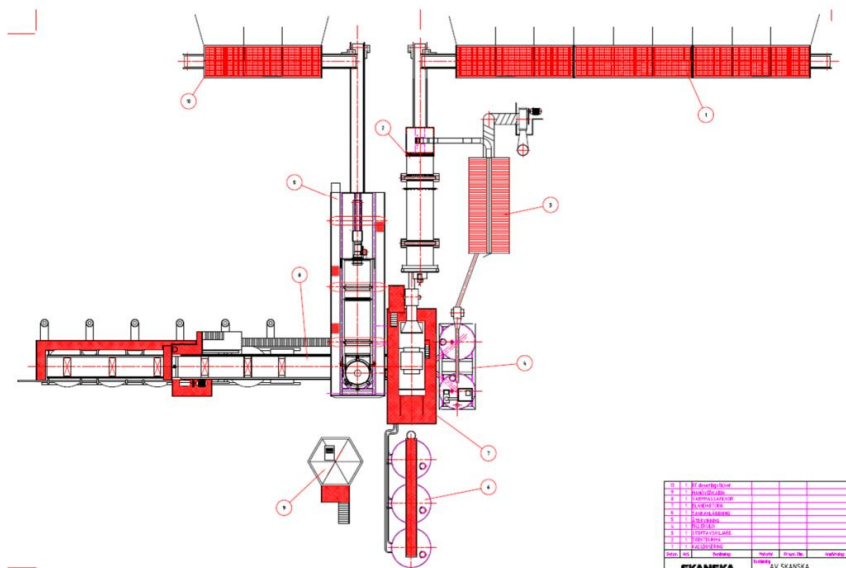
### Återvinning (7):

Återvinning av asfalt kan ske antingen kallt eller varmt.

Vid varm återvinning värms den krossade återvunna asfalten och blandas med den nya asfalten innan den används i blandaren.

### Manöverkabin (8):

Hela processen styrs från en manöverkabin med hjälp av en processdator. Processoperatören väljer recept och styr bland annat kalldoseringen och temperaturen under processen.



*Detaljerad beskrivning av Asfalttillverkningsprocessen, Björn Nilsson, Skanska Maskinteknik.*

- **Vad är dimensionerna för silon, är det bredden eller höjden som är mest betydande?**

Antal silos kan vara från 6 till 8 silor, beroende på sortiment då behovet finns mer för de mindre storlekar på stenmaterial, där basdiametern för varje silo vanligtvis inte överstiger 3,5 meter enligt regler från Transportstyrelsen. När det kommer till själva silons konstruktion kan höjden variera från 8 meter upp till maximalt 24 meter. Varje silo förväntas ha en kapacitet på 100 till 200 ton per sortiment, vilket gör att de kan anpassas efter olika behov och krav på lagring.

- **Vilken utomhustemperatur ska vi utgå ifrån i simuleringen?**

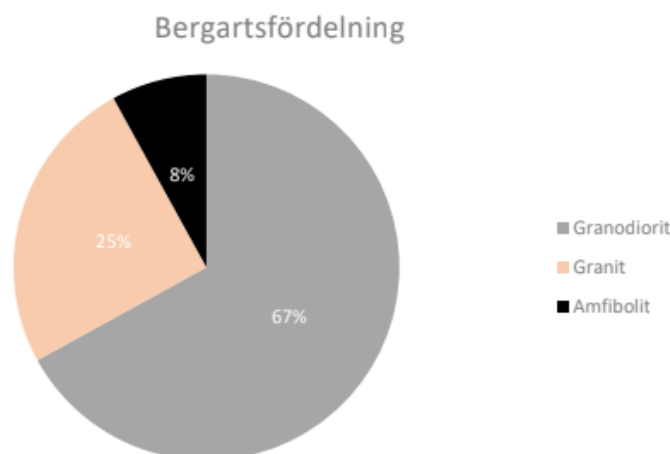
15°C, i och med asfalttillverkningsprocessen sker under april till november.

- **Hur mycket energi frigörs när man bränner upp 1 liter olja eller bensin?**  
När man bränner upp 1 liter olja eller bensin, frigörs ungefär 10–12 kWh.
- **Vad är genomloppstiden / uppvärmningstiden i en torktrumma för att värma upp en ton stenmaterial?**  
Cirka 5-7 minuter beroende på trummans längd, diameter, rotationshastigheten samt fukthalten i stenmaterialet.

**Intervjuperson (2): Tobias Pålsson, Teknik-Specialist, Skanska.**

- **Namnet på stenmaterialet (eller krossad sten) som vanligtvis används i Sperlingsholm asfalttillverkning?**

Granodiorit, Enligt en Petrografisk analys från Skanska Teknik, (2022).



Figur 2. Diagram över den procentuella fördelningen av bergartstyper i provet.

- **Värmeledningsförmåga (mätt i W/mK) för stenmaterial?**  
2,56 - 2,88 W/(m·K). Enligt (Arndt et al. 1997)
- **Densitet (mätt i kg/m<sup>3</sup>) för stenmaterialet?**  
2700 kg/m<sup>3</sup>. Enligt Sundberg, J. (1991) & (Arndt et al. 1997)
- **Värmekapacitet vid konstant tryck (mätt i J/(kg·K)) för stenmaterialet?**  
733 J/(kg·K). Enligt (Arndt et al. 1997)

**Intervjuperson (3): Moamar Alhoushan, Adjunkt, Civil Makiningenjör.**

---

Moamar Alhoushan är far till författaren, Ahmad Alhoushan, och hans stöd har varit ovärderligt för detta examensarbete. Han har spelat en avgörande roll genom att hjälpa oss att förstå mjukvaran Comsol Multiphysics och vägleda oss genom dess användning.

- Genom sina kunskaper inom maskinteknik, simuleringar och termodynamiska principer har han delat med sig av värdefull expertis som har varit avgörande för vårt arbete. Diskussionerna vi haft med honom har varit särskilt givande, då han har kunnat bidra med perspektiv och vägledning kring ämnen som behandlas i detta examensarbete. Dessutom har han hjälpt oss att använda vårt logiska tänkande på ett effektivt sätt i vår studie.

#### **Intervjuperson (4): Håkan Glöckner, Försäljningschef, Industri på Paroc AB.**

Författarna blev rekommenderade av Björn Nilsson, Skanska maskinteknik att kontakta företaget Paroc AB för deras framgång inom energieffektiva och obrännbara isoleringslösningar av stenull för nybyggnation och renovering. Syftet med denna intervju var att få en djupare förståelse för byggisoleringsmaterial samt deras verktyg som kan vara värdefulla för vidare studier i detta examensarbete.

- Deras beräkningsprogram, såsom PAROC  $CO_2$  Calculator och DOF-Therm, går helt enkelt ut på att beräkna Global warming potential GWP-värdet för produkter inom byggisolering samt beräkna U-värden i till exempel väggar, golv och tak, beräkna fuktighet och utvärdera risker för kondens samt beräkna energianvändningen i konstruktioner. Som tidigare nämnts i studien är stenull ett av de mest effektiva byggisoleringsmaterialen, och därför lockades vi av PAROC Stenull som erbjuder många hållbara fördelar. Dessutom har deras tidigare renoveringsprojekt med implementering av deras byggisoleringsmaterial visat ett mycket effektivt resultat av energibesparing.
- Denna intervju handlar helt enkelt om att författarna ville ha mer kunskap om byggisoleringsmaterial som kan vara till nytta för att förstå vetenskapliga artiklar samt byggisoleringsegenskaper som vi använde oss av i studien.