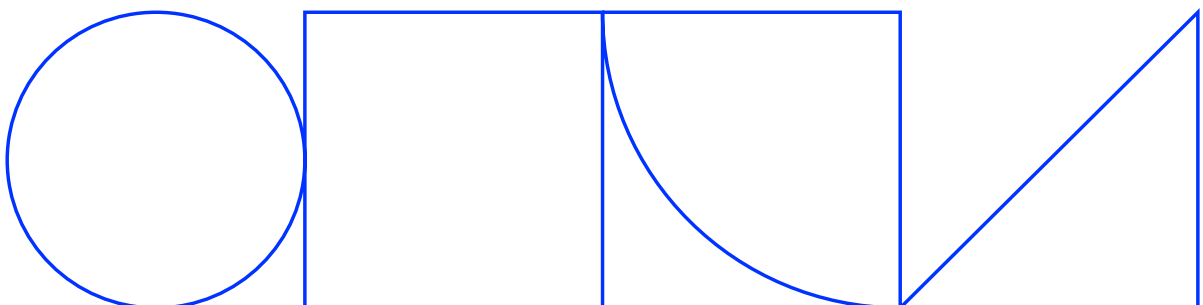


Klimatpåverkan från byggrobotik

En analys av industrirobotik för drift i byggindustri

Åsa Thrysin, Frida Görman
IVL Svenska Miljöinstitutet

2025-02-21

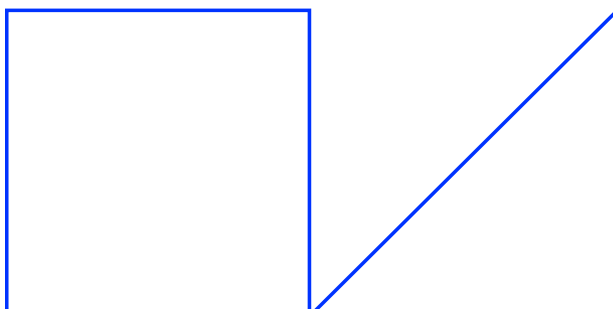


Förord

Vi vill med denna studie ta ett första steg till att undersöka miljömässig hållbarhet för användning av robotapplikationer i byggprojekt. Då det ännu saknas storskalig användning har analys gjorts för robotar i prototypstadiet där antaganden behövt göras och fiktiva scenarion använts. Resultaten från rapporten ska därför ses som indikativa.

Författare av rapporten är Åsa Thrysin och Frida Görman (IVL). Författarna har utfört projektet tillsammans med Helena Eriksson (Center för Byggrobotik, PEAB) och Mathias Haage (Center för Byggrobotik, Datavetenskap vid Lunds universitet) som bidragit med expertkompetens inom utveckling och användning av robotapplikationer i byggindustrin. Beräkningar och analyser har genomförts av IVL utifrån det underlag som har delgivits från projektgruppen.

Vi vill rikta ett tack till projektets finansiärer som är PEAB via SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) samt SIVL (Stiftelsen Institutionen för Vatten- och Luftvårdsforskning). Projektet har pågått åren 2023–2024.



Sammanfattning

Det finns idag ett utbrett klimatfokus i byggindustrin där bland annat färdplanen för fossilfri konkurrenskraft som tagits fram för branschen är drivande (Fossilfritt Sverige, 2024). Från den 1 januari 2022 gäller även lagen om klimatdeklarationer där byggprojekt ska redovisa vilken klimatpåverkan en ny byggnad har i byggskedet av sin livscykel (Sveriges riksdag, 2021).

Eftersom byggindustrin kan ses som en riskutsatt och olycksbenägen miljö utgör förutom miljömässig hållbarhet och minskad klimatpåverkan även social hållbarhet en viktig faktor. För att minska risker för olyckor och öka den sociala hållbarheten i samband med utfört arbete kan användning av robotautomation anpassas till användning i byggprojekt (Brosque & Fischer, 2022). Robotapplikationerna har sitt ursprung i tillverkningsindustrin, där det är ett effektivt verktyg för att hjälpa till med repetitiva, tunga och smutsiga arbeten.

Förutom bidrag till social hållbarhet i byggindustrin är det detta projekts uppfattning att robotautomation även har potential att bidra med en minskad klimatpåverkan i byggprocessen. Detta genom en jämnare byggkvalité som tillåter konstruktionsoptimering, minskat spill och minskad omarbetning på grund av byggfel. Dessutom har en del robotapplikationer möjlighet att förbättra arbetsmiljö (Brosque & Fischer, 2022). Detta i kombination med en åldrande och minskande bemanning i byggsektorn har intresset för nyttjande av industriautomation blivit större.

Än så länge förekommer det ingen storskalig användning av robotautomation inom byggsektorn. Det pågår däremot arbete för att realisera byggautomation och en inblick i CORDIS¹ (där resultat från EU-genomförda projekt samlas) visar på ett stort antal projekt inom området de senaste åren. När lösningar är på plats skulle det finnas möjlighet till ett skifte mot storskaligt nyttjande av robotik i byggd miljö med ökad social och ekonomisk hållbarhet.

Trots stort fokus på minskad klimatpåverkan i byggbranschen idag och införandet av lagen om klimatdeklarationer har hittills få, eller inga, studier genomförts i Sverige med publika resultat med fokus på klimatpåverkan från robotikautomation i byggprojekt. Vi vet att införa fler maskiner på en byggarbetsplats innebär i sig en ökad klimatpåverkan på grund av dess energiförbrukning och tillverkning. Det som är intressant att studera är storleken på denna klimatpåverkan i jämförelse med den besparing i klimatutsläpp som kan göras med hjälp av byggrobotar, exempelvis genom minskade mängder inköpt byggmaterial. Det är idag ett utforskat område om byggrobotar kan ha en påverkan på ett byggprojekts klimatpåverkan.

Vi vill i detta projekt därför undersöka vad det skulle kunna innebära att använda robotar på byggarbetsplatsen utifrån ett klimatperspektiv. Detta genom att genomföra klimatberäkningar på prototyper, tillgängliggjorda för denna studie, och se vilka problem och hinder vi stöter på längs vägen.

¹ <https://cordis.europa.eu/>

Frågeställningar i denna studie innefattar:

- Vad bör inkluderas vid klimatanalys av robotapplikationer på byggarbetsplats?
- Hur kan jämförelse av klimatpåverkan från robotapplikationer göras mot traditionellt byggande?
- Vilka aspekter kan bli viktiga utifrån ett klimatperspektiv vid utveckling av robotapplikationer?

Genomförda analyser inkluderar undersökt klimatpåverkan från robotprototyper med två avgränsningar. Den första avser avgränsning enligt lagen om klimatdeklarationer där klimatpåverkan från robotens energianvändning inkluderas. I den andra avgränsningen analyserar vi klimatpåverkan som ligger utanför avgränsning i lagkravet där transport av robotapplikationer till och från byggarbetsplatsen inkluderas tillsammans med klimatpåverkan från tillverkning av robotutrustning. Resultaterande klimatpåverkan försöker vi sedan relatera till övrig klimatpåverkan från ett byggprojekt. Totalt analyserades fyra olika robotapplikationer som samtliga är eldrivna.

Eftersom robotarna är i prototypstadie och därmed fortfarande under utveckling bör resultaten ses som indikativa då de sannolikt kommer förändras över tid. Andra utmaningar detta medför är även att de inte används fullskaligt i projekt och att fiktiva scenarier därför har behövt användas. Analysen av resultaten ger därmed indikationer på vilka aktiviteter som kan få större påverkan på klimatet och vilka som är av mindre betydelse. Samtidigt pekar de genomförda analyserna på potentiella utvecklingsområden kopplat till klimatfrågan som kan ge vägledning för både utveckling och användning av robotapplikationer på byggarbetsplatser.

Sammanfattningsvis har projektet följande slutsatser:

- Beräkning av klimatpåverkan från robotapplikationers energianvändning och tillverkning är komplext och behöver i dagsläget stöttning av expertkompetens. Framgent förväntas energianvändning enklare gå att mäta på byggarbetsplatsen.
- En relativt liten minskning av spill eller använt material räcker för att väga upp mot klimatpåverkan från robotarnas elanvändning.
- Jämförelse av klimatpåverkan från robotapplikationer mot traditionellt byggande är i sin linda där flera aspekter även utanför avgränsning i lagen om klimatdeklarationer behöver vävas in för att få en tydligare bild.
- Fortsatt utveckling av robotapplikationer utifrån ett klimatperspektiv bör fokusera på möjligheten till användning av mindre mängd byggmaterial, ersätta fossildrivna arbetsmaskiner och skapa förutsättning för färre materialtransporter.
- Aspekter som kan bli viktiga att tänka på vid användning av robotapplikationer är att hålla nere antalet transporter av robotar samt där möjligt använda biobränslen eller eldrivna fordon för transporter och arbetsmaskiner.

Projektet föreslår även fortsatt arbete med fokus på applicering i faktiska projekt där analys av robotapplikationernas potential till minskad användning av material, bränsledrivna fordon och materialtransporter undersöks jämfört med traditionellt byggande. Vidare föreslås ett fokus på att öka tillgången på data för sådana analyser.

Innehållsförteckning

1. Inledning	5
1.1. Syfte och mål	6
1.2. Avgränsningar	6
1.3. Frågeställning	7
1.4. Disposition	7
2. Klimatpåverkan från robotapplikation i drift	8
2.1. Robotiserat byggsystem – Bettan	10
2.2. Inspektion av byggarbetsplatsen - Robothunden Buster	15
2.3. Mikrofabrik – HKM	19
2.4. Robot för riskeliminering vid pumpslang	25
3. Klimatpåverkan från tillverkning och transport av byggrobot	28
3.1. Transport av byggrobot till och från byggarbetsplats	28
3.2. Tillverkning av byggrobot	31
4. Diskussion	35
4.1. Expertkunskap behövs i dagsläget	35
4.2. Resultaten i denna rapport ska ses som indikativa	35
4.3. Utmaningar i jämförelse med traditionellt byggande	36
4.4. Ytterligare förslag på vidare studier	37
5. Slutsats	38
Referenser	39

1. Inledning

Senast år 2045 ska Sverige enligt de nationella klimatmålen inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären. För att nå detta mål måste alla sektorer bidra, inte minst bygg- och anläggningssektorn som står för cirka en femtedel av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser (Boverket, 2024a). För att bidra till Sveriges klimatmål har branschen därför tagit fram en färdplan för fossilfri konkurrenskraft (Fossilfritt Sverige, 2024). Kopplat till färdplanen pågår det just nu flertalet arbeten och initiativ i hela byggbranschen för att bidra till dessa mål.

Från den 1 januari 2022 gäller även lagen om klimatdeklaration (Sveriges riksdag, 2021). Denna lag kräver att byggnader över 100 kvadratmeter med bygglov från och med den 1 januari 2022 beräknar sin klimatpåverkan från utvinning av råmaterial till dess att byggnaden står färdig, så kallat vagga till grind.

Eftersom byggindustrin kan ses som en riskutsatt och olycksbenägen miljö är förutom miljömässig hållbarhet och minskad klimatpåverkan även social hållbarhet en viktig faktor. För att minska riskerna för olyckor och öka den sociala hållbarheten i samband med utfört arbete kan användning av robotautomation anpassas till användning i byggprojekt (Brosque & Fischer, 2022). Robotapplikationerna har sitt ursprung i tillverkningsindustrin, där det är ett effektivt verktyg för att hjälpa till med repetitiva, tunga och smutsiga arbeten. Detta är positiva egenskaper för både miljömässig, social och ekonomisk hållbarhet som skulle kunna göra verklig nytta om det överförs till byggindustrin.

Förutom bidrag till social hållbarhet i byggindustrin är det detta projekts uppfattning att robotautomation även har potential att bidra med en minskad klimatpåverkan i byggprocessen. Detta genom en jämnare byggkvalité som tillåter konstruktionsoptimering, minskat spill och minskad omarbetning på grund av byggfel. Dessutom kan vissa robotapplikationer förbättra arbetsmiljön på ett liknande sätt som inom tillverkningsindustrin (Brosque & Fischer, 2022). Detta i kombination med en åldrande och minskande bemanning i byggsektorn har intresset för nyttjande av industriautomation blivit större.

Utmaningar som exempelvis höga initiala kostnader, tillgång till rätt kompetens och arbetskulturella utmaningar är några bidragande faktorer för att vi ännu inte sett robotik i stor skala i byggindustrin (Davila Delgado, et al., 2019) (Blanco, et al., 2018). Det pågår samtidigt arbete för att realisera byggautomation. CORDIS², där resultat från EU-genomförda projekt samlas, visar att i genomsnitt 10 procent av startade byggrelaterade projekt och 18 procent av startade robotrelaterade projekt har fokuserat på robotik i byggindustrin de senaste 10 åren. En blick in i denna databas ger en tydlig bild av trenderna inom byggrobotik. När lösningar är på plats skulle det finnas möjlighet till ett skifte mot storskaligt nyttjande av robotik i byggd miljö med ökad social och ekonomisk hållbarhet. Den fråga som detta projekt ställer sig är däremot

² <https://cordis.europa.eu/>

vad ett sådant skifte skulle innebära för påverkan på den miljömässiga hållbarheten med fokus på vårt klimat.

Trots stort fokus på minskad klimatpåverkan i byggbranschen idag och införandet av lagen om klimatdeklarationer har hittills få, eller inga, studier genomförts i Sverige med publika resultat med fokus på klimatpåverkan från robotikautomation i byggprojekt. Vi vet att införa fler maskiner på en byggarbetsplats innebär i sig en ökad klimatpåverkan på grund av dess energiförbrukning och tillverkning. Det som är intressant att studera är storleken på denna klimatpåverkan i jämförelse med den besparing i klimatutsläpp som kan göras med hjälp av byggrobotar, exempelvis genom minskade mängder inköpt byggmaterial. Det är idag ett utforskat område om byggrobotar kan ha en påverkan på ett byggprojekts klimatpåverkan.

Vi vill i detta projekt därför undersöka vad det skulle kunna innebära att använda robotar på byggarbetsplatsen utifrån ett klimatperspektiv. Då detta inte gjorts i några studier sedan innan ger detta projekt på så vis en första inblick i klimatpåverkan från drift av robotapplikationer på byggarbetsplatsen och banar vägen inom detta område.

1.1. Syfte och mål

Detta projekt syftar till att utifrån miljömässig hållbarhet undersöka vad det skulle innebära att använda robotar på en byggarbetsplats jämfört med traditionellt byggande. Detta för att ge en första inblick i vad det kan innebära att använda robotar sett ur ett klimatperspektiv och se om det finns möjlighet att redan idag ge vägledning till dess användning och vidare utveckling.

Projektets mål är att undersöka vad det är som krävs för att utvärdera klimatpåverkan från en robot som används på byggarbetsplatsen och få en första inblick i dess storleksordning och sätta detta i relation till traditionellt byggande.

1.2. Avgränsningar

Projektet avgränsar sig till att utvärdera klimatpåverkan från fyra robotapplikationer i prototypstadiet. Prototyperna har valts utifrån tillgänglighet samt spridning i robottyp och applikation. Då det ännu saknas storskalig användning har antaganden gjorts kopplat till robotarnas energi- och övrig resursanvändning där fiktiva scenarion används. Resultaten från rapporten ska därför ses som indikativa.

Den miljöindikator som undersöks har avgränsats till klimatpåverkan (GWP³).

³ Global warming potential (GWP) är ett mått på förmågan hos en växthusgas att bidra till växthuseffekten och den globala uppvärmningen.

1.3. Frågeställning

Då det inte finns tidigare forskning eller studier kopplat till klimatpåverkan från byggrobotik har projektet identifierat frågeställningar för att studera hur klimatanalyser kan implementeras samt om slutsatser kan dras kring vilka aspekter som är viktiga vid vidare tillämpning av robotar på byggarbetsplatser.

Frågeställningar i denna studie innefattar:

- Vad bör inkluderas vid klimatanalys av robotapplikationer på byggarbetsplats?
- Hur kan jämförelse av klimatpåverkan från robotapplikationer göras mot traditionellt byggande?
- Vilka aspekter kan bli viktiga utifrån ett klimatperspektiv vid utveckling av robotapplikationer?

1.4. Disposition

Rapporten är uppdelat i två huvudkapitel för genomförda beräkningar och avslutas med gemensam diskussion och slutsats. De två beräkningskapitlen är uppdelade på (1) klimatpåverkan från robotapplikation i drift och (2) klimatpåverkan från transport och tillverkning av robotapplikation. Uppdelning har gjorts eftersom det första kapitlet avser klimatpåverkan från robotapplikation som inkluderas i omfattningen för lagen om klimatdeklarationer medan klimatpåverkan som beräknas i det andra kapitlet normalt ligger utanför de systemgränser som används för ett byggprojekt. Varje beräkningskapitel innehåller metod, indata, resultat och analys för respektive beräkning.

2. Klimatpåverkan från robotapplikation i drift

I detta kapitel beskrivs genomförda beräkningar, använd LCA-metodik, insamling av indata och systemgränser samt resultat och analys för respektive robotapplikation.

Beräkningar har utförts på följande fyra robotapplikationer:

- Robotiserat byggsystem – Bettan: mellanstor industrirobot
- Inspektion av byggarbetsplatsen – Robothunden Buster: mobil robot
- Mikrofabrik – HKM: en logistikförpackning (container)
- Robot för riskeliminering vid pumpslang: robot monterad på pumpslang

Varje robot analyseras utifrån de aktiviteter som kan förknippas med respektive robot i relation till traditionellt byggande. Därefter beräknas klimatpåverkan från de aktiviteter som anses vara tillkommande jämfört med traditionellt bygganden. Med tillkommande aktiviteter avses därmed aktiviteter som sannolikt inte hade utförts i traditionellt byggande och som av projektet anses starkt kopplat till robotapplikationen.

Genomförda beräkningar

Utifrån genomförd analys av aktiviteter genomförs två beräkningar och en känslighetsanalys per byggrobot, dessa är:

1. Klimatpåverkan från energianvändning av robotapplikation på byggarbetsplats
 - a. Om relevant beräknas även klimatpåverkan från annan energianvändning som kan allokeras till robotapplikationen.
2. Klimatpåverkan från energianvändning satt i relation till klimatpåverkan från motsvarande mängd byggmaterial som kan relateras till byggroboten.
3. Känslighetsanalys med alternativ energimix.

Den första beräkningen avser att analysera klimatpåverkan från användning av robotapplikationerna på byggarbetsplatsen med tillhörande aktiviteter. Den andra beräkningen syftar till att sätta klimatpåverkan från använd mängd energi i relation till den minskning i material som skulle krävas för att väga upp för använd energi.

Genomförd beräkning ligger i linje med hur material- och energiåtgång på byggarbetsplatsen beräknas enligt lagen om klimatdeklarationer bortsett från att typiska generiska klimatdata används istället för konservativa⁴. Avgränsningen för lagen om klimatdeklarationer avser byggskedet där klimatpåverkan från en nyproducerad byggnad är uppdelat i tillverkning av byggmaterial, transport av material till byggarbetsplatsen, och bygg- och installationsprocessen⁵.

Beräkning kompletteras med känslighetsanalys där nordisk elmix används istället för svensk elmix. För en av robotapplikationerna inkluderas även användning av fossila bränslen, här genomförs även en känslighetsanalys för alternativ bränslemix.

⁴ Generiska klimatdata som används i lagkravet är konservativt satt, i detta fall 25 % högre än genomsnittet (typiska data) (Boverket, 2024b)

⁵ Klimatpåverkan från en nyproducerad byggnad fördelar sig genomsnittligt med 80-85% från tillverkning av byggmaterial, 5-10% från transport av material till byggarbetsplatsen och 10% från bygg- och installationsprocessen (Malmqvist, et al., 2023).

Först beskrivs använd LCA-metodik övergripande, därefter ges mer detaljerade beskrivningar av metodik och indata i varje robotapplikation tillsammans med resultat och analys i kapitel 2.1–2.4.

LCA-metodik

Genomförda beräkningar utgår från LCA-moduler i EN 15978, se Tabell 1. Byggrobotens energianvändning inkluderas som en del av energianvändningen från bygg- och installationsprocessen (A5 Energi). Använt material i genomförda beräkningar hamnar i produktskedet (A1-A3) samt i A5 Spill. Transport av material till byggarbetsplatsen (A4) antas ha samma eller snarlik klimatpåverkan som för traditionellt byggande och inkluderas inte i genomförd analys.

Tabell 1 LCA-moduler för en byggnad enligt EN 15978

Systemgränser																
A Byggskedet					B Användningsskedet							C Slutskedet				D Utanför systemgränsen
Produktskedet			Byggproduktions-skedet													
Råvaruförsörjning	Transport	Tillverkning	Transport	Bygg- och installationsprocessen	Användning	Underhåll	Reparation	Utbyte	Renovering	Driftenergi	Vattenanvändning	Demontering, rivning	Transport	Restprodukthantering	Bortskaffning	Återanvändnings-, energiutvinnings-, återvinningspotentialer
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

I första hand används EPD:er⁶ för klimatdata. Saknas specifika materialval används typiska generiska data då denna typ av data skildrar verkligheten bättre än konservativa generiska data.

Klimatpåverkan beräknas utifrån global uppvärmningspotential (GWP) och mäts i kg koldioxidekvivalenter (kg CO₂e)⁷. Den GWP-indikator som används är GWP-GHG⁸. Klimatpåverkan fördelas sedan ut på lämplig enhet för de olika robotapplikationerna, ett exempel är klimatpåverkan per kvadratmeter byggd vägg.

Insamling av indata

Insamling av data för respektive robotapplikation har visat sig ha sina utmaningar. Detta eftersom robotarna i dagsläget inte används i full skala utan endast är i ett pilotstadium. Därför saknas det ofta uppmätt data för den resursanvändning de

⁶ EPD står för Environmental Product Declaration och är en miljövarudeklaration som innehåller resultatet från en LCA av en byggprodukt.

⁷ GWP är ett standardiserat mått på hur klimatpåverkan mäts, koldioxidekvivalenter är ett sätt att relatera andra växthusgasers påverkan till motsvarande mängd koldioxid. Ett kilo metan (CH₄) motsvarar exempelvis ca 27 kg koldioxid (CO₂) sett till en period på 100 år (Greenhouse Gas Protocol, 2024).

⁸ GWP-GHG inkluderar den sammantagna effekten av utsläpp av växthusgaser, exklusive upptag och utsläpp biogen koldioxid (Boverket, 2024c).

motsvarar. Vidare har det även visat sig att data från motsvarande aktiviteter saknats även för traditionellt byggande. Den information som erhållits och som ligger till grund för genomförda beräkningar är följande:

- Beskrivning av robotapplikationen och arbetsmoment.
- Typ av byggmaterial samt dess åtgång relaterat till robotapplikationen.
- Energianvändning (simulerad, beräknad eller uppmätt i laboratorium) för robotapplikationen och eventuellt tillkommande arbete.

Generiskt klimatdata för material samt klimatdata för svensk elmix hämtas från Boverkets klimatdatabas⁹. För svensk elmix används 0,037 kg koldioxidekvivalenter per kWh för samtliga beräkningar.

Känslighetsanalys

Beräkning kompletteras med känslighetsanalys där klimatpåverkan från nordisk elmix används istället för svensk elmix. Anledningen att grundanalysen använder svensk elmix är för att svensk elmix ska användas i lagen om klimatdeklaration.

Varför det är intressant att komplettera analysen med nordisk elmix är för att nordisk elmix kan anses bättre spegla den klimatpåverkan som belastar elanvändningen i Sverige (Sandgren & Nilsson, 2021). För nordisk elmix används 0,0904 kg koldioxidekvivalenter per kWh.

2.1. Robotiserat byggsystem – Bettan

Bettan är en prototyp som printar ut fog på byggblock samt placerar byggblocken och ersätter därmed fysiskt manuellt arbete. Bettan är helt eldriven och kopplas in på plats. Blandning av fog och eventuell beskärning av byggblock görs i dagsläget manuellt utanför roboten, precis som i traditionellt byggande.

Bettan består av två komponenter. Ena komponenten är industriroboten IRB4600 med tillhörande styrskåp som genomför själva arbetet att printa ut fog och placera byggblock. Andra komponenten är spindelkranen Maeda 174C som gör roboten mobil. Spindelkranen har modifierats och en elmotor har ersatt en förbränningsmotor samt tidigare kran har tagits bort och ersatts av industriroboten. För att montera industriroboten på spindelkranen har en adapterplatta adderats. Styrskåpet till industriroboten står separat och är förbundet med roboten via en navelsträng som består av ett kabelpaket med utvändigt skydd. Se Figur 1 för bild på robot.

⁹ Version 02.05.000 (Boverket, 2024d)



Figur 1 Robotiserat byggsystem – Bettan vid byggnation av vägg med Finja exakt isolerblock. Bildkälla: Mathias Haage, Lunds universitet.

Avgränsning och omfattning

Beräkning av klimatpåverkan från byggrobotens energianvändning vid murning av vägg har genomförts och ställs i relation till klimatpåverkan från använt byggmaterial. Därefter beräknas hur mycket material roboten behöver spara in på för att väga upp för klimatpåverkan från använd energi.

Genomförd beräkning avser tillverkning av en kvadratmeter vägg med byggblock *Finja Isolerblock Exakt* och fog *Murbruk Exakt, Dry Mortar*. Beräkningen avgränsas därmed till energianvändning under drift samt klimatpåverkan från använt material.

Energisimulering med ovan nämnda byggmaterial har genomförts. Detta då de utgör en vanlig applicering för roboten samtidigt som byggblocken ligger i det högre viktspannet jämfört med andra typer av byggblock som kan användas. Detta medför att genomförd beräkning tar höjd för den energianvändning som kommer med tyngre byggblock. Använd energi vid tillverkning av väggen kommer därmed ge högre påverkan än för byggblock med lägre vikt.

För denna beräkning mäts klimatpåverkan i kg koldioxidekvivalenter per kvadratmeter vägg med utvalda byggmaterial (kg CO₂e/m² vägg).

Insamling av indata

Energianvändning för byggrobot Bettan har tillgängliggjorts av Center för Byggrobotik. Insamlad data består av simulerad energianvändning för 3D-utskrift (fogning) och placering av byggblock samt uppmätt energianvändning för datorns energianvändning. Simulering har genomförts i programmeringsverktyget RobotStudio från ABB.

Datorns energianvändning antas motsvaras av energianvändning vid tomgångskörning. Eftersom data saknas för energianvändning av stensåg vid eventuell kapning av byggblock har detta inkluderats genom påslag. Simulerad energianvändning samt påslag specificeras i Tabell 2.

Tabell 2 Simulerad energianvändning (el) för byggrobot Bettan. Inkluderar 3D-utskrift, placering av block och påslag för stensåg och andra osäkerheter. Energisimulering genomförd av Cognibotics.

Simulerad elanvändning		Kommentar
Simulerad energianvändning per block [MJ/block]	0,0094	Inkluderar energianvändning för 3D-utskrift av fog samt placering av block
Datorns energianvändning [MJ/block]	0,0026	Antas motsvaras av energianvändning vid tomgångskörning
Påslag för osäkerheter	50%	Tilltaget påslag för osäkerheter samt energi från stensåg
Total energianvändning inkl. påslag [MJ/block]	0,018	Inkluderar energianvändning för 3D-utskrift samt placering av block samt påslag för osäkerheter

Materialmängder och klimatpåverkan för väggsystemet har tagits från produktdatablad (Finja, 2023) (Finja, 2024) och miljövarudeklaration (EPD) (Finja, 2022a) (Finja, 2022b) för produkterna *Finja Isolerblock Exakt* och *Murbruk Exakt*. I produktdatablad och EPD:er specificeras antal block per kvadratmeter vägg, mängd fog och klimatpåverkan för respektive produkt. Andel spill har antagits utifrån spillmängder för motsvarande byggmaterial i Boverkets klimatdatabas (Boverket, 2024d).

Materialåtgång, vikter samt spillandelar specificeras i Tabell 3 och Tabell 4 för byggblock respektive fog.

Tabell 3 Materialåtgång för byggblock enligt produktdatablad för *Finja Isolerblock Exakt* (Finja, 2023). Spillandel kommer från Boverkets klimatdatabas (version 02.05.000) (Boverket, 2024d).

Finja Isolerblock exakt		
Vikt per block	14,9	kg/st
Antal block per kvadratmeter vägg exkl. spill	8,3	st/m ²
Total vikt per kvadratmeter vägg exkl. spill	123,7	kg/m ²
Spill Boverkets klimatdatabas, Murblock	5	%

Tabell 4 Materialåtgång för fog enligt produktdatablad för *Finja Murbruk Exakt* (Finja, 2024). Spillandel kommer från Boverkets klimatdatabas (version 02.05.000) (Boverket, 2024d).

Murbruk Exakt, Dry Mortar		
Materialåtgång per väggyta exkl. spill	2,1*	kg/m ²
Spill Boverkets klimatdatabas, murbruk	5	%

* Spann mellan 2–4 mm, mängd antas motsvara 3 mm tjockt lager

Använd klimatdata för använt material specificeras i Tabell 5.

Tabell 5 Använd klimatdata för använt material i GWP-GHG per redovisad enheten.

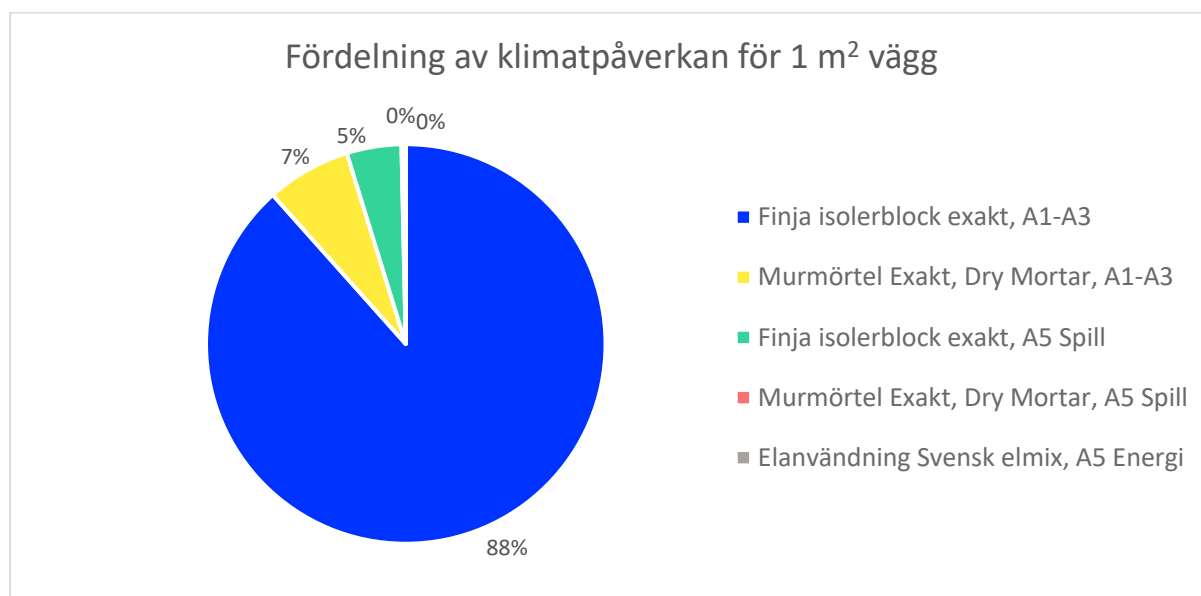
Resurs	GWP-GHG [kg CO ₂ e/enhet]	Enhet	Källa
Finja isolerblock exakt	0,301	kg block	EPD: NEPD-1462-486-EN (Finja, 2022a)
Murbruk Exakt, Dry Mortar	0,166	kg ready made mortar	EPD: NEPD-1449-484-EN (Finja, 2022b)

Resultat

Beräknat resultat redovisas i Tabell 6 där den resulterande klimatpåverkan från en kvadratmeter murad vägg är 42 kg koldioxidekvivalenter och där klimatpåverkan från robotens elanvändning utgör en mycket liten del av klimatpåverkan, endast 0,004%. Fördelningen av klimatpåverkan visas även i Figur 2.

Tabell 6 Klimatpåverkan (GWP-GHG) från en kvadratmeter vägg byggd med byggrobot Bettan och Finja isolerblock exakt väggsystem och svensk elmix. Värdena har avrundats till närmsta heltal alternativt ytterligare värdesiffra för väldigt små värden.

Aktivitet/material	GWP-GHG per väggyta [kg CO ₂ e/m ²]	Andel (%)
A1-A3, Finja isolerblock exakt	37	88%
A1-A3, Murmörtel Exakt, Dry Mortar	3	7%
A5 Spill, Finja isolerblock exakt	2	4%
A5 Spill, Murmörtel Exakt, Dry Mortar	0,1	0,3%
A5 Energi, elanvändning svensk elmix	0,002	0,004%
Total klimatpåverkan (A1-A3+A5) svensk elmix	42	100%
Varav A1-A3	40	95%
Varav A5 Spill	2,0	5%
Varav A5 Energi	0,0015	0,004%



Figur 2 Fördelning av klimatpåverkan för en kvadratmeter vägg byggd med byggrobot Bettan och Finja isolerblock exakt väggsystem och svensk elmix.

Känslighetsanalys

Genomförd känslighetsanalys redovisas i Tabell 7. Observera att klimatpåverkan från materialanvändning A1-A3 + A5 Spill är samma som i Tabell 6.

Känslighetsanalysen visar att klimatpåverkan vid användning av nordisk elmix är cirka dubbelt så hög som vid användning av svensk elmix, 0,009 % av total påverkan jämfört

med 0,004 %. Trots detta utgör energianvändningen fortfarande en ytterst begränsad andel av klimatpåverkan per kvadratmeter vägg. Detta eftersom klimatpåverkan framför allt kommer från använt material.

Tabell 7 Känslighetsanalys av klimatdata för använd elmix. Klimatpåverkan (GWP-GHG) från en kvadratmeter vägg byggd med byggrobot Bettan och Finja isolerblock exakt väggsystem och nordisk elmix (grönmarkerad i tabell).

Aktivitet/material	GWP-GHG per väggyta [kg CO ₂ e/m ²]	Andel (%)
Finja isolerblock exakt, A1-A3	37	88%
Murmörtel Exakt, Dry Mortar, A1-A3	3	7%
Finja isolerblock exakt, A5 Spill	2	4%
Murmörtel Exakt, Dry Mortar, A5 Spill	0,1	0,3%
Elanvändning nordisk elmix, A5 Energi	0,004	0,009%
Total klimatpåverkan (A1-A3+A5) nordisk elmix	42,1	100%
Varav A1-A3	40,1	95%
Varav A5 Spill	2,0	5%
Varav A5 Energi	0,004	0,009%

Analys

Eftersom Bettan ersätter manuellt arbete kommer använd energi på byggarbetsplatsen utgöra en ökad klimatpåverkan jämfört med energianvändningen på en traditionell byggarbetsplats. Genomförd beräkning visar däremot att robotens elanvändning endast utgör en ytterst begränsad andel av väggens klimatpåverkan. Genom en marginell minskning i uppkommit spill skulle därmed tillkommande klimatpåverkan från robotens energianvändning snabbt kompenseras för.

I syfte att minska klimatpåverkan från genomfört byggprojekt bör man därför fokusera på andra aspekter än robotens energianvändning för att minska klimatpåverkan från projektet. Utifrån genomförd beräkning skulle detta exempelvis kunna vara att välja ett material med lägre klimatpåverkan och minska mängden uppkommit spill. Kan byggroboten bidra till att minska mängden använt material skulle därför byggroboten kunna bidra till att minska klimatpåverkan från ett byggprojekt.

Osäkerheter

Resultatet visar på att klimatpåverkan från byggroboten på byggarbetsplatsen är låg jämfört med använt material trots generöst påslag för osäkerheter och stensåg samt val av ett tyngre byggblock. Med avseende på energianvändningens begränsade andel av väggens klimatpåverkan är det sannolikt att använd energi inte kommer påverka resultatet även om andra byggmaterial används. Detta är däremot inte något som testats i detta projekt.

Vidare bör det nämnas att genomförd beräkning är begränsad till svensk och nordisk elmix, vilka utifrån ett globalt perspektiv har en låg klimatpåverkan. Används roboten i ett land med en betydligt högre klimatpåverkan i elnätet kommer robotens energianvändning utgöra en större andel av väggens klimatpåverkan. Nya beräkningar

hade därför behövt genomföras om roboten används i ett land med betydligt högre emissionsfaktor för använd el.

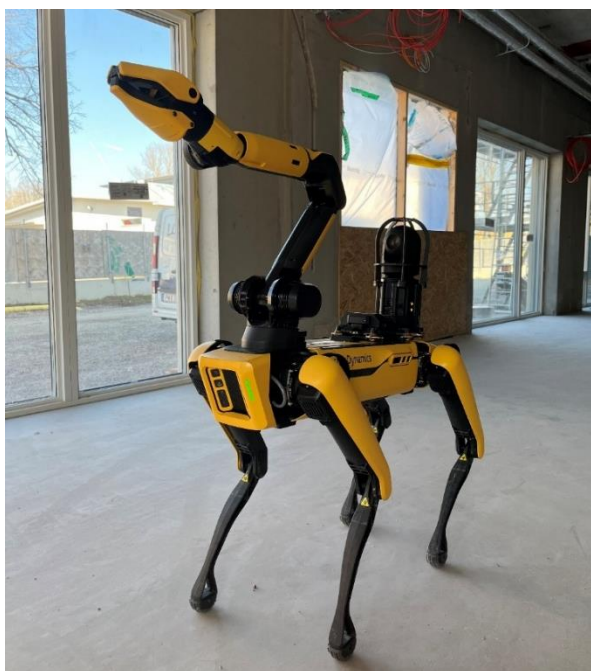
Det är även av intresse att studera användningen av Bettan genom ett helt projekt för att bättre förstå den totala energianvändningen samt potentialen till minskad mängd uppkommit spill.

Osäkerheter i genomförda antaganden anses inte vara avgörande för energianvändningens andel av resultatet. Detta eftersom energianvändningens andel är så pass liten och identifierade osäkerheter sannolikt inte kommer påverka resultatet i den utsträckning som krävs för att ändra på detta. Förutom ovan nämnda osäkerheter utgör även antagen tjocklek på murbruk, spillmängd av byggblock och murbruk, simulering av energianvändning och påslag för stensåg ytterligare osäkerheter.

2.2. Inspektion av byggarbetsplatsen - Robothunden Buster

Robothunden Buster är en mobil inspektionsrobot som mäter framdrift och identifierar byggfel samt används för digitalisering av byggarbetsplatsen. Buster är till för större byggarbetsplatser och genom sina ronder kan eventuella byggfel upptäckas tidigare vilket kan minska tid och resurser som krävs för att rätta till felet. Därmed finns en potential för Buster att spara in på den klimatpåverkan som annars skulle kunna uppstå genom att byggfel inte upptäcks i tid.

Buster består av roboten SPOT med inspektionsoption från Boston Dynamics med en batterikapacitet på 564 Wh/11.2 Ah. Roboten utför ronder där varje våningsplan ses över och eventuella fel identifieras. Batteritiden är cirka 90 min och tiden för ronden varierar med byggnadens storlek. Se Figur 3 för bild på robot.



Figur 3 Robothunden Buster (Spot från Boston Dynamics). Bildkälla: Helena Eriksson, Winsome Consulting.

Avgränsning och omfattning

Klimatberäkning begränsas till byggrobotens energianvändning. Klimatpåverkan från exempelvis lagring av data som Buster samlar in har inte inkluderats i beräkningen. Eftersom Buster är en prototyp som än så länge inte testats fullt ut i projekt har användningen i projekt behövt uppskattas.

Klimatpåverkan från Busters energianvändning ställs sedan i relation till klimatpåverkan från gips och stål och vilken mängd material det motsvarar. Beräkningen ger därmed exempel på hur mycket gips eller stål som behöver sparas in genom att identifiera byggfel tidigare för att kompensera för byggrobotens energianvändning under drift.

Insamling av indata

Robotens energianvändning räknas ut per timme utifrån snitt för fyra uppmätta ronder. Data för respektive uppmätt rond består av tidsåtgång samt batterinivå vid start och slut. Utifrån detta beräknas batteriets minskning i procent för att sedan beräkna energianvändningen per timme (kWh/h), se Tabell 8 för den beräknade genomsnittliga energianvändningen.

Tabell 8 Snitt energianvändning för fyra ronder med robothunden Buster.

Energianvändning och batterikapacitet robothunden Buster		
Batteriets kapacitet	0,564	kWh
Buster, elförbrukning	0,024	kWh/min
Buster, elförbrukning	1,45	kWh/h

I genomförd beräkning antas Buster användas en gång per dag under en arbetsvecka på fem dagar, 46 veckor om året. Buster antas användas 15 min per dag och rond för en yta på 1 000 kvadratmeter, värde taget från verklig mätning. Buster antas användas på samma sätt under hela projektiden och projektiden antas till 3 år, se Tabell 9.

Tabell 9 Energianvändning för en yta på 1 000 m² för ett års uppskattad användning av robothunden Buster samt för ett projekts användning under tre år.

Yta per rond [m ²]	Energianvändning per år [kWh/år]	Energianvändning per projekt (3 år) [kWh/projekt]
1 000	83	250

För jämförelse med klimatpåverkan för gips och stål valdes generiska värden från Boverkets klimatdatabas¹⁰, se Tabell 10.

Tabell 10 Använd generiska klimatdata och densitet för gips och stål från Boverkets klimatdatabas (Boverket, 2024d).

Material	Vikt	GWP A1-A3, [kg CO2e/kg]	Valda klimatdata från Boverket
13 mm gipsskiva	9 kg/m ²	0,23	Gipsskiva, standardskiva
Ståregel C45	0,490 kg/m	2,41	Lättreglar av stål, primär

¹⁰ Version 02.05.000 (Boverket, 2024d)

Resultat

Klimatpåverkan från elförbrukning per timme, år och projekt redovisas i Tabell 11. Resultatet sätts i relation till antal kvadratmeter gipsskivor samt antal meter stålregel i Tabell 12. Med projekt och år avses ett projekt på 1 000 kvadratmeter med ronder på 15 min per dag, varje vardag, 46 veckor om året.

I Tabell 11 går det att se att klimatpåverkan från energianvändning av Buster i ett treårsprojekt på 1 000 kvadratmeter BTA innebär 9 kg koldioxidekvivalenter under hela projektiden.

Tabell 11 Resultat från genomförd klimatberäkning av elanvändning under drift för robothunden Buster, svensk elmix, utifrån en energianvändning på 83 kWh/år för en rond på 15 min och 1 000 m² BTA dagligen.

Klimatpåverkan energianvändning Buster, svensk elmix

Klimatpåverkan per timme	0,05	kg CO ₂ e/h
Klimatpåverkan per år	3	kg CO ₂ e/år
Klimatpåverkan per projekt (3 år)	9	kg CO ₂ e/projekt

För att kompensera för den ökade elanvändningen som robothunden Buster medför behöver de fel som identifieras leda till en minskad användning av material jämfört med om Buster inte använts. I Tabell 12 går det att se att elförbrukningen för en timmes användning av Buster motsvarar 0,03 kvadratmeter gips (13 mm) eller 0,05 meter stålregel C45.

Tabell 12 Mängd material per materialtyp som klimatpåverkan från en timmes drift med robothunden Buster motsvarar, svensk elmix.

En timmes användning av Buster motsvarar

Antal kvadratmeter gipsskivor 13 mm	0,03	m ² /h
Antal meter stålregel C45	0,05	m/h

I Tabell 13 går det att se att ett års användning av Buster i ett projekt med 15 min användning per dag för en yta på 1 000 kvadratmeter skulle behöva spara in cirka 2 kvadratmeter gipsskivor eller 3 meter stålregel per år. För ett projekt på tre år innebär detta cirka 5 kvadratmeter gips eller 8 meter stålregel som behöver sparas in jämfört med om Buster inte hade använts.

Tabell 13 Mängd material per materialtyp som klimatpåverkan som behöver sparas in för att motsvara användning av robothunden Buster under ett respektive tre år. Detta utifrån en energianvändning på 83 kWh/år för en rond på 15 min och 1 000 m² BTA dagligen under 46 veckor, el beräknat med svensk elmix.

Jämförelse	Ett års användning av Buster motsvarar	Användning av Buster i treårsprojekt motsvarar	Enhet
Antal kvadratmeter gipsskivor 13 mm	2	5	m ²
Antal meter stålregel C45	3	8	m

Känslighetsanalys

Klimatpåverkan från Busters elförbrukning beräknat med nordisk elmix redovisas i Tabell 14, där klimatpåverkan är mer än dubbelt så hög jämfört med svensk elmix.

Tabell 14 Resultat från genomförd klimatberäkning av elanvändning under drift för robothunden Buster, nordisk elmix, utifrån en energianvändning på 83 kWh/år för en rond på 15 min och 1 000 m² BTA dagligen under 46 veckor.

Klimatpåverkan energianvändning Buster, nordisk elmix		
Klimatpåverkan per timme	0,13	kg CO ₂ e/h
Klimatpåverkan per år	38	kg CO ₂ e/år
Klimatpåverkan per projekt (3 år)	113	kg CO ₂ e/projekt

Utifrån känslighetsanalysen går det att se att en större reduktion av använt material behövs vid användning av nordisk elmix jämfört med om svensk elmix används. I Tabell 15 går det att se att mängden material behöver exempelvis minska med cirka 4 kvadratmeter gips per år alternativt cirka 6 meter stålregel per år. För ett projekt på tre år motsvarar detta cirka 6 kvadratmeter gips och cirka 19 meter stålregel.

Tabell 15 Mängd material per materialtyp som klimatpåverkan som behöver sparas in för att motsvara användning av robothunden Buster under ett respektive tre år. Detta utifrån en energianvändning på 83 kWh/år för en rond på 15 min och 1 000 m² BTA dagligen under 46 veckor, el beräknat med nordisk elmix.

Jämförelse	Ett års användning av Buster motsvarar	Användning av Buster i treårsprojekt motsvarar	enhet
Antal kvadratmeter gipsskivor 13 mm	4	11	m ²
Antal meter stålregel C45	6	19	m

Analys

Eftersom Buster utgör ett tillkommande arbete kommer använd energi på byggarbetsplatsen utgöra en ökad klimatpåverkan jämfört med energianvändningen på en traditionell byggarbetsplats. Huruvida Buster bidrar till en minskad klimatpåverkan sett till projektet som helhet kommer därför bero på hur många och hur omfattande byggfel som den kommer att upptäcka samt om de upptäcks tillräckligt tidigt för att möjliggöra en minskad materialanvändning.

Genomförd beräkning visar på att klimatpåverkan från Busters energianvändning i projekt är relativt liten och endast en mindre minskning i materialanvändning skulle behövas för att kompensera för den ökade elanvändningen.

Då beräkningen är begränsad till 15 minuters användning av Buster per dag skulle en mer omfattande användning av Buster medföra en högre energianvändning, och därmed måste en större mängd använt material minska än i genomförd beräkning. Det hade därför varit av intresse att studera användningen av Buster fullt ut i ett antal projekt för att bättre avgöra dess energianvändning och den materialanvändning som kan kopplas till identifierade byggfel. På sikt skulle denna data kunna jämföras med materialanvändning från uppkomna byggfel på en traditionell byggarbetsplats.

Osäkerheter

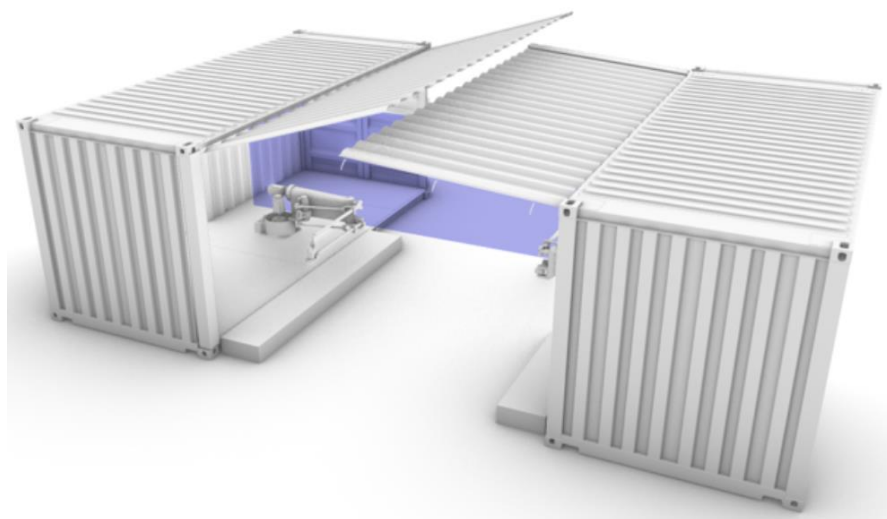
De främsta osäkerheterna i resultatet kommer från uppskattning av robotens användning under ett projekt. Detta eftersom roboten än så länge endast använts i pilotskala och uppskattningar för användning därmed behövt göras. Vidare kommer robotens användning sannolikt variera mellan olika typer av projekt där exempelvis projektets storlek utgör en viktig faktor för den totala klimatpåverkan.

Osäkerheter kopplade till byggrobotens energianvändning anses vara låga. Detta eftersom energianvändning per timme har beräknats utifrån uppmätt förbrukning och inte teoretiska antaganden.

Känslighetsanalysen visar att val av elmix påverkar resultatet. Både svensk och nordisk elmix har, utifrån ett globalt perspektiv, en låg klimatpåverkan. Används roboten i ett annat land med högre påverkan från energimixen i elnätet skulle klimatpåverkan från använd el kunna resultera i en större klimatpåverkan.

2.3. Mikrofabrik – HKM

Mikrofabriken är en robot som transporteras i container för temporär användning lokalt på en byggarbetsplats, se Figur 4. Mikrofabrikskonceptet avser att göra robotautomation tillgänglig på arbetsplats för att nyttja både prefabanläggningars effektivitet i produktion och platsbyggandets flexibilitet. Hypotesen är att skalbar produktionsautomation bidrar till upprätthållande av jämn kvalitet och produktionstakt samtidigt som antalet materialtransporter kan minska tack vare högre fyllnadsgrad jämfört med transport av prefabelement. I denna rapport analyseras lokal prefabricering av trähus där beräkning genomförs på en innervägg.



Figur 4 Föreställer uppställning av mikrofabriken (HKM) med containrar och använd robotutrustning. Bildkälla: Mathias Haage, Lunds universitet.

Mikrofabriken är en teknikutveckling av en variant av befintlig robot vid namn HKM. HKM är en SCARA-robot med lättviktigt armsystem (Cognibotics, LTH). Framgent planeras mikrofabriken utvecklas så att den blir längre och starkare än nuvarande HKM-modeller och kan ersätta traditionella industrirobotar i mikrofabrikskonceptet.

Avgränsning och omfattning

I detta projekt undersöks klimatpåverkan från använd energi vid tillverkning av väggelement för att få en uppfattning om dess storleksordning. Klimatpåverkan från energianvändning sätts sedan i relation till klimatpåverkan per producerat väggelement.

Då prefabricerade element tar upp stor volym vid transport jämfört med motsvarande mängd råmaterial finns en potential till att minska utsläppen vid användning av mikrofabriken genom minskad mängd transporter. Dessvärre har det inte funnits tillräckligt med data för att göra en analys av denna hypotes. I framtida analyser bör klimatpåverkan från tillverkning på byggarbetsplats sättas i relation till motsvarande klimatpåverkan för tillverkning av prefabelement i fabrik där även transport till byggarbetsplats skulle kunna inkluderas.

Insamling av indata

Eftersom mikrofabriken ännu inte är i drift finns inte några faktiskt uppmätta värden från energianvändning på byggarbetsplats. Genomförd beräkning görs därför utifrån uppskattad energiåtgång för genomförande av robotiserat byggande av vägg i mikrofabrik.

Energiskattning

Energiskattning har gjorts för byggnation av innervägg och inkluderar energianvändning från styrskåp, utvalda rörelser och körtid samt användning av verktyg och dess användningstid. Vidare behövs även en arbetsmaskin för att utföra vissa arbetsmoment. För att undersöka vad en fossildriven arbetsmaskin skulle få för påverkan på resultatet antas att en mindre diesel driven hjullastare med kapacitet <4 ton används.

Nedan listade arbetsmomenten antas ingå vid användning av robotapplikationen. I parentes anges antaganden för hur arbetsmomentet utförs (manuellt, med hjullastare eller av roboten).

1. Lasta arbetsbord med regelmaterial [**hjullastare**]
2. Lägga regler precist på arbetsbord och sammanfoga till en väggstruktur [**robot**]
3. Lasta arbetsbord med ytskiktmaterial [**hjullastare**]
4. Placera ytskiktmaterial precist och sammanfoga med väggstruktur [**robot**]
5. Bearbeta ytskikt, i.e. ta bort kantutstick, öppna för fönster och dörrar, el [**robot**]
6. Förbereda för vändning, vända väggstruktur för att exponera den öppna väggsidan [**hjullastare**]
7. Installera rördragning och isolering [**manuellt**]
8. Lasta arbetsbord med ytskiktmaterial [**hjullastare**]
9. Placera ytskiktmaterial precist och sammanfoga med väggstruktur [**robot**]
10. Bearbeta ytskikt, i.e. ta bort kantutstick, öppna för fönster, dörrar, installation av vägg, el [**robot**]
11. Förbereda för lyft av vägg, lyft och transport [**robot + hjullastare**]
12. Installera vägg [**hjullastare**]

För punkt 7 nämns rördragning, material för detta har inte inkluderats i genomförd beräkning av innervägg.

Total energianvändning för byggrobot uppskattas till 18 kWh per arbetsdag (8 timmar) för totalt fyra innerväggar. Snitt per innervägg blir då 4,5 kWh. Hjullastarens bränsleanvändning har uppskattats till 126 MJ för en timme utifrån data i rapporten *Miljödata för arbetsfordon* (Erlandsson, 2013). Indata för energianvändning redovisas i Tabell 16.

Tabell 16 Skattad energianvändning för tillverkning av ett väggelement med mikrofabrik.

Klimatpåverkan hjullastare	Energiåtgång		Energislag
Byggrobot HKM	4,5	kWh	El
Minihjullastare < 4 ton	126 ¹¹	MJ	Diesel

Klimatpåverkan från diesel avser fossil diesel för att inte underskatta dess klimatpåverkan, se Tabell 18 för använd klimatdata.

Tabell 17 Klimatdata för bränslen från Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d)

Produktnamn	Klimatpåverkan GWP-GHG [kg CO ₂ e/MJ]
Diesel, fossil	0,0951

Byggelement innervägg

Tillverkade innerväggar antas ha en maxstorlek på 3,4x3,6 meter där 3,4 meter utgör höjden på väggelementen. Innerväggen består av träreglar, isolering och gips. I Tabell 18 redovisas väggens olika beståndsdelar.

Tabell 18 Materialinnehåll inkl. spill i innervägg 3,4x3,6 m, densitet från Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d).

Material per byggelement	Mängd [m ³]	Densitet [kg /m ³]	Inbyggd mängd [kg]	Spill	Vikt spill [kg]
Träreglar 45x90 mm	0,1	455	68	10%	7,6
Gips 12,5 mm per sida	0,6	710	435	12%	59,3
Medelvärde isolering	1,1	37	41	4%	1,6

Använd klimatdata för ingående byggmaterial listas i Tabell 19.

Tabell 19 Klimatdata per material. Typiska data från Boverkets klimatdatabas Version 02.05.000 (Boverket, 2024d)

Material per byggelement	Klimatdata namn boverket	A1-A3 [kg CO ₂ e/kg]
Träreglar 45x90 mm	Sågat virke, u 16 %, barrträ	0,06
Gips 12,5 mm per sida	Gipsskiva, standardskiva	0,23
Medelvärde isolering	Medelvärde isolering	0,84

¹¹ Konservativt antagande från projektet att hjullastare används i snitt en timma per väggelement.

Indata känslighetsanalys

Känslighetsanalysen inkluderar precis som tidigare beräkning av nordisk elmix istället för svensk elmix. Eftersom även en hjullastare används som tillkommande arbete har en känslighetsanalys även genomförts med reduktionspliktig diesel och HVO100.

Tabell 20 redovisar använd klimatdata för reduktionspliktig diesel och HVO100.

Tabell 20 Klimatdata för bränslen från Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d)

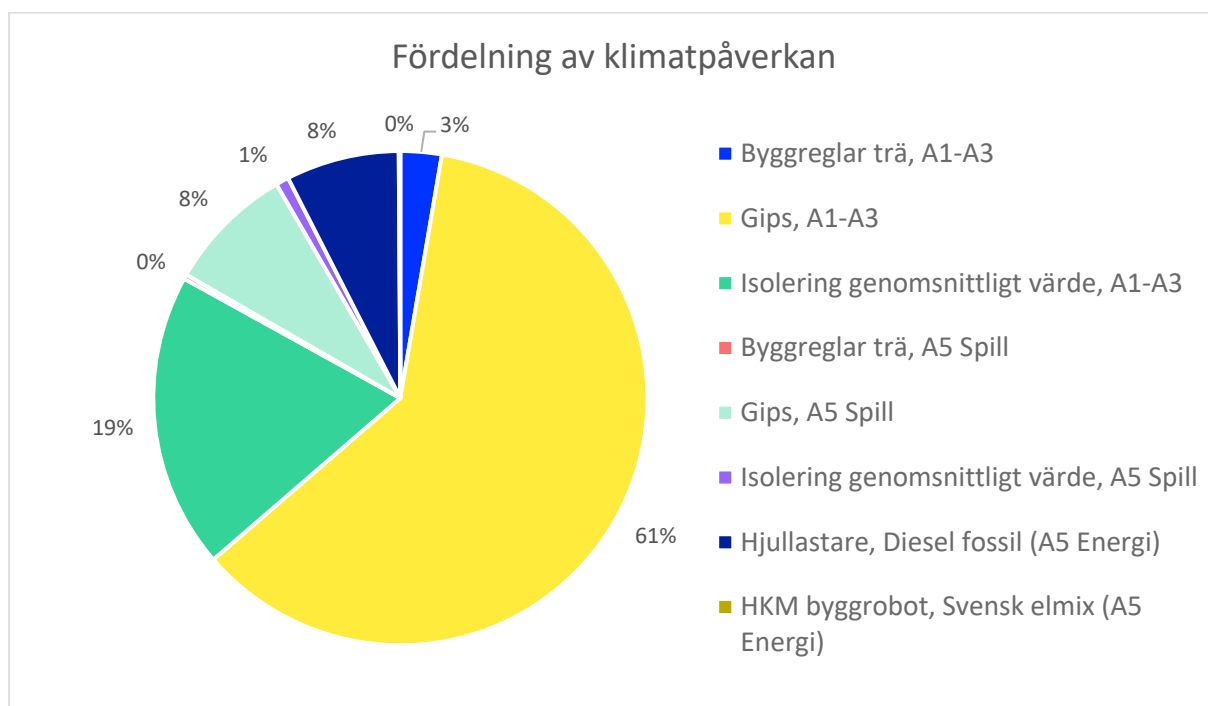
Produktnamn	Klimatpåverkan GWP-GHG [kg CO ₂ e/MJ]
Diesel, reduktionspliktig (2021)	0,073
HVO100	0,0153

Resultat

Resultatet visas i Tabell 21 där det går att se att gips samt isolering står för det största bidraget med cirka 90 % av totala klimatpåverkan. Vidare står hjullastaren för den tredje största posten på cirka 7 %. Energianvändning från mikrofabriken står endast för 0,1 % av klimatpåverkan. Det går även att se att materialets påverkan i LCA-modul A1-A3 står för 83 % och spill för 9 % av klimatpåverkan från väggelementet medan energianvändningen (A5 Energi) står för 8 % av klimatpåverkan. Fördelningen av klimatpåverkan visas även i Figur 5.

Tabell 21 Klimatpåverkan uppdelat på aktivitet/byggmaterial samt del av LCA-modul, svensk elmix och fossil diesel.

Klimatpåverkan per aktivitet/byggmaterial A1-A5 Svensk elmix och fossil diesel	GWP-GHG [kg CO ₂ e]	Andel av total
Träreglar, A1-A3	4	3%
Gips, A1-A3	99	61%
Isolering genomsnittligt värde, A1-A3	31	19%
Träreglar, A5 Spill	0,5	0,3%
Gips, A5 Spill	13	8%
Isolering genomsnittligt värde, A5 Spill	1	1%
Hjullastare, Diesel fossil, A5 Energi	12	7%
Mikrofabriken, Svensk elmix, A5 Energi	0,2	0,1%
Totalt klimatpåverkan A1-A3 + A5	162	100%
Varav A1-A3	135	83%
Varav A5 Spill	15	9%
Varav A5 Energi	12	8%



Figur 5 Fördelning av klimatpåverkan för mikrofabriken.

Känslighetsanalys

Resultatet för känslighetsanalysen redovisas i Tabell 22 till Tabell 24 där grönmarkerade rader redovisar de huvudsakliga ändringarna som respektive analys bidragit till.

Från Tabell 22 går det att se att användning av nordisk elmix inte påverkar resultatet nämnvärt för total klimatpåverkan från byggelementet. Andel av total klimatpåverkan från använd elmix går från 0,1 % med svensk elmix till 0,3 % med nordisk elmix.

Tabell 22 Klimatpåverkan uppdelat på aktivitet/byggmaterial samt del av LCA-modul, **nordisk elmix** och fossil diesel.

Klimatpåverkan per aktivitet/byggmaterial A1-A5 Nordisk elmix och fossil diesel	GWP-GHG [kg CO2e]	Andel av total
Träreglar, A1-A3	4	3%
Gips, A1-A3	99	61%
Isolering genomsnittligt värde, A1-A3	31	19%
Träreglar, A5 Spill	0,5	0,3%
Gips, A5 Spill	13	8%
Isolering genomsnittligt värde, A5 Spill	1	1%
Hjullastare, Diesel fossil (A5 Energi)	12	7%
Mikrofabriken, Nordisk elmix (A5 Energi)	0,4	0,3%
Totalt klimatpåverkan A1-A3 + A5	162	100%
Varav A1-A3	135	83%
Varav A5 Spill	15	9%
Varav A5 Energi	12	8%

Resultatet från genomförd känslighetsanalys för använt bränsle redovisas i Tabell 23. I tabellen går det att se att klimatpåverkan från hjullastaren minskar från 7 % för fossil diesel till 6 % av med reduktionspliktig diesel (2021). Vid användning av HVO100 minskar till klimatpåverkan istället från 7 % med fossil diesel ner till totalt 1 %.

Tabell 23 Klimatpåverkan uppdelat på aktivitet/byggmaterial samt del av LCA-modul, svensk elmix och reduktionspliktig diesel.

Klimatpåverkan per aktivitet/byggmaterial A1-A5 Svensk elmix och reduktionspliktig diesel	GWP-GHG [kg CO2e]	Andel av total
Träreglar, A1-A3	4	3%
Gips, A1-A3	99	61%
Isolering genomsnittligt värde, A1-A3	31	19%
Träreglar, A5 Spill	0,5	0,3%
Gips, A5 Spill	13	8%
Isolering genomsnittligt värde, A5 Spill	1	1%
Hjullastare, Diesel reduktionspliktig (2021) (A5 Energi)	9	6%
Mikrofabriken, Svensk elmix (A5 Energi)	0,2	0,1%
Totalt klimatpåverkan A1-A3 + A5	159	100%
Varav A1-A3	135	83%
Varav A5 Spill	15	9%
Varav A5 Energi	9	6%

Tabell 24 Klimatpåverkan uppdelat på aktivitet/byggmaterial samt del av LCA-modul, svensk elmix och HVO100.

Klimatpåverkan per aktivitet/byggmaterial A1-A5 Svensk elmix och HVO100	GWP-GHG [kg CO2e]	Andel av total
Byggreglar trä, A1-A3	4	3%
Gips, A1-A3	99	61%
Isolering genomsnittligt värde, A1-A3	31	19%
Byggreglar trä, A5 Spill	0,5	0,3%
Gips, A5 Spill	13	8%
Isolering genomsnittligt värde, A5 Spill	1	1%
Hjullastare, HVO100 (A5 Energi)	2	1%
Mikrofabriken, Svensk elmix (A5 Energi)	0.2	0,1%
Totalt klimatpåverkan A1-A3 + A5	152	100%
Varav A1-A3	135	83%
Varav A5 Spill	15	9%
Varav A5 Energi	2	1%

Analys

Om användningen av mikrofabriken innebär användning av hjullastare blir klimatpåverkan från A5 Energi mer påtaglig än om endast energianvändning från själva roboten beräknats. Klimatpåverkan från energianvändning från mikrofabriken ger en nästintill försumbar klimatpåverkan jämfört med materialåtgången. Här skulle det

därför endast behövas en mindre minskning i uppkommit spill för att kompensera för användningen av el.

För tillkommande arbete med hjullastare är däremot klimatpåverkan något mer synlig och ligger i liknande storleksordning som uppkommit spill. Detta utifrån användning av fossil diesel och även med reduktionspliktig diesel. Vid användning av HVO100 blir däremot hjullastarens klimatpåverkan betydligt lägre och skulle även här kunna kompenseras med minskad mängd uppkommit spill.

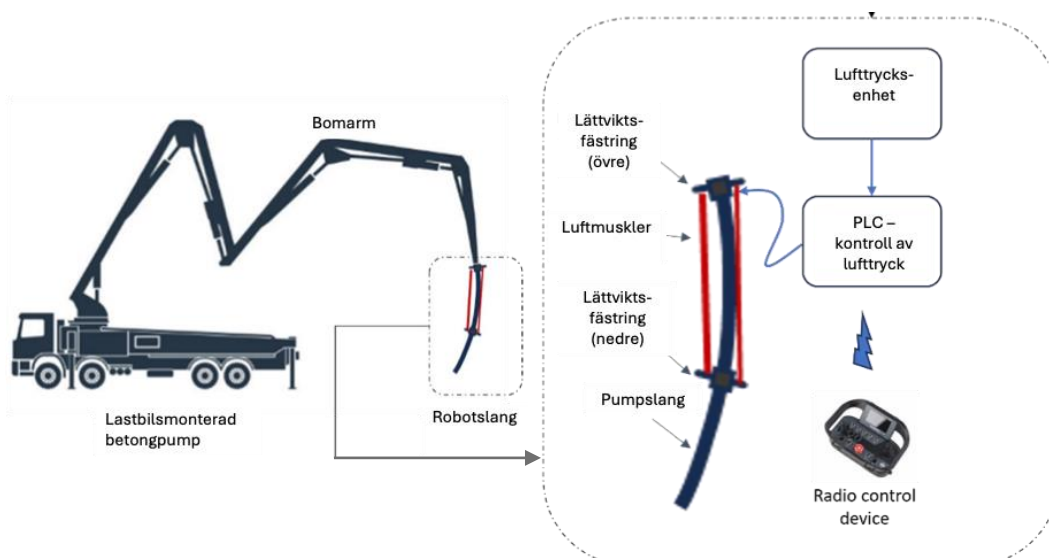
För jämförelse mot tillverkning av motsvarande väggelement i fabrik krävs ytterligare beräkningar. Detta har däremot inte varit möjligt i genomfört projekt.

Osäkerheter

Eftersom skattad energi använts vid beräkning istället för faktiskt uppmätta värden innebär detta en osäkerhet. Detta framför allt för användning av hjullastare där en förändrad användning skulle få störst påverkan på resultatet. För att inte underskatta hjullastarens påverkan har däremot konservativt satta värden använts. Det är därför troligt att klimatpåverkan från hjullastaren i beräkningen är högre än vad den skulle vara i verkligheten. Vidare utgör antagandet om användning av hjullastare en osäkerhet i sig eftersom det skulle kunna vara andra typer av lösningar som implementera i verkligheten.

2.4. Robot för riskeliminering vid pumpslang

Denna robot är en slangmonterad robot för styrning av betongpumpsslang, se Figur 6. Syftet med roboten är att öka säkerheten och förbättra arbetsmiljön i samband med betongpumpning genom att undvika att personal manuellt behöver styra pumpslangen.



Figur 6 Schematisk bild av robotsystemet för riskeliminering vid pumpslang. Bildkälla: Robert Larsson, Heidelberg Material Cements Sverige AB.

Avgränsning och omfattning

Klimatpåverkan från byggrobotens energianvändning relateras till motsvarande mängd betong. Beräkningen ger därmed exempel på hur mycket betong som behöver sparas in för att kompensera för byggrobotens energianvändning under drift.

Klimatpåverkan för robotens drift beräknas för 1 h, 8 h respektive 24 h för att få en uppfattning hur stor klimatpåverkan är. Det skiljer sig hur mycket en betongpumpslang används i ett projekt beroende på hur stort projektet är och hur mycket betonggjutning som sker. Genom att beräkna dessa tre tidsuppskattningar går det sedan att skala upp eller ner resultatet.

Insamling av indata

Robotens energianvändning har räknats ut per timme utifrån en mätning i labbmiljö, se Tabell 25 för ingående data.

Tabell 25 Indata för energianvändning för robot på pumpslang.

Energianvändning robot för pumpslang		
Tid för energimätning	72	min
Energiåtgång under mätning	0,05	kWh
Energiåtgång per timme	0,042	kWh/h

För jämförelse mot klimatpåverkan för betong valdes betongkvalité C40/50 och generiska värden från Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d), se Tabell 26.

Tabell 26 Klimatpåverkan för generiska data för betong C40/50.

Material	Densitet [kg/m³]	GWP A1-A3, [kg CO₂e/kg]	Källa
Fabriksbetong C40/50	2 350	0,23	Fabriksbetong, husbyggnad C40/50. Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d).

Resultat

Klimatpåverkan från elförbrukningen redovisas i en timme, 8 timmar respektive 24 timmars drift av roboten på pumpslangen. Detta relateras sedan till hur mycket denna klimatpåverkan motsvarar i mängd för betong C40/50, både i kg och liter betong. Se Tabell 27 för sammanställda resultat. Här går det att se att om betongpumpslangen är i drift under 24 timmar motsvarar det cirka 0,11 liter betong C40/50.

Tabell 27 Resultat från genomförd klimatberäkning av elanvändning under drift för robot på pumpslang samt motsvarande mängd betong C40/50. För klimatpåverkan från el används svensk elmix.

Drifttid	Klimatpåverkan av robot i drift [kg CO₂e]	Motsvarande mängd betong C40/50	
1 h	0,0015	0,01 kg	0,005 liter
8 h	0,012	0,09 kg	0,04 liter
24 h	0,037	0,26 kg	0,11 liter

Känslighetsanalys

Klimatpåverkan från elförbrukning vid användning av nordisk elmix är cirka 2,5 gånger så stor som för svensk elmix. Detta betyder i sin tur att varje timme motsvarar cirka 2,5 gånger så stor användning av det jämförande materialet. Se Tabell 28 för resultat med nordisk elmix. Här går det att se att om betongpumpslangen är i drift under 24 timmar motsvarar det cirka 0,3 liter betong C40/50.

Tabell 28 Resultat från genomförd klimatberäkning av elanvändning under drift för robot på pumpslang samt motsvarande mängd betong C40/50. För klimatpåverkan från el används nordisk elmix.

Drifftid	Klimatpåverkan av robot i drift [kg CO ₂ e]	Motsvarande mängd betong C40/50			
1 h	0,004	0,03	kg	0,01	liter
8 h	0,03	0,22	kg	0,09	liter
24 h	0,09	0,65	kg	0,28	liter

Analys

Eftersom pumpslangsroboten utgör ett ytterligare moment kommer användning av denna öka klimatpåverkan från använd energi på byggarbetsplatsen. Genomförd beräkning visar däremot att klimatpåverkan från pumpslangsrobotens energianvändning är liten och en begränsad minskning i materialanvändning skulle behövas för att kompensera för den ökade elanvändningen.

För att väga upp mot klimatpåverkan från pumpslangsrobotens energianvändning behöver antingen materialspill minskas eller att tiden för gjutning minskas, det vill säga att man kan påvisa en tidseffektivare betonggjutning så att den extra klimatpåverkan från roboten kan räknas hem genom kortare drifftid för betongbilen.

Osäkerheter

Precis som tidigare beräkningar är genomförd beräkning begränsad till svensk och nordisk elmix, vilka utifrån ett globalt perspektiv har en låg klimatpåverkan. Används roboten i ett land med en annan energimix i elnätet skulle klimatpåverkan från använd el få en större påverkan.

3. Klimatpåverkan från tillverkning och transport av byggrobot

Klimatpåverkan från användning av byggrobotar innebär förutom energianvändning på byggarbetsplatsen även klimatpåverkan från tillverkning och transport av robotarna. Detta brukar vanligtvis inte inkluderas i en LCA för en byggnad, exempelvis inte i lagen om klimatdeklarationer eller standarden för LCA för byggnader (EN 15978). I EN 15978 är det framför allt påverkan från tillverkning av maskiner och robotar som inte inkluderas medan transport av maskiner kan inkluderas om betydande.

Inkludering av tillverkning av maskiner är även komplext eftersom maskinen används i flera projekt i varierande omfattning under dess livslängd. Frågan om hur klimatpåverkan från den specifika maskinen bör fördelas mellan projekten är därför svår av att avgöra. Till detta hör även att tillgången på klimatdata från tillverkning av robotar och maskiner är begränsad.

Övergripande analyser har trots svårigheter genomförts i detta projekt för att få en uppfattning om storleksordningen på klimatpåverkan från tillverkning av byggrobot. Till detta genomförs även en beräkning av klimatpåverkan från transport av byggroboten till byggarbetsplatsen. Mer om specifika metodval och avgränsningar går att läsa under respektive kapitel 3.1–3.2.

3.1. Transport av byggrobot till och från byggarbetsplats

Klimatpåverkan från transport av byggrobot till och från byggarbetsplatsen antas bero på följande parametrar:

- Robotens vikt
- Transportsätt
- Transportsträcka
- Av- och pålastningstyp (t.ex. truck/hjullastare)
- Bränsletyp och bränslemängd

I denna rapport analyseras tre olika robotvikter; 500 kg, 1 000 kg och 2 000 kg som transporteras två olika distanser; 100 km och 500 km. Samtliga robotar antas behöva lastas av och på med en truck. Beräkning har genomförts med tre typer av drivmedel; diesel fossil, diesel reduktionspliktig (2021) och HVO 100 där Boverkets klimatdatabas har använts (Boverket, 2024d). Se Tabell 29 för vilken klimatdata som använts för respektive drivmedel.

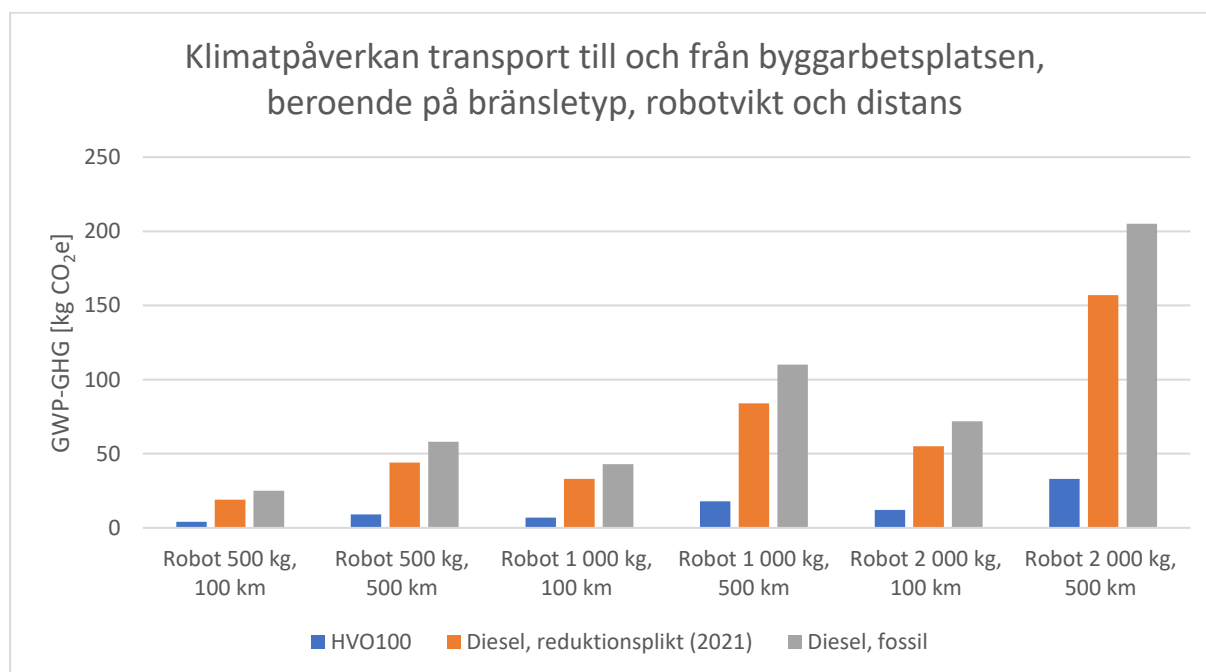
Tabell 29 Klimatdata för bränslen från Boverkets klimatdatabas version 02.05.000 (Boverket, 2024d)

Produktnamn	Klimatpåverkan GWP-GHG, [kg CO ₂ e/MJ]
Diesel, fossil	0,0951
Diesel, reduktionspliktig (2021)	0,073
HVO100	0,0153

Transport antas vara med lastbil och inkluderar transport till byggarbetsplats inklusive tom retur samt transport från byggarbetsplats inklusive tom framkörning. Transport 100 km antas vara lokal transport (1,5 MJ/ton*km) och transport 500 km antas vara långväga transport (1 MJ/ton*km) (Boverket, 2024d).

Resultat

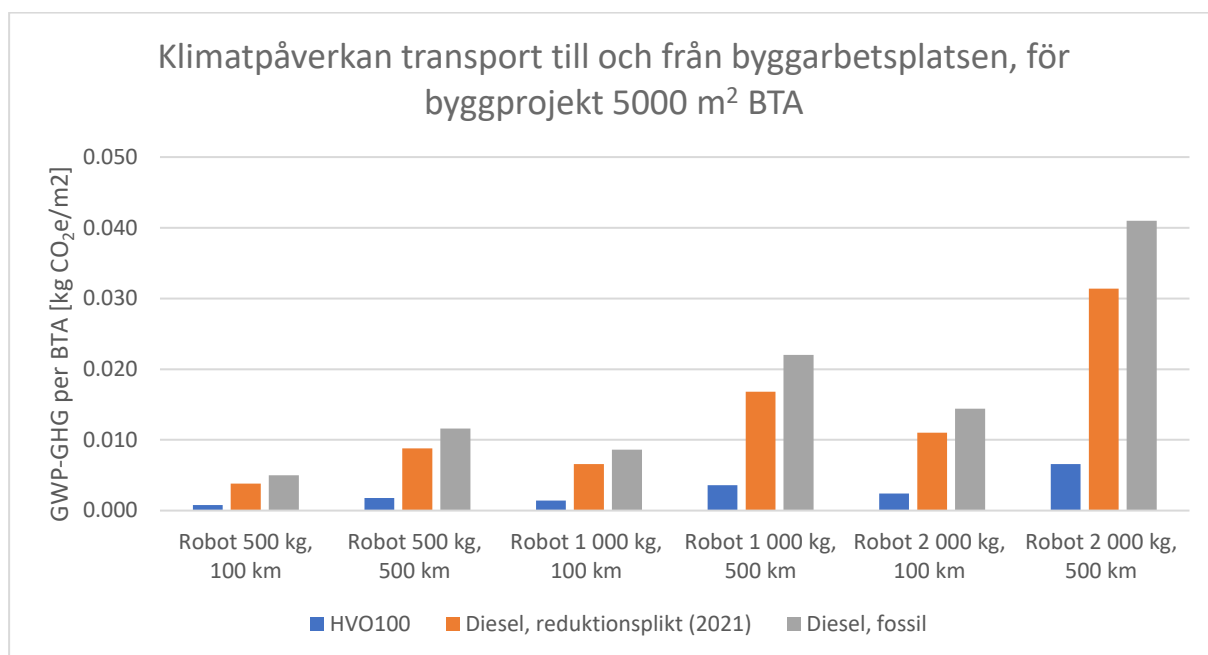
Resultatet från beräkningen visas i Figur 7 nedan. Här går det att se att klimatpåverkan varierar med robotens vikt, distans och bränsletyp. Högst blir klimatpåverkan för robot med vikten 2 000 kg och som transporteras 500 km med fossil diesel och därefter reduktionspliktig diesel. Roboten med vikten 1 000 kg och som transporteras 500 km utgör det tredje högsta värdet, detta vid användning av fossil diesel. Lägst blir klimatpåverkan för roboten på 500 kg som transporteras 100 km vid användning av HVO100. HVO100 ger den absolut lägsta klimatpåverkan jämfört med användning av övriga bränslen för samtliga transportdistanser och robotvikter.



Figur 7 Klimatpåverkan för transport av robot till och från byggarbetsplatsen för olika distanser, robotvikter och bränsletyper.

Jämförelse av resultat mot referensvärde

För att få en uppfattning om vad beräknade värden kan betyda för ett byggprojekt divideras resultatet med m² BTA för en godtycklig byggnad på 5 000 m² BTA. Resultatet redovisas i Figur 8 och visar att klimatpåverkan varierar mellan 0,001 och 0,041 kg CO₂e per m² BTA. Detta kan jämföras med värden för transport av byggmaterial till byggarbetsplatsen (LCA-modul A4) som enligt (Malmqvist, et al., 2023) varierar mellan cirka 10 och 50 kg CO₂e per m² BTA (se referensens tabell bilaga 1 sida 18, systemgräns 2027).



Figur 8 Klimatpåverkan per BTA för transport av robot till och från byggarbetsplatsen för olika distanser, robotvikter och bränsletyper. För en godtycklig byggnad på 5 000 m² BTA

Analys

För att minska klimatpåverkan från transport av byggrobot visar resultatet att den viktigaste faktorn är det bränsle som används, där HVO100 ger absolut lägst värden i genomförd beräkning jämfört med andra undersökta alternativ. Vidare visar genomförd beräkning att även transportavstånd och robotvikt påverkar utsläppen. Korta transportavstånd och låga robotvikter är därför att föredra utifrån ett klimatperspektiv.

Vid jämförelse av resultat mot klimatpåverkan från materialtransporter, som vanligen är de transporter som tas med vid beräkning av en byggnads klimatpåverkan, skulle transport av en byggrobot utgöra en begränsad andel. Detta utifrån de antaganden som gjorts i genomförd beräkning och jämfört med beräknade värden av (Malmqvist, et al., 2023).

Eftersom transport av byggrobot i genomförd beräkning inte är proportionell mot byggnadens storlek kommer transport av roboten utgöra en mindre andel för större byggprojekt jämfört med mindre projekt.

Osäkerheter

Genomförd beräkning förutsätter att endast en robot används och att den används i ett projekt i taget så att ingen ytterligare transport av roboten sker innan dess arbete på aktuell byggarbetsplats är färdigt. Skulle byggroboten användas i flera parallella projekt och därför behöva transporteras till och från samma projekt ett antal gånger under projektiden kan nya beräkningar behöva genomföras. På samma sätt skulle även användning av flera byggrobotar i samma projekt medföra högre klimatpåverkan från transport samt av- och pålastning av robot.

3.2. Tillverkning av byggrobot

Eftersom det funnits begränsad tillgång till öppen information för robotapplikationernas materialinnehåll samt viktandel har ett förenklat tillvägagångssätt applicerats för att beräkna klimatpåverkan från tillverkning av byggrobot. Beräkning av klimatpåverkan har genomförts för en godtycklig robot i metall som därefter skalas upp utifrån olika robotvikter.

Genomförd analys använder klimatdata för A1-A3 från EPD:er som bedömts representativa för materialanvändning och tillverkningsland. Undantag görs för klimatpåverkan från en dator i roboten eftersom ingen EPD på en dator har identifierats i projektet. Klimatdata från en dator har istället tagits från rapporten *Produktdatabaser: miljöfördelar med återbruk* (Wranne, 2020). Transport av material till plats där roboten sätts samman samt klimatpåverkan från denna sammansättning inkluderas inte i genomförd analys.

Metod

Uppskattning av klimatpåverkan från tillverkning av en godtycklig byggrobot i metall begränsas till att beräkna klimatpåverkan från dess ingående material och produkter. Vid användning av klimatdata har hänsyn tagits till tillverkningsland där detta varit möjligt. Klimatdata har därför framför allt tagits från EPD:er och rapporter istället för generiska databaser. Vidare uppskattades materialinnehållet för en godtycklig robot i metall från tillgängliga BOM-listor (bill of materials). Totalt identifierades fyra olika material och komponenter: järn, stål, el och dator. Använd klimatdata samt uppskattat materialinnehåll presenteras i Tabell 30. Tre olika vikter på roboten analyseras: 500 kg, 1 000 kg och 2 000 kg.

Tabell 30 Uppskattat materialinnehåll och andel samt klimatpåverkan för godtycklig robot i metall. Klimatpåverkan från EPD:er och projekt som bedömts representativa utifrån antaget tillverkningsland.

Material	Materialinnehåll [%]	Klimatpåverkan per material [kg CO ₂ e/kg material]	Klimatpåverkan per kg robot [kg CO ₂ e/kg robot]
Järn	55%	1,53	0,8
Stål	35%	2,95	1,0
El (kablar etc.)	5%	4,30	0,2
Dator (PC)	5%	57,32	2,9
Godtycklig byggrobot	100%	-	5,0

Eftersom den funktionella enheten för en byggrobot kommer variera med dess syfte genomförs beräkningen på tre sätt:

1. Total klimatpåverkan för hela byggroboten
2. Total klimatpåverkan fördelat på uppskattade livslängder: 10, 15 och 20 år
3. Total klimatpåverkan fördelat på en byggnadsyta på 5 000 m² BTA

Resultat

Klimatpåverkan per robotvikt samt för tre olika livslängder presenteras i Tabell 31, där klimatpåverkan från roboten på 2 000 kg ligger på nästan 10 ton CO₂e medan roboten på 500 kg ligger på knappa 2,5 ton CO₂e. Det går även att se att klimatpåverkan varierar beroende på dess livslängd med lägre värden för högre livslängder.

Tabell 31 Uppskattning av klimatpåverkan för godtycklig robot i metall för tre olika robotvikter och livslängder. Värden är avrundade till närmste tiotal.

Robotvikt [kg]	GWP-GHG [kg CO ₂ e]	10 år livslängd [kg CO ₂ e/år]	15 år livslängd [kg CO ₂ e/år]	20 år livslängd [kg CO ₂ e/år]
500	2 480	250	170	120
1 000	4 970	500	330	250
2 000	9 940	990	660	500

I Tabell 32 redovisas klimatpåverkan för respektive robotvikt fördelat på en byggnadsyta på 5 000 m² BTA. Här går det att se att klimatpåverkan varierar mellan 0,5–2,0 kg CO₂e per m² BTA.

Tabell 32 Uppskattning av klimatpåverkan per m² BTA för godtycklig robot i metall för tre olika robotvikter för ett byggprojekt på 5 000 m². Värden är avrundade till närmsta tiondel.

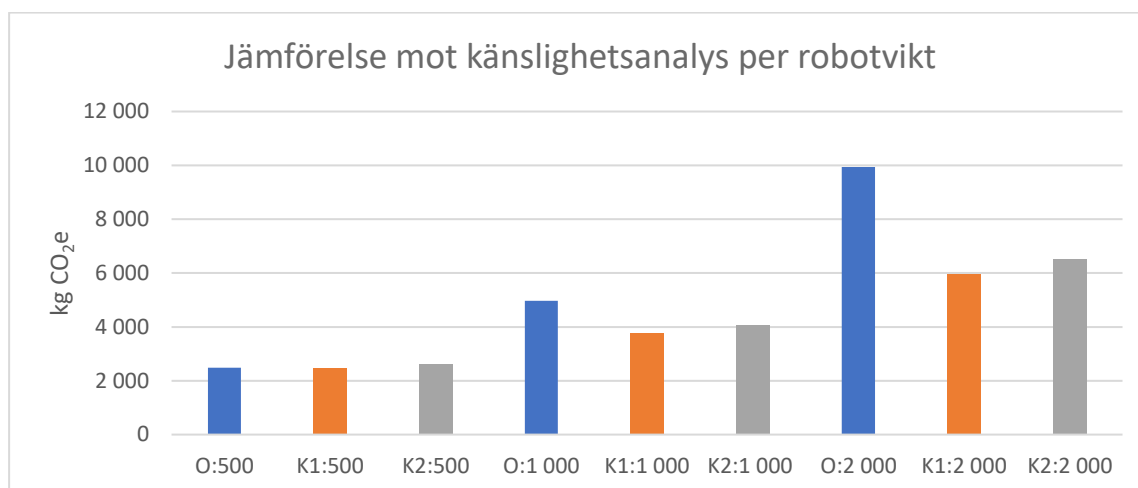
Robotvikt [kg]	GWP-GHG/BTA [kg CO ₂ e/m ² BTA]
500	0,5
1 000	1,0
2 000	2,0

Känslighetsanalys

Eftersom klimatpåverkan från den godtyckliga byggroboten i metall baseras på grova antaganden har två känslighetsanalyser genomförts där andelen av materialsammansättningen justerats. Känslighetsanalyserna inkluderar:

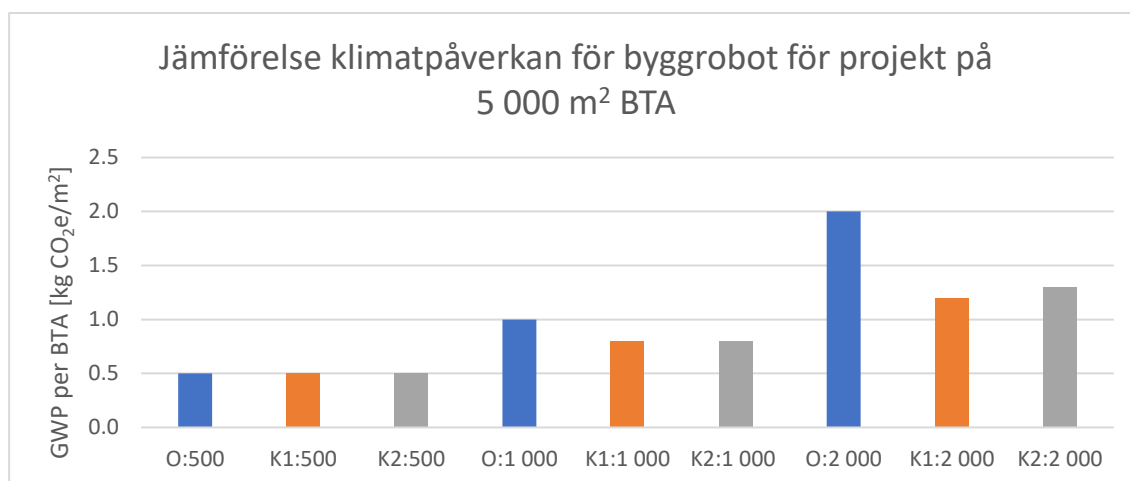
1. Känslighetsanalys 1 (K1): Andelen PC antas vara konstant och oberoende av robotvikt.
2. Känslighetsanalys 2 (K2): Samma antaganden som känslighetsanalys 1 samt att andelen stål ökar med 20 vikt-% och andelen järn minskar med 20 vikt-%.

Resultatet för känslighetsanalysen presenteras i Figur 9 och Figur 10 där de jämförs mot ordinarie beräkning (O). I Figur 9 går det att se att klimatpåverkan från båda känslighetsanalyserna (K1 och K2) ligger nära varandra för samtliga robotvikter. Det går även att se att skillnaden i klimatpåverkan är som störst för roboten med vikt på 2 000 kg där värdena från känslighetsanalyserna är cirka 35-40 % lägre än ordinarie beräkning. Klimatpåverkan från byggrobot med vikt på 500 kg varierar minst, detta eftersom andelen vikt-% för PC är samma för både K1, K2 och den ordinarie beräkningen samt att mängden stål inte verkar ha lika stor betydelse på resultatet. Anledningen till skillnaden mellan genomförda känslighetsanalyser och ordinarie beräkning beror därför sannolikt främst på antagande om konstant vikt för PC.



Figur 9 Klimatpåverkan per robotvikt för känslighetsanalys 1 och 2 (K1 och K2) jämfört med ordinarie beräkning (O).

Figur 10 följer samma mönster som Figur 9 eftersom samtliga robotar divideras med samma byggnadsyta. Här varierar klimatpåverkan mellan cirka 0,5 och 1,3 kg CO₂e per m² BTA för känslighetsanalyserna, vilket kan jämföras med ordinarie beräkning som varierar mellan 0,5 och 2,0 kg CO₂e per m² BTA.



Figur 10 Klimatpåverkan per robotvikt utslaget för projekt på 5 000 m² BTA. Känslighetsanalys 1 och 2 (K1 och K2) jämförs med ordinarie beräkning (O).

Analys

Eftersom klimatpåverkan från tillverkning av de maskiner som används på byggarbetsplatsen vanligtvis inte inkluderas i en byggnads klimatpåverkan har det inte varit självklart att genomföra denna analys. Anledningen till att den trots detta inkluderades är för att få en uppfattning om vilken storleksordning klimatpåverkan från tillverkningen av dessa robotar kan ge upphov till.

Genomförd beräkning med känslighetsanalys visar att datorn i roboten har en större påverkan på resultatet än fördelningen mellan järn och stål i roboten. Eftersom klimatdata och andel dator även utgör de mest osäkra värdena i beräkningen bör dessa främst läggas fokus på för att öka beräkningens kvalitet.

Från resultatet går det även se att klimatpåverkan varierar både med robotvikt och livslängd på roboten. Dessa två faktorer kan tänkas vara ganska givna men som trots allt belyser vikten av att vara resurseffektiv och arbeta för långa livslängder vid utveckling av produkter, inte minst byggrobotar.

Klimatpåverkan från tillverkning av en byggrobot sett till hela byggnaden utgör enligt genomförd beräkning en begränsad andel av dess klimatpåverkan. Detta om den totala klimatpåverkan slås ut på byggnadens yta. Eftersom genomförd beräkning endast använder en godtycklig byggnadsyta på 5 000 m² BTA kommer givetvis klimatpåverkan vara högre för mindre byggnader och lägre för större byggnader. Exempelvis skulle en byggrobot som används för småhus få en mer betydande påverkan per m² BTA utifrån använd beräkningsmetodik. I genomförd beräkning där klimatpåverkan divideras med byggnadens yta antas däremot att byggroboten endast används i ett projekt vilket är högst osannolikt. Resultatet ger därför sannolikt väl tilltagna värden i denna analys.

Osäkerheter

I genomförd beräkning förekommer flera osäkerheter som är beroende av flera faktorer som förutom materialsammansättning, livslängd och byggnadsyta även innefattar bland annat tillverkningsland, långväga transporter och byggrobotens funktion. Samtliga faktorer påverkar beräkningens resultat.

I beräkningen inkluderas inte heller energiprocesser i fabrik eller transporter av ingående material för att tillverka roboten, vilka är delar som troligen bör inkluderas om dess klimatpåverkan ska analyseras vidare.

I analysen har klimatpåverkan från tillverkning av byggrobotar slagits ut på både livslängd och byggnadsyta, ingen av dessa nyckeltal antas däremot vara representativa för att beskriva byggrobotens funktion. I framtagande av en specifik klimatberäkning från tillverkning av en byggrobot i framtiden behöver en funktionell enhet används. För en byggrobot som Bettan skulle exempelvis den funktionella enheten kunna vara klimatpåverkan per kvadratmeter murad vägg. Denna typ av nyckeltal har inte kunnat exemplifieras eftersom denna information inte funnits tillgänglig.

4. Diskussion

4.1. Expertkunskap behövs i dagsläget

Genomförda analyser av klimatpåverkan från robotar på byggarbetsplatsen har visat sig vara både utmanande och lärorikt. De delar som visat sig vara något enklare att få fram är insamling av grundläggande data kopplat till robotarnas applikation, vikt och prestanda. Det som varit speciellt utmanande är istället den expertkunskap som krävs för att fullt ut förstå robotapplikationerna och få ut dess energianvändning i drift samt själva robotens materialsammansättning. I projektet löstes detta genom en kombination av mätningar och kvalificerade uppskattningar baserade på simuleringsresultat och BOM-listor (bill of materials). I dagsläget är det därför svårt att genomföra en klimatberäkning för en robotapplikation för ett byggprojekt utan samarbete med experter på robotutrustning.

4.2. Resultaten i denna rapport ska ses som indikativa

I och med att robotapplikationerna är i ett prototypstadium bidrar detta i sig med utmaningar eftersom fiktiva scenarion behövt användas och att robotarna befinner sig i en utvecklingsfas och sannolikt kommer att förändras och utvecklas över tid. Resultaten i denna rapport bör därför användas som indikativa i den mån att de kan peka på potentiella utvecklingsområden kopplat till klimatfrågan som kan ge vägledning både för utveckling och användning av robotapplikationer på byggarbetsplatsen.

Utifrån den analys som gjorts med den avgränsning som råder för lagen om klimatdeklarationer går det att se att robotapplikationerna bidrar till en ytterst begränsad ökning i klimatpåverkan. Detta sett till den elanvändning som behövs för driften av robotarna. Anledningen till detta är både robotarnas relativt låga energianvändning samt att svensk och nordisk elmix har relativt sett låga utsläpp. Det bör däremot nämnas att där roboten är i behov av arbete från bränsleddrivna arbetsmaskiner kan klimatpåverkan bli mer betydande. Ett medskick till fortsatt utveckling av robotapplikationer är därmed att se över utifall användning av bränsleddrivna maskiner kan begränsas alternativt om biobränslen eller eldrivna maskiner kan användas istället.

Vid genomförande av projektet anser författarna att det även är motiverat att titta utanför avgränsningen i lagen om klimatdeklarationer. Detta eftersom viktiga aspekter relaterat till robotapplikationernas bidrag till klimatpåverkan riskeras annars att utelämnas. Här inkluderas exempelvis genomförda analyser av transport och tillverkning av robotapplikationerna. Även här kantas dessa beräkningar av osäkerheter där resultatet bör ses som indikativa. Det som däremot går att säga är att transporterna kommer få en större relativ påverkan för mindre projekt jämfört med större och att användning av biobränslen eller eldrivna fordon kan sänka dess bidrag. Detta är i sig inget nytt utan gäller för samtliga transporter kopplat till ett byggprojekt.

Genomförd analys för klimatpåverkan från tillverkning av byggrobotar tyder på att klimatpåverkan från tillverkningen är av mindre betydelse för själva byggprojektet. Detta eftersom genomförda beräkningar är ytterst konservativa och trots detta visar på en relativt liten klimatpåverkan för byggprojektet. För att minska klimatpåverkan från robotapplikationen bör istället fokus läggas på långa livslängder och att undvika överdimensionering. Även dessa faktorer utgör inte någon ny information vid utveckling av robotar eftersom de ofta är starkt ekonomiskt motiverade.

Trots att tillverkning av robotapplikationerna sannolikt inte får någon större påverkan på byggprojektets klimatpåverkan bör det nämnas att det finns en utvecklingspotential i datatillgången för materialsammansättningen i robotarna. Denna aspekt gäller inte endast robotar utan samtliga arbetsmaskiner på byggarbetsplatsen. Genom att data för materialsammansättning blir mer tillgänglig skulle även kunskapen kring klimatpåverkan från tillverkning av robotapplikationer och andra arbetsmaskiner öka. Ett alternativ är även att tillverkarna själva tar fram klimatberäkningar genom att producera EPD:er för respektive robotapplikation.

4.3. Utmaningar i jämförelse med traditionellt byggande

Vad som under projektets gång visat sig speciellt utmanande är jämförelsen mot traditionellt byggande. Jämförelsen är utmanande eftersom det är svårt att avgöra var man drar gränsen av det som bör inkluderas i analysen. Att bygga på traditionellt vis utan användning av robotar kan även se ut på flera sätt och skulle i sig innebära att flera olika analyser behövt genomföras. Under projektets gång har det även visat sig svårt att få tag på indata för dessa arbetssätt för att genomföra jämförelsen.

Ytterligare en svårighet som uppkommit har varit att avgöra vilka arbetsmoment som förekommer vid användning av robotapplikationerna som inte förekommer vid traditionellt byggande. Exempel från genomförda analyser är mikrofabriken där en lastare behövs för vissa arbetsmoment, något som skulle kunna antas även används i traditionellt byggande vid flytt och montering av väggar. Trots detta har arbetsmomentet beräknats eftersom momenten inte varit helt jämförbara. I en vidare studie hade det därför varit intressant att undersöka närmare hur alternativen kan se ut för en traditionell byggarbetsplats. Att minska behovet av lastare för att exempelvis vända på byggelementet skulle även kunna vara en framtida utveckling för robotapplikationen.

Andra aspekter som ligger utanför avgränsningen för lagen om klimatdeklarationer och som inte varit möjligt att undersöka inom ramen för detta projekt är antalet byggarbetare som behövs på byggarbetsplatsen vid traditionellt byggande jämfört med användning av robotapplikationer. Här är hypotesen att en del robotapplikationer skulle kunna minska antalet personer som behövs vilket i sig skulle kunna leda till minskade transporter av personal till och från byggarbetsplatsen. Ytterligare aspekter är hur stor klimatpåverkan från tillverkning av prefabelement i fabrik är jämfört med klimatpåverkan från tillverkning av samma prefabelement på byggarbetsplatsen.

4.4. Ytterligare förslag på vidare studier

Förutom de förslag som framkommer i diskussionen ovan har projektet identifierat ytterligare några områden som kan vara intressanta att studera vidare.

För att väga upp mot den klimatpåverkan som robotarnas elanvändning bidrar till skulle robotapplikationerna endast behöva bidra med en begränsad minskning i klimatpåverkan för projektet. För vidare studier kan det utifrån detta resultat vara speciellt intressant att se på den potential som specifika robotapplikationer har för att minska klimatpåverkan genom att minska mängden använt material. Här är robothunden Buster ett exempel på en robotapplikation med potential till att minska mängden använt material i ett byggprojekt. Detta genom att i ett tidigt skede identifiera byggfel. För att genomföra en sådan analys skulle däremot statistik behövas över hur ofta byggfel förekommer i traditionella byggprojekt och hur mycket material som generellt sätt genereras. Detta för att sedan jämföras mot motsvarande data vid användning av robothunden Buster.

I takt med att digitaliseringen i vårt samhälle ökar antas användningen av robotapplikationer på byggarbetsplatsen öka. Fortsatta studier inom området bör därför fokusera på användning av robotapplikationer i faktiska projekt och potentialen till att minska projektens klimatpåverkan som helhet. Studier kan först och främst fokusera på enskilda robotapplikationer men på sikt även analysera effekterna av en kombination av robotapplikationer på byggarbetsplatsen. För att få en jämförelse mot traditionellt byggande anser författarna att fokus bör läggas på insamlandet av data både från projekt där robotapplikationer används samt från mer traditionella byggarbetsplatser.

Ytterligare aspekter som hade varit intressanta att titta på kopplat till robotapplikationernas möjlighet att minska klimatpåverkan från byggprojekten är materialtransporter. Materialtransporter blir särskilt intressant för mikrofabriken där potentiellt färre transporter skulle behövas vid användning av mikrofabriken än vid traditionellt byggande med prefabelement eftersom materialet kan packas på ett mer effektivt sätt.

5. Slutsats

Med denna studie vill författarna bana väg för att bedöma klimatpåverkan från robotapplikationer i byggprojekt. Eftersom robotarna är i prototypstadie har det funnits utmaningar, då fiktiva scenarier har behövt användas och robotarna fortfarande är under utveckling och sannolikt kommer att förändras över tid. Analysen av resultaten ger indikationer på vilka aktiviteter som kan få större påverkan på klimatet och vilka som är av mindre betydelse. Samtidigt pekar de genomförda analyserna på potentiella utvecklingsområden kopplat till klimatfrågan som kan ge vägledning för både utveckling och användning av robotapplikationer på byggarbetsplatser.

Sammanfattningsvis har projektet följande slutsatser:

- Beräkning av klimatpåverkan från robotapplikationers energianvändning och tillverkning är komplext och behöver i dagsläget stöttning av expertkompetens. Framgent förväntas energianvändning enklare gå att mäta på byggarbetsplatsen.
- En relativt liten minskning av spill eller använt material räcker för att väga upp mot klimatpåverkan från robotarnas elanvändning.
- Jämförelse av klimatpåverkan från robotapplikationer mot traditionellt byggande är i sin linda där flera aspekter även utanför avgränsning i lagen om klimatdeklarationer behöver vävas in för att få en tydligare bild.
- Fortsatt utveckling av robotapplikationer utifrån ett klimatperspektiv bör fokusera på möjligheten till användning av mindre mängd byggmaterial, ersätta fossildrivna arbetsmaskiner och skapa förutsättning för färre materialtransporter.
- Aspekter som kan bli viktiga att tänka på vid användning av robotapplikationer är att hålla nere antalet transporter av robotar samt där möjligt använda biobränslen eller eldrivna fordon för transporter och arbetsmaskiner.

Förslag på vidare studier:

- Fokus på faktiska projekt: Efterhand som robotar används i faktiska projekt samla in och jämföra data från projekt med och utan robotar för att få en bättre bild i hur klimatpåverkan varierar mellan projekten.
- Minskad klimatpåverkan från använt material: Studera om användning av robotar som exempelvis robothunden Buster kan bidra till minskad materialåtgång i byggprojekt.
- Begränsa maskiner med fossila bränslen: För robotapplikationer med fossilt bränsledrivna arbetsmaskiner, utforska hur användning av dessa maskiner kan minskas alternativt om de kan bytas ut till biobränsledrivna eller eldrivna maskiner.
- Materialtransporter: Analysera hur exempelvis mikrofabriker kan bidra till att minska transporter av material genom effektivare packning av byggmaterial jämfört med transport av prefabricerade element.
- Datatillgång: Förbättra information om materialsammansättning i robotutrustning alternativt framtagande av EPD:er för robotutrustning.

Referenser

Blanco, J. L. o.a., 2018. *Seizing opportunity in today's construction technology ecosystem*, u.o.: McKinsey&Company.

Boverket, 2024a. *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/bygggande/hallbart-bygggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>

Boverket, 2024b. *Om Boverkets klimatdatabas*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/klimatdatabas/om-klimatdatabas/>
[Använd 10 02 2025].

Boverket, 2024c. *Klimatdata till beräkningen*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/gor-sa-har/underlag/klimatdata-till-berakningen/>
[Använd 28 januari 2025].

Boverket, 2024d. *Boverkets klimatdatabas (version 02.05.000)*. [Online]
Available at: <https://klimatdatabasen.boverket.se/>

Brosque, C. & Fischer, M., 2022. Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten construction robots. *Construction Robotics*, 6(2022), p. 163–186.

Davila Delgado, J. M. o.a., 2019. *Building Engineering*, Volym 26.

Erlandsson, M., 2013. *Generell byggproduktinformation (BPI) för bygg- och fastighetssektorn: Miljödata för arbetsfordon*, Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.

Finja, 2022a. *EPD: Blokk Exakt, Lightweight Concrete Block with EPS-insulation*. [Online]
Available at:
https://www.finja.se/storage/ma/6ca69ad85f314c5798d1cc0c91187064/62269114643c4bb680d9640a5b0750aa/pdf/2275A95986EA989258255A8DAB538ED61523DFD0/IsoBlock%20Exakt_EPd_sv.pdf

Finja, 2022b. *EPD: Murmörtel Exakt, Dry Mortar*. [Online]
Available at:
https://www.finja.se/storage/ma/aba91113538c40ccae2fb66030ad8394/17c78fa0d8574977bf50cbe1923a4f3f/pdf/72E11FECECAF15D599E4D25D607BA3AE48598DA6/Murbruk%20Exakt_EPd_sv.pdf

Finja, 2023. *Produktblad IsoBlock Exakt*. [Online]
Available at:
https://www.finja.se/storage/ma/f826deb36b9d433ca2b0d938012d38cd/a363b762f7b842bc8e4f549a904c3148/pdf/8F2FA92B393A797368F1982E84E45463E3B32B95/IsoBlock%20Exakt_116_PB_sv.pdf

Finja, 2024. *Produktblad: Murbruk Exakt*. [Online]
Available at:

https://www.finja.se/storage/ma/29459e2c108147879e66a64367386f55/2f74269608ff439c9e9342023129c9c7/pdf/D2BC317A9FE93C4FB2DFDF7C511BD0F7D6882D01/Murbruk%20Exakt_175_PB_sv.pdf

Fossilfritt Sverige, 2024. *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Bygg- och anläggningssektorn*, u.o.: u.n.

Greenhouse Gas Protocol, 2024. *IPCC Global Warming Potential Values*, u.o.: Greenhouse Gas Protocol.

Malmqvist, T., Borgström, S., Brismark, J. & Erlandsson, M., 2023. *Referensvärden för klimatpåverkan vid uppförande av byggnader. Version 2, 2023*, Stockholm: Boverket.

Sandgren, A. & Nilsson, J., 2021. *Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export*, Norrköping: Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.

Sveriges riksdag, 2021. *Lag (2021:787) om klimatdeklaration för byggnader*. [Online] Available at: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2021787-om-klimatdeklaration-for-byggnader_sfs-2021-787/

Wranne, J., 2020. *Produktdatabaser: miljöfördelar med återbruk*, u.o.: IVL svenska miljöinstitutet.