



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 26039

Examensarbete 30 hp

Juni 2026

Användning av mer och grövre ballast för att reducera klimatpåverkan i grova betongkonstruktioner

En studie ur ett livscykelperspektiv

Clara Lindström



Abstract

This thesis investigates how the use of more and coarser aggregate can reduce climate change in massive concrete structures, when examined from a life cycle perspective. Three construction methods were analyzed; 1) ready-mix concrete, with a maximum aggregate size, $D_{\max}$, of 16, 32 and 64 mm, 2) pre-placed aggregate concrete, using two different cement types, and 3) concrete with plum stones, combined with ready-mix concrete using maximum aggregate size $D_{\max}$ 32 mm. Both the pre-placed aggregate and the plum stone material were assumed to be locally sourced. A life cycle assessment (LCA) was conducted, using climate impact measured by Global Warming Potential (GWP) in kg CO₂e and a commuter ferry as a reference object. Qualitative interviews with industry representatives complemented the quantitative life cycle analysis. Using ready-mix concrete with $D_{\max}$ 16 mm as reference, results show that an increase in maximum aggregate size to $D_{\max}$ 32 mm reduced GWP with up to 8%, and a reduction of up to 16% when increased to $D_{\max}$ 64 mm. While pre-placed aggregate concrete using CEM I resulted in a higher GWP compared to the reference, a substitution to CEM II reduced GWP with 23.6%. Concrete with 20% of the concrete volume replaced with plum stones, resulted in the greatest reduction of GWP among the studied cases, up to 26.4% for the concrete element. Decreased concrete volumes and use of locally sourced aggregate resulted in a reduction both in production and in transport-related emissions. A sensitivity analysis confirmed that logistical operation is dependent on the concrete type and that increased transport distances impact ready-mix concrete the most. Practical feasibility of coarse aggregate in concrete was found to be constrained by reinforcement density, pumpability limitations and aggregate fractions available locally. A trend toward self-compacting concrete was further limiting the use of coarse aggregate. The use of alternative construction methods was thought to be context dependent, but suitable for massive constructions when combined with local aggregate sources.

The study concluded that the use of more and coarser aggregate in mass concrete structures show potential to reduce climate impact, but that additional research on necessary technology development is needed for the industry to realize the potential in actual construction, which is suggested for further research.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Gustav Norén Ämnesgranskare: Annica Nilsson

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

Klimatfrågan har fått ett allt större fokus, allt eftersom människans bidrag till klimatpåverkan uppdagats. Klimatpåverkan handlar om att mänskliga aktiviteter, främst kopplat till förbränning av fossila bränslen, leder till en global uppvärmning. År 2015 antog världens länder ett avtal om att denna globala temperaturökning ska hållas under 2°C, med ambition att den ska hållas under 1,5°C. Utöver detta globala mål har Sverige egna klimatmål. Ett av målen är att betong som produceras i Sverige ska vara klimatneutral år 2045. Det betyder att betongen inte ska leda till en negativ påverkan på klimatet, och metoder för att åstadkomma detta utforskas aktivt. Betong är vårt mest använda byggmaterial och används till bland annat hus, broar och kajer. Materialet är väldigt mångsidigt och starkt men ger upphov till stora utsläpp av koldioxid genom tillverkningen av komponenten cement, som fungerar som limmet i betongen. Utöver cement innehåller betongen också stenmaterial, kallat ballast, och vatten. Att byta ut delar av cementen med andra material, så som flygaska från kolpulvereldade kraftverk eller masugnsslagg från stålindustrin, är idag en vedertagen metod för att minska betongens klimatpåverkan. Att däremot använda mer och större stenar för att minska klimatpåverkan är desto mer outforskat, trots vetskap om att större stenstorlekar leder till att mindre cement behövs. Detta är ämnet som detta examensarbete undersöker; vilken skillnad i klimatpåverkan gör användning av grövre sten i betong och hur skulle byggande med mer sten i en grov betongkonstruktion kunna bidra med en lägre klimatpåverkan?

Studien utgår från en kajkonstruktion på Norra Stavsudda i Stockholms skärgård. Baserat på de krav som ställs på konstruktionen samt dess förutsättningar och geografiska placering, jämförs hur klimatpåverkan varierar med olika sätt att bygga med betong, där tre konstruktionsmetoder undersöks. Den första metoden som undersöks är vanlig fabriksbetong, vilket är betong som levereras färdigblandad till projektplatsen. För fabriksbetongen undersöks hur klimatpåverkan varierar när stenstorleken i betongen ökas från 16 mm till 32 mm respektive 64 mm. Den andra metoden kallas injekteringsbetong, där stenar som finns tillgängliga nära projektplatsen placeras ut i gjutformen för att sedan fyllas med ett lättflytande cementbruk. Både en etablerad produkt på marknaden, utan alternativa bindemedel, samt en experimentell variant där cementtypen byts ut till samma cementtyp som i den undersökta fabriksbetongen undersöks. Med denna metod kan 60% av den totala betongvolymen utgöras av sten och cementmängden som måste transporteras till projektplatsen minskar. Studiens tredje metod kallas sparsten vilket är en teknik som går ut på att stora stenar läggs i betongen under gjutningen för att minska mängden cement, motsvarande 10–20% av betongvolymen. Sparsten är idag en ovanlig metod i Sverige, om den ens förekommer, men var vanlig under tidigt 1900-tal. I studien undersöks om sparsten kan vara av relevans på nytt.

Genom att nyttja livscykelanalys som metod visade resultatet att grövre ballast i fabriksbetong kan innebära en reduktion av klimatpåverkan på upp till 8% då maximal stenstorlek ökas från 16 mm till 32 mm, och upp till 16% med maximal stenstorlek 64 mm. För injekteringsbetongen visade resultatet att cementtypen i bruket är avgörande för slutlig klimatpåverkan. Om cementen ej ersätts av andra material ses en ökning i jämförelse med

fabriksbetongen. När cementtypen i injekteringsbetongen byts ut till samma cementtyp som i fabriksbetongen, ses en minskning av klimatpåverkan med nästan 24%. Studiens känslighetsanalys visade att logistikupplägget för fabriksbetong leder till störst klimatbelastning vid långa transportavstånd. Fabriksbetong som kombineras med sparsten visade sig ha störst potential att reducera klimatpåverkan, men en minskning av klimatpåverkan med 26% då betongen delvis ersätts av stenar som finns vid projektplatsen. Genom kompletterande intervjuer med representanter från bland annat Skanska, Heidelberg och Weber framkom att användning av mer och större ballast omges av vissa hinder. Att armeringen i dagens betongkonstruktioner ofta är tätt placerade och att slangar med allt mindre innerdiameter används vid gjutning begränsar den maximala stenstorleken i betongen. Vidare ses en trend med en övergång till alltmer lättflytande betong som ej måste vibreras, kallat självkompakterande betong, med hänsyn till arbetsmiljön för betongarbetarna. Denna trend driver branschen till användning av mer cement och fin ballast, vilket driver på klimatpåverkan. Vidare beskrevs branschen som konservativ gentemot tekniskt obeprövade metoder, vilket gör att användning av alternativa konstruktionsmetoder kan möta motstånd.

Medan studiens resultat påvisar att det finns potential att reducera klimatpåverkan genom användning av mer och grövre ballast, varierar potentialen beroende på projektspecifika krav och förutsättningar. Den potential som ses måste också omvandlas till genomförbara konstruktionsmetoder. Utvecklade standarder och vägledning behövs för att alternativa konstruktionsmetoder ska övervägas av kunder, konstruktörer och betongleverantörer, för användning i grova betongkonstruktioner. Medan betongbranschen redan identifierat att breda samarbeten och gemensamma mål är nödvändiga för framtidens betong, kan mer och större sten utgöra en allt viktigare pusselbit framåt.

Förord

Med detta examensarbete rör jag min akademiska karriär iland. Mina år som student på civilingenjörsprogrammet System i Teknik och Samhälle vid Uppsala universitet har gett mig kunskap, vänner och minnen för livet. Kunskap är inte tung att bära, när man väl har lärt sig.

Tack till ELU Konsult AB och min handledare Gustav Norén för möjligheten att skriva om det här intressanta ämnet, för förmedling av kontakter och möjligheten att bolla tankar och idéer längs vägen. Ett stort tack till min ämnesgranskare Annica Nilsson på Institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik vid Uppsala universitet, som bidragit med goda råd och perspektiv under arbetets gång. Tack till alla som på ett eller annat sätt bistått med material, gett mig värdefulla insikter och vägledning på området, och inte minst trots på att minskad resursåtgång är en viktig pusselbit för framtidens byggande med betong.

Slutligen, tack till familj, vänner och pojkvän för ovärderligt stöd och uppmuntran det här halvåret.

Nu ser jag fram emot att se vart livet som socioteknisk civilingenjör tar mig!

Clara Lindström
Stockholm, juni 2026

Förklaring av begrepp och förkortningar

Ballast – Samlingsbegrepp för stenmaterial som nyttjas i betong.

Betong – Ett hållfast byggmaterial bestående av cement, vatten och ballast.

Cement – Hydrauliskt bindemedel som används i betong.

CO_{2e} – Förkortning av koldioxidekvivalent. Emitterade växthusgaser omräknas till koldioxidekvivalenter, som är ett mått på potentiell klimatpåverkan.

D_{max} – Den maximala stenstorlek som ballasten består av, angiven i mm.

EPD – Förkortning av Environmental Product Declaration. Beskriver en produkts miljöpåverkan för hela dess livscykel.

Flytsättmått – Standardiserat mått för hur en självkompakterande betongs utbredning beskriver dess konsistens.

Grov betongkonstruktion – En betongkonstruktion som består av stor höjd och bredd.

GWP – Förkortning av Global Warming Potential, vilket är ett mått på hur mycket en gas bidrar till klimatpåverkan, med koldioxid som referensenhet. Uttrycks i kg CO_{2e}.

Injekteringsbetong – Betong som består av att ballast placeras i en gjutform som sedan fylls med en lättflytande cementpasta. Även kallat prepakt eller injekteringsgjutning. På engelska kallat Pre-Placed Aggregate (PAC) eller Rock-Filled Concrete (RFC).

Fabriksbetong – Färdigblandad betong bestående i huvudsak av bindemedel, ballast och vatten, som tillverkas industriellt och levereras till projektplatsen.

LCA – Förkortning av livscykelanalys, som är en analysmetod som sammanställer en produkts totala miljöpåverkan under dess hela livscykel från vagga till grav.

OPC – Förkortning av Ordinary Portland Cement. Den vanligaste beståndsdelarna i huvudtyperna för cement.

Relationshandling – Slutgiltig dokumentation som beskriver utförande.

Sparsten – Konstruktionsmetod, använd primärt under åren 1800–1950, som består av att större stenar placeras i betongkonstruktioner i cementbesparande syfte.

Sättmått – Standardiserat mått för hur en betongs sättning beskriver dess konsistens.

vct – Förkortning av vattencementtal, som beskriver förhållandet mellan vatten och cement i en cementblandning.

wtw – Förkortning av well-to-wheel. Är ett mått som beskriver den totala energianvändningen kopplat till en transport.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Syfte och frågeställningar	2
1.2 Avgränsningar	2
2. Bakgrund	3
2.1 Standarder, livscykelanalys och miljövarudeklarationer	3
2.2 Cement	4
2.2.1 Tillverkningsprocess	4
2.2.2 Cementstandarder	5
2.2.3 Klimatpåverkan	6
2.3 Betong	7
2.3.1 Egenskaper	7
2.3.2 Vattencementtal	8
2.3.3 Exponeringsklasser och klassificering	8
2.3.4 Ballast	10
2.3.5 Tillsatsmedel	11
2.3.6 Klimatpåverkan	12
2.4 Konstruktionsmetoder	13
2.4.1 Fabriksbetong	13
2.4.2 Injekteringsbetong	14
2.4.3 Betong med sparsten	16
2.5 Referensobjekt	17
3. Metod	18
3.1 Litteraturstudie	18
3.2 Livscykelanalys (LCA)	18
3.2.1 Definition av mål och omfattning	19
3.2.2 Inventeringsanalys	20
3.2.3 Miljöpåverkansbedömning	21
3.2.4 Tolkning	22
3.2.5 Antaganden	22
3.3 Scenarion och fall	22
3.3.1 Scenario 1 – Fabriksbetong	22
3.3.2 Scenario 2 – Injekteringsbetong	26
3.3.3 Scenario 3 – Betong med sparsten	27
3.4 Programvara	27

3.4.1	One Click LCA	27
3.4.2	NTMCalc	27
3.5	Känslighetsanalys	28
3.6	Intervjuer	28
3.6.1	Urval	28
3.6.2	Genomförande	29
4.	Data	30
4.1	Materialmängder	30
4.2	Transporter	31
4.3	Arbetsmoment	32
4.4	Scenarion och fall	33
5.	Resultat	34
5.1	Livscykelanalys	34
5.1.1	Scenario 1 – Fabriksbetong	34
5.1.2	Scenario 2 – Injekteringsbetong	35
5.1.3	Scenario 3 – Betong med sparsten	37
5.1.4	Sammanställning och jämförelse	38
5.1.5	Känslighetsanalys	41
5.2	Intervjuer	44
5.2.1	Geografi och projektplats	44
5.2.2	Ballast	44
5.2.3	Alternativa bindemedel	46
5.2.4	Krav och standarder	46
5.2.5	Arbetsmiljö	47
5.2.6	Alternativa konstruktionsmetoder	48
5.2.7	Ekonomi	48
5.2.8	Teknikutveckling och framtid	49
6.	Diskussion	50
6.1	Reduktion av klimatpåverkan	50
6.2	Förutsättningar för grövre ballast och alternativa konstruktionsmetoder	53
6.3	Framtida studier	55
7.	Slutsats	56
	Referenser	57
	Appendix A: Mängdberäkning	62
	Appendix B: Intervjufrågor	64

1. Inledning

År 2015 enades världens länder om Parisavtalet, som säger att den globala temperaturökningen ska hållas under 2°C. Sverige har därutöver ett mål om netto nollutsläpp år 2045, vilket också omfattar bygg- och anläggningssektorn (Fossilfritt Sverige, 2018). För år 2045 har den svenska betongbranschen ett mål om att all betong ska vara klimatneutral (Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich, 2025). Medan mycket talar för att en hållbar utveckling är möjlig för betongbranschen, måste stora samhällsaktörer gemensamt genomföra klimatomställningen för att uppnå både globala och nationella mål (Fossilfritt Sverige, 2023a).

Betong är vårt mest använda byggmaterial (Fossilfritt Sverige, 2023a) och utgör en stor del av dagens infrastruktur. 8% av människans orsakade CO₂-utsläpp härleds till betongen (Strand et al., 2020). Särskild uppmärksamhet riktas mot cementet i betongen, då det typiskt utgör en stor andel av ett projekts klimatpåverkan. Störst möjlighet att reducera denna klimatpåverkan görs i tidiga beslut, då klimatpåverkan i projektets byggskede främst kommer från cementtillverkningen (Fossilfritt Sverige, 2018). Ett livscykelperspektiv, där projektets samtliga flöden och material tas i åtanke, förordas för att minimera uttaget av naturresurser och för att främja cirkularitet för framtidens byggande i Sverige (Fossilfritt Sverige, 2023a). I en rapport från FN:s UNEP (Scrivener, John och Gartner, 2018) diskuteras möjliga vägar för betongindustrin att nå 2°C-målet. Där anges ökad användning av tillsatsmaterial och att använda cementet mer effektivt som åtgärder med störst potential. Idag återfinns cementtyper där cement delvis ersätts med alternativa bindemedel för att sänka betongens CO₂-utsläpp (Strand et al., 2020). Cementminimering ses också som en produktionsteknisk fördel, där ett lägre cementinnehåll innebär en lägre temperaturutveckling vid betongens härdning och minimerad risk för sprickbildning (Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich, 2025).

Sätt att minimera cementåtgången genom mer ballast ses i både gamla och nutida konstruktionsmetoder. Historiskt har så kallad sparsten använts, där sten lagts i betongen i cementbesparande syfte, som ett sätt att minimera kostnader då cement varit dyrt. Vid en utblick utanför Sveriges gränser ses att ballastanvändningen maximeras och klimatpåverkan minimeras genom metoden Rock-Filled Concrete, RFC, som används i enorma dammkonstruktioner i Kina. Stora stenar gjuts då samman med cement innehållandes alternativa bindemedel (Jin et al., 2024). En liknande metod är injekteringsbetong, där ballast på projektplatsen binds samman med injekteringsbruk. Metoden har förekommit sparsamt i Sverige (Lindvall, 2012), men utvecklas allt mer idag (Åhl och Gustavsson, 2025). En trend med ökad cementshalt i betong har observerats, som medfört att ballasthalten minskat och att stenstorleken halverats i betongen (Paulsson-Tralla och Ekman, 2008). Samtidigt är betong med lägre CO₂-utsläpp högst aktuell, men fokus läggs primärt på att ersätta cementet med alternativa bindemedel. Detta aktualiserar vilken ytterligare reduktion av klimatpåverkan som är möjlig att uppnå genom att också använda grövre och mer ballast i svensk betong.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur ballaststorlek och konstruktionsmetod påverkar en betongkonstruktions cementinnehåll, och i förlängningen vilka implikationer detta får för betongkonstruktionens klimatpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv. En livscykelanalys av ett referensobjekt i form av en trafikantbrygga kommer att ligga till grund för studiens metod och de konstruktionsmetoder som jämförs är fabriksbetong, injekteringsbetong samt betong med sparsten. Studien syftar slutligen till att studera vilka förutsättningar som finns för att nyttja grövre ballast i fabriksbetong och vilka applikationsområden som kan anses relevanta för användning av sparsten och injekteringsbetong idag.

För att besvara studiens syfte kommer följande frågeställningar fungera som utgångspunkt:

- Hur kan en betongkonstruktions klimatpåverkan under dess livscykel härledas till, och påverkas av, storlek och mängd på ballast?
- Vad kan sägas om användning av sparsten och injekteringsbetong i jämförelse med fabriksbetong, i syfte att minimera den klimatpåverkan en grov betongkonstruktion ger upphov till utifrån ett livscykelperspektiv?
- Vilka förutsättningar finns för att använda grövre och mer ballast?

1.2 Avgränsningar

- Examensarbetet är utfört hos den marina avdelningen på ELU Konsult AB, varav studiens undersökta referensobjekt är placerat i marin miljö och ett visst fokus på konstruktioner i denna miljö primärt berörs.
- Livscykelanalysen avgränsas till att undersöka klimatpåverkan i form av miljöpåverkanskategorin GWP, vilket motsvarar utsläpp av kg CO₂e.
- I byggprocessen inkluderas ej aktiviteter kopplade till arbetskraft.

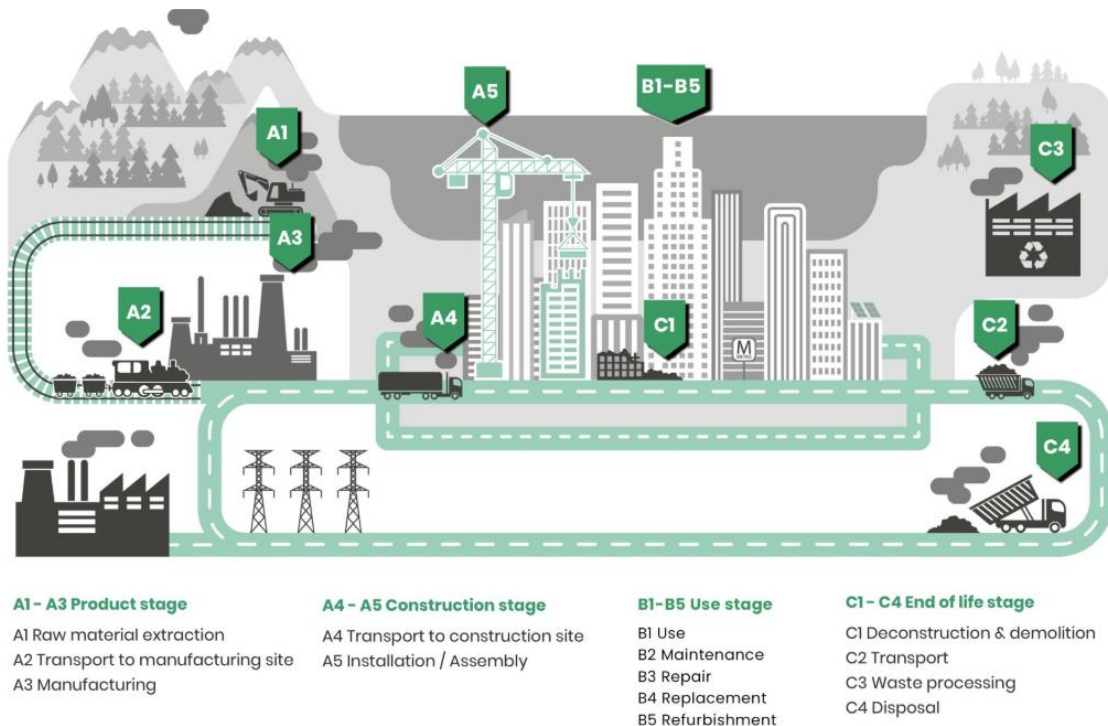
2. Bakgrund

Detta avsnitt ämnar kontextualisera uppsatsens syfte. Inledningsvis introduceras ämnena standarder, livscykelanalys och miljövarudeklarationer. Därefter görs en redogörelse av tillverkningsprocesserna för cement och betong, samt de utmaningar, möjligheter och krav som präglar utvecklingen av användningen av dessa material i framtiden. Vidare beskrivs konstruktionsmetoderna för fabriksbetong, injekteringsbetong samt sparsten. Avslutningsvis beskrivs studiens referensobjekt.

2.1 Standarder, livscykelanalys och miljövarudeklarationer

ISO, International Organization for Standardization, är en internationell organisation som i dagsläget samlar 160 nationella standardiseringsorgan (Svenska institutet för standarder, u.å.a). Det nationella standardiseringsorganet SIS, Svenska institutet för standarder, projektleder arbetet och verkar för spridning och tillämpning av standarder i Sverige (Svenska institutet för standarder, u.å.b). Standarder framtagna av ISO syftar till att enhetligt och transparent skapa rutiner att utgå från inom exempelvis tillverkning och handel. Vidare fungerar standarder som vägledning för organisationer för att kunna följa direktiv och lagstiftning från EU (Svenska institutet för standarder, u.å.c). Inom ramen för ISO återfinns framarbetade standarder inom områden såsom konstruktionsmetoder och byggprodukter (Svenska institutet för standarder, u.å.d).

Livscykelanalys (LCA) har enligt Svenska institutet för standarder (2006a) utvecklats för att förstå och hantera produkters miljöpåverkan, där en livscykel beskriver hur en produkts råvaruförsörjning tillgodoses, till slutlig deponi eller återvinningsanvändning. Figur 1 beskriver de livscykelskeden som typiskt ingår i en livscykelanalys.



Figur 1. Livscykelskeden (One Click LCA, 2025a).

LCA ger möjlighet till jämförelse mellan de processer, flöden och material som ingår i en produkts, eller sammansatt produkts, livscykel, och kan vara användbart för att identifiera förbättringspotential av miljömässig prestanda i livscykeln olika skeden. Bedömning av miljömässig betydelse görs utifrån miljöpåverkanskategorier som representerar olika miljöproblem (Svenska institutet för standarder, 2006a), vilka ses i Figur 2.



Figur 2. Miljöpåverkanskategorier (Boverket, 2018).

Enskilda byggprodukters miljöpåverkan beskrivs i miljövarudeklarationer, kallat EPD från engelskans Environmental Product Declaration. En EPD möjliggör jämförelse mellan produkter av samma funktion och utformas i enlighet med ISO 14040-serien, där produktens miljöaspekter och miljöpåverkan utifrån livscykelanalys sammanställs. Produktens hela livscykel skall tas i beaktande, varav aspekter som undantas skall motiveras (Svenska institutet för standarder, 2010). En EPD är typiskt giltig i upp till 5 år och skall följa standarden SS-EN 15804:2012+A2:2019. Medan en EPD kan beskriva en unik tillverkningsenhet, kan den också beskriva ett medelvärde från en särskild fabrik, leverantör eller för en viss produkttyp (Boverket, 2024a). Produktspecifika data är som mest rättvisande och genomsnittliga data från en tillverkare är typiskt mer noggranna än generiska dataset (One Click LCA, 2025b).

2.2 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel som hårdnar vid vattenkontakt och användning förekommer primärt inom industri, infrastruktur och husbyggnation (Sveriges geologiska undersökning, 2023). Cement benämns som en nyckelkomponent för betong (Fossilfritt Sverige, u.å.a), som är det vanligaste byggmaterialet i världen (Fossilfritt Sverige, u.å.b).

2.2.1 Tillverkningsprocess

Cement är primärt en regional produkt, där tillverkning, försäljning och användning sker inom samma närområde (Fossilfritt Sverige, 2023b). Ungefär 90 procent av all cement som används i Sverige är producerat inom landet, medan resterande del täcks av import från närliggande länder i Europa (Naturskyddsföreningen, 2022).

Kalksten är idag den huvudsakliga råvaran som används i cement, och kalkstensbaserad cement förmodas vara en vital del som bindemedel för betong även framåt. I Sverige är kalksten av rätt kvalitet lättillgänglig, och denna råvara anses vara en kritisk resurs (Fossilfritt Sverige, 2023b). Kalkstens kemiska sammansättning är avgörande för slutprodukten kvalitet och därmed varierar applikationsområdena för olika täkters kalksten. År 2020 användes enbart kalksten från täkterna Västra brottet och Filehajdar i Slite, samt Våmb i Skövde, för cementtillverkning i Sverige (Sveriges geologiska undersökning, 2023).

För att tillverka cement bryts och krossas kalksten (Heidelberg Materials, u.å.a), för att sedan malas till pulver samt lera. Dessa blandas för att sedan brännas till cementkolor, kallat klinker. Denna tillverkning sker i roterande ugnar som värms till 1450 °C, vilket kräver stora mängder energi (Sveriges geologiska undersökning, 2023); ett ton svensktillverkad cement kräver tillförd värme respektive elenergi om 1111 kWh respektive cirka 130 kWh (Fagerlund, 2012). Klinkern kyls därefter ned och mals tillsammans med gips till slutprodukten cement. Transport sker sedan till betongtillverkare (Heidelberg Materials, u.å.a).

2.2.2 Cementstandarder

Cement delas upp i huvudtyper, kallat CEM I-V, enligt standarden SS-EN 197-1:2011 som reglerar sammansättningen av beståndsdelarna för cementtyperna. Huvudtyperna kallas ordinära cement och är standardiserade utifrån huvudbeståndsdel Portlandcementklinker (Svenska institutet för standarder, 2013), varför de kallas Ordinary Portland Cement, förkortat OPC (Strand et al., 2020). I Portlandcementklinker utgör kalksten huvudråvaran (Svenska institutet för standarder, 2013), där mängden Portlandcementklinker i respektive cementtyp svarar för dess OPC-halt (Strand et al., 2020). Cement delas in i hållfasthetsklasserna 32.5, 42.5 och 52.5 MPa (Bäckman, 2022). På den svenska marknaden används typiskt cementtyperna CEM I-III (Klimatguiden, u.å.), beskrivna nedan.

- CEM I går under benämningen ordinär portlandcement (OPC) och består av 95–100% Portlandklinker (Svenska institutet för standarder, 2013).
- CEM II är en sammansatt Portlandcement och måste innehålla minst 65% Portlandklinker. Resterande delmaterial kan bestå av exempelvis masugnsslagg eller flygaska (Svenska institutet för standarder, 2013), där masugnsslagg är en restprodukt från järntillverkning, medan flygaska är en restprodukt från kraft- och värmeverk som kolpulvereldas (Fossilfritt Sverige, 2023b). En vanlig CEM II-produkt i Sverige är Anläggning FA, som består till 80% av klinker och därefter 15% flygaska och 5% kalksten (Strand et al., 2020).
- CEM III kallas slaggcement och skall innehålla upp till 64% Portlandklinker. Resterande del består av masugnsslagg (Svenska institutet för standarder, 2013).

Genom användning av alternativa bindemedel än Portlandcementklinker har produkter som Grön betong halverat koldioxidutsläppen, samtidigt som krav avseende hållfasthet, gjutbarhet, beständighet och livslängd uppfyllts (Svenskt Näringsliv, u.å.). Tillgången på restprodukterna flygaska och masugnsslagg förväntas dock minska, genom successiv utfasning av kolanvändning och teknikutveckling inom stålindustrin (Fossilfritt Sverige, 2023b).

2.2.3 Klimatpåverkan

Ett ton producerad cement kan innebära ett utsläpp om 700–800 kg CO₂ (Naturskyddsföreningen, 2022). Den globala cementtillverkningen om 4,5 miljarder ton årligen svarar för 8 procent av de globala utsläppen. År 2020 tillverkades 2,8 miljoner ton cement i Sverige (Naturskyddsföreningen, 2022), och idag står cementtillverkningen för 4 procent av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser (Fossilfritt Sverige, u.å.a). Ett CO₂-utsläpp om 1,9 miljoner ton kunde härledas till Sveriges två cementproducenter år 2020 (Naturskyddsföreningen, 2022), vars cementprodukter bedöms vara 15 procent bättre utifrån klimatsynpunkt i jämförelse med det globala genomsnittet (Svenskt Näringsliv, u.å.). Enligt en rapport från Boverket (2021), sägs att stora skillnader återfinns mellan olika länders cementproduktion, men också att cementproducenter inom ett land kan generera mycket olika utsläpp genom skillnader i sina produktionsprocesser.

De CO₂-utsläpp som uppstår i cementproduktionen består i huvudsak av två delar; uppvärmning av råmaterial samt processutsläpp, som beror på kalkstenens reaktion vid förbränning (Svenskt Näringsliv, u.å.). När råmaterialet kalksten värms till höga temperaturer, vilket krävs för omvandling till cementklinker, frigörs stora mängder CO₂ (Fossilfritt Sverige, u.å.a). De utsläpp som sker till följd av denna förädling av kalkstenen beskrivs somoundvikliga (Svenskt Näringsliv, u.å.), vilket anses vara en central utmaning för cementtillverkningen (Fossilfritt Sverige, u.å.a). Förbränningsprocessen av kalksten svarar för 2/3 av det totala utsläppet, medan resterande 1/3 beror på det bränsle som använts (Fossilfritt Sverige, 2023b). Cementindustrin har fasat ut en stor del av kolkraften som tidigare använts för uppvärmningen av kalkstenen (Svenskt Näringsliv, u.å.). Kolen har framförallt ersatts av förädlad avfallsbaserat bränsle, i form av energiåtervunnet avfall (Boverket, 2021). Uppvärmningen står dock fortfarande för en ansenlig del av de utsläpp som uppstår i samband med cementtillverkningen (Svenskt Näringsliv, u.å.).

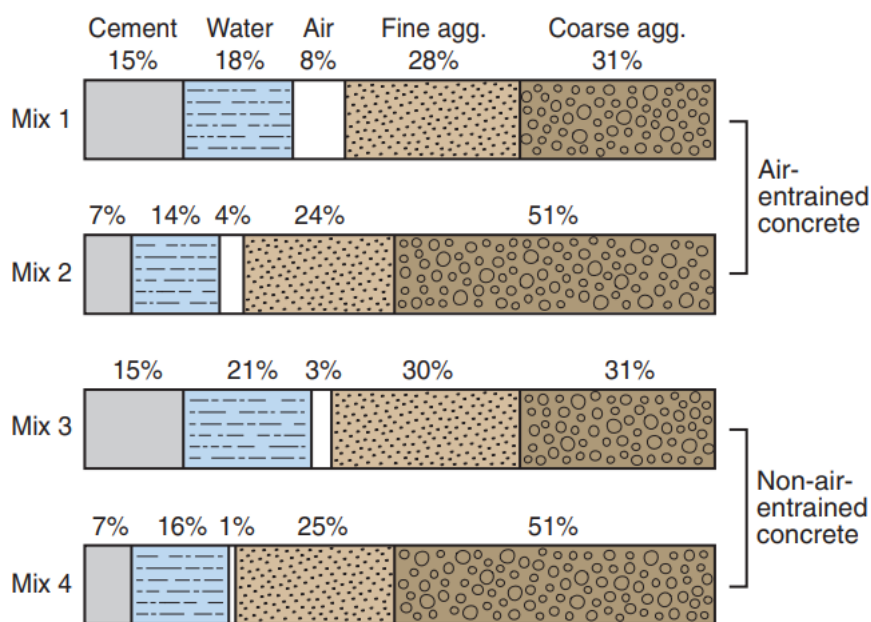
För att åtgärda förbränningsprocessens utsläpp beskrivs koldioxidinfångning som avgörande. Både CCS (Carbon Capture and Storage), där förbränningsutsläpp från fossila källor fångas in, samt BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage), som fångar in koldioxidutsläpp från förbränning av biomassa, är tekniker för koldioxidinfångning (Fossilfritt Sverige, 2023b). Grundprincipen med koldioxidinfångning är avskiljning och infångning av koldioxidutsläpp (Fossilfritt Sverige, u.å.b), där koldioxiden sedan transporteras för geologisk lagring under havsbotten. På sikt återbildas koldioxiden till mineral och bergarter (Fossilfritt Sverige, 2023b).

En CCS-anläggning har länge planerats att driftsättas vid cementtillverkningen i Slite år 2030. Denna anläggning skulle sänka Sveriges koldioxidutsläpp med 4 procent genom infångning av anläggningens årliga koldioxidutsläpp, som uppgår till 1,8 miljoner ton (Fossilfritt Sverige, 2023b). Anläggningen har benämnts som avgörande för att nå klimatmålen (Fossilfritt Sverige, 2023a), samtidigt som dess driftsättning beskrivits som starkt beroende av att det finns tillräcklig trygghet och incitament för att Sveriges cementproducent, Heidelberg Materials, ska kunna genomföra förändringen på industriell skala (Fossilfritt Sverige, 2023b). Till följd av att staten avlog ansökan om medfinansiering av införandet, har satsningen nu pausats (Heidelberg Materials, 2025).

För att minska klimatbelastningen från övriga delar av cementtillverkningen nämns utfasning av fossila bränslen och en övergång till fossilfria transporter, samt ökning av bioenergi i produktionen (Fossilfritt Sverige, 2023b). Medan energieffektivisering, förändring av bränslemixen och ökad elektrifiering beskrivs som viktiga åtgärder (Boverket, 2021), ses de som komplement till koldioxidinfångning eftersom de processrelaterade utsläppen står för majoriteten av cementproduktionens totala utsläpp (Fossilfritt Sverige, 2023b).

2.3 Betong

Materialet betong används inom många olika områden, däribland för säker vattenhantering och som material till exempelvis kajer (Sveriges geologiska undersökning, 2023). Betong består i huvudsak av ballast, i form av krossat material från berg, sten eller grus, som binds samman med cement och vatten (Fossilfritt Sverige, 2023b). Cementtyp, ballast och den totala sammansättningen påverkar betongens slutgiltiga egenskaper (Sveriges geologiska undersökning, 2023). En betong proportioneras typiskt enligt Figur 3, där proportionerna varierar beroende på om betongen är lufttillsatt för att motstå frysning eller inte (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002).



Figur 3. Proportionering av material i lufttillsatt respektive icke-lufttillsatt betong (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002).

Skillnaden mellan fine aggregate, på svenska fin ballast, och coarse aggregate, på svenska grov ballast, beskrivs närmare i avsnitt 2.3.4 *Ballast*.

2.3.1 Egenskaper

Betongen hårdnar genom cementens kemiska reaktion med vatten (Sveriges geologiska undersökning, 2023). Vid färskt tillstånd är betong mer eller mindre flytande, medan det blir hårt då cementet härdar. Med denna egenskap kan betong användas för att tillverka mycket skiftande former (KTH, 2021), vilket gör materialet mycket mångsidigt (Heidelberg Materials, u.å.a). Betong uppvisar hög hållfasthet vid belastning från tryck, men ej vid

dragbelastning. För att uppnå hög styrka vid drag måste förmågan att uppta dragkrafter åtgärdas, vilket görs genom ingjutning av stål, kallat armering (KTH, 2021).

Betong är vädertåligt (Svenskt Näringsliv, u.å.), brinner ej, samt tål fukt. Det sammansatta materialet har därmed goda förutsättningar för att stå emot väder och vind. Till följd av betongens styrka, stabilitet och hållfasthet, är dess underhållsbehov lågt (Heidelberg Materials, u.å.a). Dessa egenskaper leder till en beräknad livslängd om minst 100 år (Svenskt Näringsliv, u.å.). Vidare är betong i stor grad återvinningsbart (Heidelberg Materials, u.å.b).

En utmaning att beakta vid betonggjutning är den värmeutveckling som sker under den kemiska reaktionen mellan cement och vatten (Vemaventuri, u.å.). Bindemedelsreaktionen är en exoterm process, där värme avges och betongens temperatur ökar (Strand et al., 2020). Detta medför främjade termiska spänningar, som kan leda till sprickbildning, både under hydrering och härdning. Detta är särskilt beaktansvärt för massiva komponenter, som typiskt är en betongkonstruktion eller ett betongelement med en minsta dimension om 0.80 m, som till följd av dess tjocklek får en långsam värmeavledning (Vemaventuri, u.å.). Medan det är möjligt att med olika metoder övervaka och åtgärda oönskad värmeutveckling (Vemaventuri, u.å.), är låg värmeutveckling vid gjutning av grova konstruktioner eftersträvansvärt. Detta kan uppnås genom att cementshalten minimeras, vilket kan åstadkommas genom justering av kornstorleksfördelningen samt genom tillsatsmedel. Viss ersättning av Portlandcement, det vill säga en justering av OPC-halten, kan göras med tillsatsmaterial som har egenskaper som ger lägre värmeutveckling (Strand et al., 2020).

2.3.2 Vattencementtal

Betongens egenskaper härleds i stora drag till förhållandet mellan mängden vatten och cement i blandningen (Sveriges geologiska undersökning, 2023). Detta förhållande kallas vattencementtalet, förkortat vct, som enligt Lujabetong (u.å.) definieras enligt

$$vct = \frac{w}{c} \quad (1)$$

där w och c anger vattenmängd respektive cementmängd. Enheten baseras på ingående mängder. Ett högre vattencementtal kan innebära en svag betong med låg tryckhållfasthet, medan ett lägre vattencementtal typiskt leder till en starkare, mer kompakt betong. Samtidigt måste betongens arbetbarhet säkerställas, då ett mycket lågt vct kan göra den svårarbetad. Beroende på vilka förutsättningar som finns i den miljö där en betong kommer att användas, anpassas värdet på betongens vct för att uppnå önskade egenskaper (Lujabetong, u.å.). Ett lågt vct är typiskt lämpligt för tuffa utomhusmiljöer, medan ett högt vct används i mindre utsatta inomhusmiljöer (Thomas Betong, 2024).

2.3.3 Exponeringsklasser och klassificering

Klassificering av betong görs genom olika klasser av dess egenskaper (Svensk betong, u.å.), däribland exponeringsklasser, tryckhållfasthetsklasser och konsistensklasser.

Exponeringsklasser används för att klassificera omgivningens påverkan på betongkonstruktionens beständighet. Genom 18 olika exponeringsklasser grupperas olika angreppsmekanismer, så som miljöer där konstruktionen påverkas av exempelvis frysning eller havsvatten (Svensk betong, u.å.). För konstruktioner i eller vid havsvatten används exponeringsklasser enligt Tabell 1 (Thomas Betong, 2024).

Tabell 1. Utdrag ur Exponeringsklasser för olika konstruktionsdelar - Exponeringsklasser för konstruktioner i eller vid havsvatten (Thomas Betong, 2024).

Konstruktionsdel	Betongytans exponering, läge m.m	Exponeringsklasser
Under vatten	Lägre än 1 m under lägsta lågvattenyta	XS2
I skvalp- och stänkzon	Från 1 m under lägsta lågvattenyta till 5 m över högsta högvattenyta	XS3+XF4
Ovan skvalp- och stänkzon	Ej utsatt för tösalt	XS1+XF2
Mindre än 50 m från kust	Utsatt för tösalt (till exempel kajdäck)	XD3+XF4

Exponeringsklass XS beskriver korrosion orsakad av klorider från havsvatten, XD korrosion orsakad av andra klorider och XF beskriver angrepp från frysning och upptining (Lindvall, Löfgren och Esping, 2015). Exponeringsklassen styr vilken högsta tillåtna vct och lägsta tryckhållfasthetsklass som föreligger, vilket ses i Tabell 2 (Thomas Betong, 2024).

Tabell 2. Utdrag ur Välj rätt tryckhållfasthetsklass (Thomas Betong, 2024).

Styrande exponeringsklass	Högsta tillåtna vct _{ekv}	Produkttyp	Lägsta tryckhållfasthetsklass
Fuktiga eller våta miljöer med klorider och ingen risk för frysning			
XD2	0,45	Betong med krav på vct	C35/45
XD3	0,40	Betong med krav på vct	C40/50
Fuktiga eller våta miljöer med klorider med frysning			
XD1 + XF2	0,45	Betong med lägsta garanterad lufthalt	C32/40
XD3/XS3 + X4	0,40	Frysprovad betong (enl. SS 137244)	C35/45

Tryckhållfasthetsklassen är en definition som beskriver det tryck som betongen kan motstå och används för att bedöma betongens lämplighet för en viss belastning. Klassificeringen beror således på de påfrestningar som betongen utsätts för (Lujabetong, u.å.). Betongens tryckhållfasthet klassificeras både utifrån dess karakteristiska cylinderhållfasthet och kubhållfasthet, i enheten MPa ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$). En betong som benämns C30/37 har 30 MPa cylinderhållfasthet och 37 MPa kubhållfasthet (Svensk betong, u.å.).

Konsistensen väljs utefter vilken produktionsmetod och gjutbarhet som konstruktionens utformning kräver (Svensk betong, u.å.), samt med hänsyn till hur tät armeringen är, kallat armeringsdensitet (Lujabetong, u.å.). En desto trögare konsistens kräver att betongen vibreras mer. Självkompakterande betong, kallat SKB, är en konsistens som ej kräver vibrering och beskrivs som att den effektiviserar arbetet och förbättrar arbetsmiljön. Konsistensklasserna för betong görs utifrån dess sättmått, kallas S, respektive flytsättmått, kallat SF, för SKB. Dessa beskriver betongens arbetbarhet och dess gjutegenskaper (Thomas Betong, 2024). S beskriver hur mycket betongen sätter sig vertikalt, och SF hur mycket betongen breder ut sig (Svensk betong, u.å.). Vanliga konsistensklasser ses i Tabell 3.

Tabell 3. Utdrag ur Konsistensklasser för betong respektive självkompakterande betong utifrån SS-EN 206 (Thomas Betong, 2024).

Sättmåttssklass	Sättmått
S3	100–150 mm
S4	160–210 mm
S5	220 mm och uppåt
Flytsättmåttssklass	Flytsättmått
SF1	550–650 mm
SF2	660–750 mm

2.3.4 Ballast

Ballast beskrivs som ett kornformigt material som kan vara naturligt, återvunnet eller industriellt framställt (Svenska institutet för standarder, 2008). Ballasten utgör typiskt 60-75% av betongens volym, motsvarande 70-85% av dess massa (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002).

Typiskt anges stenpartiklarnas maximala dimension (Lujabetong, u.å.), kallat $D_{\max}$ (Thomas Betong, u.å.), i betongblandningen (Lujabetong, u.å.). Den maximala stenstorleken fastställs via riktlinjer och standarder som beror av konstruktionens krav och ändamål, då den påverkar betongens egenskaper och prestanda. Genom att justera denna faktor kan betongens densitet, konsistens, hållfasthet och arbetsförmåga kontrolleras (Lujabetong, u.å.). Större ballaststorlek leder till en grövre yta, vilket påverkar vilken ballast som är lämplig i ett projekt. Vidare beror valet av lämplig ballaststorlek på avstånd samt densitet på konstruktionens armering (Svenska institutet för standarder, 2023), där distribuering och mängd påverkar (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002).

Ballast anges i fraktioner med en undre och en övre kornstorlek (Svenska institutet för standarder, 2026), typiskt benämnt d respektive D (Svenska institutet för standarder, 2025). Sorteringen kan bestå av en sammansättning av fin ballast, med $D \leq 4$ mm, grov ballast, där $d \geq 2$ mm och $D \geq 4$ mm, samt finmaterial, kallat filler, som till stora delar passerat en sikt om 0,063 mm (Svenska institutet för standarder, 2008).

Sorteringar om 0-8 mm, 8-16 mm samt 16-32 mm är vanligt förekommande (Heidelberg Materials, 2026), men storlekar upp till 64 mm förekommer bland de mest använda sorteringarna för grov ballast (Svenska institutet för standarder, 2008). Inom en fraktion beskriver kornstorleksfördelningen hur storleksandelarna på ballastkornen förhåller sig till varandra (Strand et al., 2020). Kornstorleksfördelningen har en stor inverkan på konstruktionens konsistens, hållfasthet och sammanhållning (Strand et al., 2020). Då ballast kan bestå av exempelvis krossad sten (Strand et al., 2020), sand eller natursten (KTH, 2021), varierar dess kornstorleksfördelning. Naturgrus har en nästan linjär naturlig fördelning, medan krossat material består av mer flisor, vilket leder till trögare konsistens (Strand et al., 2020). Lokalt kan natursten vara en ändlig resurs, varav användning av krossad ballast ökat (Klimatguiden, u.å.).

Användning av ballast med hög andel finmaterial kan innebära att vatten- och cementbehovet blir mycket högt (Klimatguiden, u.å.). Detta beror på att ytarean på ballasten är större vid små ballastfraktioner (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002). Med en större maximal stenstorlek blir den totala omslutningsarean för cementpastan att täcka mindre, till följd av att den specifika ytan på ballasten blir mindre i förhållande till ballastens volym (Strand et al., 2020).

Användning av återvunnen betong eller annat rivningsmaterial som ballast regleras i standarderna SS-EN 206 samt SS 137003. Beroende på vilket återvunnet material det rör sig om och vilken exponeringsklass konstruktionen har, kan återvunnet ballastmaterial utgöra 0–50% av den totala ballastmängden (Klimatguiden, u.å.). Om ursprunget av rivningsmaterialet utgörs av betong med minst samma hållfasthetsklass och lägst den exponeringsklass som betongen ska användas i tillåts det återvunna materialet utgöra 30% av total ballastmängd för exponeringsklass XF4, annars 0% (Svenska institutet för standarder, 2025). Ytterligare begränsande faktorer för användning av återvunnet material är dock den lokala tillgängligheten, samt behovet att den är provad och certifierad (Klimatguiden, u.å.).

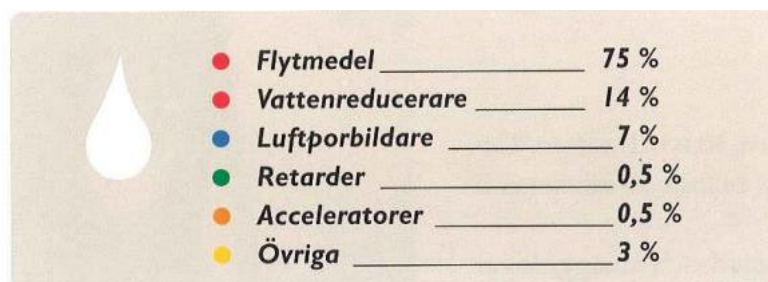
2.3.5 Tillsatsmedel

Olika typer av tillsatsmedel används i modern betong för att uppnå önskade eller förbättrade egenskaper (Sveriges geologiska undersökning, 2023), antingen i färskt eller hårdnat tillstånd (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.a). Dessa kan varieras för olika ändamål (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.b). De flesta tillsatser som är standardiserade enligt SS EN 934-2 är typiskt vattenlösningar och utgör vanligtvis mindre än 1,5% av cementmängden (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.a).

Med hjälp av flytmedel och vattenreducerare, kallat superplasticerare och plasticerare, kan betongens viskositet, vilket är ett mått på hur trögflytande den är, påverkas. Med dessa tillsatser blir betongen lätthanterlig och lättflytande, vilket gör den pumpbar. Betongen kan då med lätthet rinna ner i formen och omsluta även tätt armerade konstruktioner, och ökar därmed betongens gjutbarhet. Denna form av tillsatsmedel minskar vattenbehovet i betongen, vilket leder till att både hållfasthet och beständighet förbättras (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.b)

Luftporbildare minskar betongens vattenabsorption genom bildandet av luftporer. Detta förbättrar frostbeständigheten hos betongen, vilket innebär att betongen klarar upprepade nedfrysning och upptining (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.a).

Retarder och acceleratorer påverkar tidpunkten för när betongens hållfasthet börjar tillta, där en retarder fördröjer tilltagandet medan en accelerator påskyndar tilltagandet. Retarder håller betongen lös och används vid längre transporter (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.b). Användningen av tillsatsmedel i Sverige fördelas enligt Figur 4.



Figur 4. Användningsfördelning mellan tillsatsmedel i Sverige (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.b).

Förutom produktionstekniska fördelar, där mindre arbetskrävande betong leder till en förbättrad arbetsmiljö och, i förlängningen, en bättre betongkvalitet, kan tillsatser innebära fördelar för både ekonomi och miljö (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.b). Genom tillsatser kan mängden cement minimeras och gör att kvarvarande cementmängd används mer resurseffektivt, vilket minimerar koldioxidavtrycket hos betongen (Swedish Association for Concrete Admixtures, u.å.a). Svenskproducerad betong baseras typiskt på rent Portlandcement eller sammansatt Portlandcement där tillsatser används (Fagerlund, 2012).

2.3.6 Klimatpåverkan

Cement svarar för ungefär 90 procent av en betongs klimatpåverkan (Fossilfritt Sverige, u.å.b), varav en betong som innehåller mindre cement leder till mindre utsläpp (Svenskt Näringsliv, u.å.). En betongkonstruktions cementbehov styrs i stora drag av vilka krav som ställs avseende hållfasthet och beständighet, vilket begränsar den tillåtna mängden alternativa bindemedel och resulterar i en hög cementandel (Boverket, 2021). Materialen är mycket tunga, vilket innebär tunga transporter av materialen (Fossilfritt Sverige, 2023b).

En naturlig process kallad karbonatisering pågår kontinuerligt i betongkonstruktioner, då CO_2 absorberas tillbaka in i cementens kalksten. Karbonatisering kan dock orsaka skada hos utomhuskonstruktioner (Svenskt Näringsliv, u.å.), då processen kan orsaka rost på ingjuten armering. Tidigare har karbonatisering primärt ansetts vara en skadlig process, men nutida forskning har kunnat härleda positiva effekter för klimatet (Heidelberg Materials, u.å.b), där siffror mellan 23 till 50 procent av den CO_2 som avgetts vid cementproduktion uppges kunna återtas (Svenskt Näringsliv, u.å.). Den årliga absorptionen av CO_2 från atmosfären genom karbonatisering uppgår till 300 000 ton i Sverige. Detta motsvarar ungefär 15 procent av landets totala utsläpp från cementtillverkning och 0,5 procent av landets totala CO_2 -utsläpp år 2019. Karbonatiseringsprocessen fortsätter även för återvunnen betong och CO_2 -upptag sker således under betongens hela livscykel (Heidelberg Materials, u.å.b).

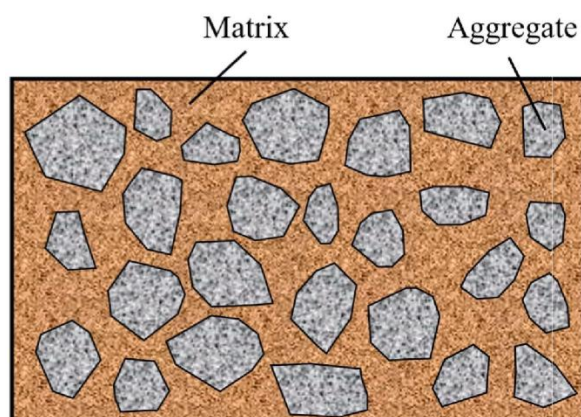
Ballastens bidrag till konstruktionens klimatpåverkan sker i huvudsak från dess transport och då generellt i ringa omfattning (Klimatguiden, u.å.). Återvunnet material är ej per automatik mindre klimatbelastande än vanlig ballast, om transportavstånd och vattenbehov vid dess hantering leder till högre klimatbelastning sett utifrån dess livscykel (Klimatguiden, u.å.).

Klimatnyttan mellan betong och alternativa byggnadsmaterial varierar, då faktorer som livslängd och funktion är avgörande för konstruktionens totala livscykel (Fossilfritt Sverige, 2023b). Betong är för vissa konstruktioner det enda material som möter dess krav på kvalitet och beständighet (Fossilfritt Sverige, 2023a). I en färdplan framtagen av Fossilfritt Sverige (2023b) har aktörer inom betongbranschen sammanställt en rad åtgärder för hur fossilfrihet, eller klimatneutralitet, kan uppnås för betong. Långsiktig hållbarhet anses kunna uppnås genom byggmaterial som, ur ett livscykelperspektiv, har lägsta möjliga miljö- och klimatavtryck. Vidare nämns resurseffektiva konstruktioner, där betongmängden optimeras och minimeras beroende på vilken funktion konstruktionen skall fylla. Val av exponerings- och hållfasthetsklass skall också stå i förhållande till respektive konstruktionsdel, då det påverkar vilken klimatreduktion som är möjlig.

2.4 Konstruktionsmetoder

2.4.1 Fabriksbetong

Fabriksbetongen levereras färdigblandad direkt från fabrik till projektplats för gjutning, antingen betong som vibreras eller självkompakterande betong, SKB (Betongindustri Heidelberg Cement Group, u.å.). Beroende på slangstorlek som används i samband med gjutning begränsas den maximala stenstorleken (Thomas Betong, 2024). Vid pumpning med 4"-5" slang är $D_{\max}$ 32 mm (Thomas Betong, u.å.), för 3" slang är $D_{\max}$ 16 mm och för 2" slang är $D_{\max}$ 8 mm (Thomas Betong, 2024). Betongpumpningen beskrivs därför som en begränsning av den maximala stenstorleken. Risk för pumpstopp och att anpassning av befintliga maskiner skulle krävas vid större stenstorlekar är ytterligare begränsande faktorer (Strand et al., 2020). I en fabriksbetong gjuts cementpasta och ballast samman (Fossilfritt Sverige, 2023b), enligt Figur 5 (Xu et al., 2025).



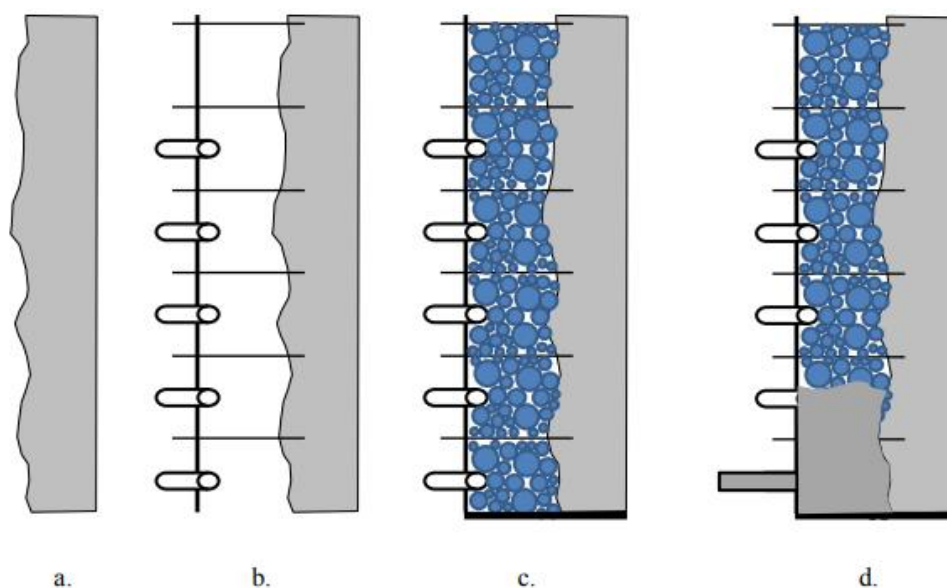
Figur 5. Fördelning av cement och ballast i fabriksbetong (Xu et al., 2025).

2.4.2 Injekteringsbetong

Injekteringsbetong är en gjutmetod som går ut på att ballast som redan ligger utplacerad på gjutstället sammanbinds. Gjutmetoden finns i olika utformningar och under olika benämningar, men baseras på att grövre ballast placeras och kompakteras, vilket skapar ett stenskelett av ballast som är i direktkontakt. Hållrummen fylls sedan med ett injekteringsbruk (Åhl och Gustavsson, 2025), som innehåller mycket fin ballast (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002).

Ursprungligen användes metoden för att stabilisera sjöbotten under bropelare (Åhl och Gustavsson, 2025), men har också använts för reparation samt vid undervattensgjutningar (Kosmatka, Kerkhoff och Panarese, 2002). Användningen av injekteringsbetong i Sverige har varit begränsad men förekommit vid gjutning av fundament och tunnlar samt vid reparation av existerande betongkonstruktioner, bland annat vid renovering av Gamla Årstabron 2005 (Lindvall, 2012).

Injekteringsgjutning kan utföras genom gjutventiler, injekteringsrör eller gravitation (Åhl och Gustavsson, 2025). Figur 6 beskriver konstruktionsstegen, från förberedelse av underlaget (a), installation av form och injekteringshål (b), till ballastfyllning (c) och slutligen injektering (d) av cementbruket (Lindvall, 2012).



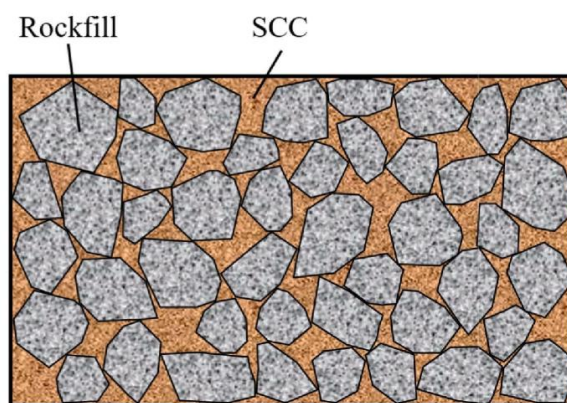
Figur 6. Illustration av konstruktionsstegen för injekteringsbetong (Lindvall, 2012).

Betongmatrisen består typiskt av 60% grov ballast, vilket leder till liten krympning samt låg värmeutveckling. I förlängningen minskar då risken för sprickbildning (Åhl och Gustavsson, 2025). Den grova ballasten bör vara minst 8–10 gånger större än injekteringsbrukets största kornstorlek, som typiskt är 2 mm. En minsta storlek på den grova ballasten blir således 16–20 mm. På 1940-talet användes grov ballast om 100–200 mm, som förklaras av att tillgängligt injekteringsbruk ej hade egenskaperna att omsluta mindre kornstorlekar (Lindvall, 2012). Ballasten i injekteringsbetong kan utgöras av exempelvis återvunnen betong eller siktade schaktmassor, beroende på projektspecifika krav (Åhl och Gustavsson, 2025).

Injekteringsbetong uppges kunna användas tillsammans med armering då injekteringsbruket omsluter alla delar av konstruktionen, men med förbehåll att dessa delar optimeras i förhållande till varandra (Åhl och Gustavsson, 2025). Injekteringsbruket måste vara lättflytande (Strand et al., 2020), för att säkerställa att allt ingjutningsgods omsluts (Åhl och Gustavsson, 2025). Med användning av alternativa bindemedel så som flygaska i injekteringsbruket förväntas cementhalten minska (Paulsson-Tralla och Ekman, 2008). Vid renovering av Årstabron 2005 användes en sammansättning av Portlandcement, slagg, sand och tillsatsmedel (Lindvall, 2012). En bieffekt hos armerad betong där injekteringsbetong används är att den sprickfördelande armeringen kan reduceras, potentiellt halveras (Paulsson-Tralla och Ekman, 2008).

Hög hållfasthet uppges kunna uppnås med lägre cementhalt i en injekteringsbetong jämfört med fabriksbetong. Injekteringsbetong är ej utrymmeskrävande som teknik (Lindvall, 2012), varav avlägsna projektplatser nämns som ett potentiellt användningsområde (Åhl och Gustavsson, 2025). Vidare nämns grova konstruktioner som särskilt intressant för användning av injekteringsbetong (Lindvall, 2012).

Användning och utveckling av metoden återfinns i bland annat USA, Tyskland och Japan (Åhl och Gustavsson, 2025). Metoden har vidareutvecklats och använts i grova betongkonstruktioner, främst dammar, i Kina under 2000-talet, då under benämningen Rock-Filled Concrete, förkortat RFC (ICOLD, 2020). En stenstorlek på minimum 300 mm används och utgör 55–60% av volymen i betongmatrisen. Cementbruket kallas HSCC, från high-performance self-compacting concrete (Jin et al., 2024), som utvecklats från SCC, self-compacting concrete, på svenska SKB (Lu et al., 2026). Användning av alternativa bindemedel i cementbruket för RFC har reducerat dess klimatpåverkan (Jin et al., 2024). Figur 7 visar fördelningen i betongmatrisen för RFC (Xu et al., 2025).



Figur 7. Fördelning av cement och sten i Rock-Filled Concrete (Xu et al., 2025).

Genom användning av lokala material, som uppkommit vid exempelvis grävning på projektplatsen, reduceras transporter. I en jämförelsestudie som genomfördes mellan RFC och konventionell, vibrerad betong, visades en CO₂-reduktion på 72% för materialproduktion, 25% för transporter, 51% för konstruktion och 15,6% för drift och underhåll vid användning av RFC (Jin et al., 2024).

2.4.3 Betong med sparsten

Sparsten beskrivs som sten, med större styckestorlek än singel eller makadam (Statens provningsanstalt, 1934), som lägges i betong av besparingssyfte (Rosenqvist, 2018). Sparstensiden beskrivs som en föregångare till injekteringsbetongen, som också nyttjar större stenar än fabriksbetong (Lu et al., 2026).

Till följd av förhållandevis dyra cementpriser under sent 1800-tal och tidigt 1900-tal nyttjades sparsten som en metod för att minimera cementbehovet (Rosenqvist, 2018). Den främsta motiveringen till att använda sparsten var att minimera materialkostnaden, då priset för OPC var relativt var högt under denna tidsperiod (Strand et al., 2020). Hanteringen av sparsten sägs dock ha inneburit extra kostnader, exempelvis genom att stenen skulle placeras med spetsen nedåt, för att undvika undermålig kringgjutning. Ett primärt applikationsområde för metoden var i grova betongkonstruktioner, där utnyttjandegraden av betongen var låg. Den maximala sparstensmängden, liksom vägledning avseende placering och hantering av sparsten, reglerades via betongbestämmelser (Rosenqvist, 2018).

År 1910 utgavs Svenska Teknologföreningens cement- och betongbestämmelser, som begränsade mängden sparsten till högst 20% av betongens totala volym. Den maximala vikten på en sparsten utgick från en mansbördas storlek, motsvarande vad en man orkar bära (Rosenqvist, 2018). I regel nyttjades stenar av storleksordningen 250 till 500 mm i början av 1900-talet (Strand et al., 2020), men trots dessa bestämmelser återfinns sparstenkonstruktioner från perioden där stenblock med volym om $1/3 \text{ m}^3$ använts. Bestämmelserna angav att stenarna ej fick placeras i betongpartier där utsatthet för dragspänningar och risk för knäckning förekom. Stenen skulle vara väl rengjord och vattenindränkt då den placerades i betongmassan. Vidare angavs ett minsta avstånd om 15 cm mellan två sparstenar, liksom mellan sparsten och formbyggnad (Rosenqvist, 2018).

År 1924 skärptes avståndet mellan sparstenar till 20 cm, medan avståndet mellan sparsten och formbyggnad mildrades till 10 cm. 1924 års bestämmelser angav att ett lager av färsk betong om minst 10 cm skulle utläggas innan sparsten fick placeras ut. Därmed fick sparsten ej placeras direkt på hårdnad betong. Utifrån bestämmelserna år 1942 och 1945 begränsades sparstensmängden till 15% av total volym i grova betongkonstruktioner, medan anvisningar från år 1943 och 1954 begränsade sparstensandelen till 10–20% i konstruktioner där tjockleken var större än 1,5 m. Vidare angavs att gjutningar under vintertid krävde att sparstenen skulle uppvärmas innan iläggning (Rosenqvist, 2018).

Allteftersom att priset för OPC minskade, minskade de ekonomiska incitamenten för fortsatt användning av sparsten (Strand et al., 2020). Sparsten tros ha nyttjats i grova konstruktioner in på 1950-talet (Rosenqvist, 2018), medan användningen idag bedöms vara låg, liksom erfarenheten av metoden (Strand et al., 2020). Sparstensanvändningen har i efterhand ifrågasatts och dess ekonomiska värde bedömts som tvivelaktigt (Rosenqvist, 2018).

I en rapport genomförd av Energiforsk, där en strategisk utblick görs för betong för vattenkraftsbyggnad, nämns att det finns många anläggningar gjutna med sparsten som står kvar idag (Strand et al., 2020). Många sparstenskonstruktioner har bedömts ha låg kvalitet utifrån dagens standarder, främst kopplat till dåtidens bristande betongkvalitet och undermålig

byggteknik, i kombination med dagens krav på bland annat säkerhet. Samtidigt finns sparstenskonstruktioner som fungerat väl under en 100-årsperiod och fortsatt tjänar sitt syfte (Lu et al., 2026). Det återfinns försök att återuppta metoden i Sverige, däribland av Fortum i Långströmmen (Strand et al., 2020).

Sparsten antas teoretiskt sett kunna användas tillsammans med $D_{\max}$ 32 mm, där sparsten placeras ut mellan pumpningarna. Tekniken förutsätter dock att det rör sig om grova gjutningar där sparstenen ryms mellan armeringsjärnen. Om en god arbetsmiljö kan säkerställas, där lyft kan utföras med maskin, antas sparstensbetong vara möjlig att använda. Tillgången till passande maskiner för ändamålet samt behov av specialtillverkning kan däremot vara begränsande faktorer (Strand et al., 2020).

2.5 Referensobjekt

Studiens referensobjekt är en trafikantbrygga placerad på Norra Stavsudda, som är en ögrupp i Stockholms mellanskärgård som trafikeras av kollektiv sjötrafik i form av en Waxholmsbåt året runt. Med anledning av upprustningsbehov av vägsamfällighetens trafikantbrygga genomförde ELU Konsult AB projektering av bryggan år 2020. Relationshandling samt kostnadskalkyl av material och arbetskostnad upprättades för ombyggnation av bryggan, där projektplatsen var cirka 120 m² och livslängden satt till 50 år.

Den färdigställda trafikantbryggan består av en platsgjuten konstruktion av kajdäck med krönbalk, en slitplankinklädd stenkista samt borrade RD-pålar. Den platsgjutna delen av konstruktionen utfördes med fabriksbetong. Delarna beskrivs nedan.

- Kajdäck – Ofta utformat som en bärande, horisontell plattform på en kaj.
- Krönbalk – Gjuten balk som placeras som en avslutning på en kaj, för att stabilisera och skydda konstruktionens kant.
- Slitplank – Övre lager av utbytbar trä som placeras på en underkonstruktion.
- Stenkista – En kubformad, fast träkonstruktion i vatten som fylls med sten.
- RD-påle – Borrade stålrörspåle som fylls med betong.

I relationshandlingen återfinns minimikrav på materialen, utifrån AMA17, enligt Tabell 4.

Tabell 4. Material och utförande båt brygga Norra Stavsudda.

Material	Utförande
Betong	Kajdäck: C32/40, XD2, XF2, vct 0,45
	Krönbalk: C35/45, XD3/XS3, XF4, vct 0,40
Armering	Kvalitet K500C-T
Pålar	RD 140x10
	Fylls med cementbruk 8 mm, vct 0,50

3. Metod

Detta avsnitt redogör för den metod som använts för att besvara studiens syfte. Inledningsvis görs en beskrivning av den litteraturstudie som genomförts, följt av livscykelanalys som metod, och hur det applicerats på studien. En redogörelse görs därefter för hur data inhämtats, bedömts och valts, samt vilka datakvalitetskrav som tillämpats. Därefter beskrivs de antaganden som gjorts i studien. Vidare förklaras de scenarion och fall som undersökts och jämförts, samt den metodik som använts i programvarorna One Click LCA och NTMCalc. Avslutningsvis beskrivs studiens känslighetsanalys samt utformning och genomförande av intervjuer.

3.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie låg till grund för avsnitt 2. *Bakgrund*, med syfte att kontextualisera en teoretisk bakgrund inom ramen för studien. Primärt genomfördes insamling och bearbetning av skriftligt material om betong, cement, konstruktionsmetoder och referensobjektet. Litteraturstudien bidrog också med material till utformningen av studiens metod samt dataavsnitt. I studien användes källor i form av standarder, bestämmelser, artiklar och webbsidor. Material inhämtades primärt via sökning på internet och via Uppsala universitetsbibliotek. Även material på plats hos Riksarkivet undersöktes. Viss mailkontakt låg till grund för vägledning och inhämtning av material under studien, varav kontakter redogörs för i Tabell 5 enligt överenskommelse.

Tabell 5. Mailkontakt.

Namn och roll	Företag
Kontakt 1: Rikard Gustavsson, Teknisk säljare betong	Weber
Kontakt 2: Kyösti Tuutti, Senior advisor, Adjungerad professor emeritus	Zander & Company AB
Kontakt 3: Gustav Skans, Senior ingenjör vattenkraft	Sweco
Kontakt 4: Henrik Sjöberg, Senior betongkonsult	Rekonkret
Kontakt 5: Finn Midboe, Dammsäkerhetsexpert	Fortum

3.2 Livscykelanalys (LCA)

För att förstå den miljöpåverkan som referensobjektet ger upphov till under dess livslängd användes livscykelanalys (LCA) som metod. I denna studie låg standarderna ISO 14040, ISO 14044 samt SS-EN 15804:2021+A2:2019 till grund för livscykelanalysen. Livscykelanalysen utfördes med hjälp av programvarorna One Click LCA och NTMCalc, vilka beskrivs i avsnitt 3.4 *Programvara*. I enlighet med Svenska institutet för standarder (2006a) definierades följande fyra faser i LCA-studien: 1) definition av mål och omfattning, 2) inventeringsanalys, 3) miljöpåverkansbedömning samt 4) tolkning. Respektive fas och funktion i studien beskrivs i delavsnitten 3.2.1–3.2.4. I delavsnitt 3.2.5 beskrivs övergripande antaganden som gjordes i LCA-studien.

3.2.1 Definition av mål och omfattning

Inledningsvis definierades studiens systemgräns, funktionella enhet, miljöpåverkanskategorier samt datakvalitet, vilket utgjorde studiens definition av mål och omfattning.

Studiens systemgräns definierades enligt beskrivning från Boverket (2024a), där en avgränsning av vilka aktiviteter och processer som inkluderas, respektive exkluderas, från det undersökta systemet beskrivs. Uteslutande av stadier, processer och flöden motiveras och konsekvenserna av dess utelämnade förklaras kortfattat, i enlighet med Svenska institutet för standarder (2006a). Då en enskild konstruktions livslängd i praktiken är omöjlig att förutspå och då långa analysperioder leder till osäker spekulering, valdes analysperioden till 50 år, vilket också är en vedertagen standardisering (Boverket, 2024b), samt överensstämde med referensobjektets relationshandling. Då ingen uppvärmning förelåg för konstruktionens driftskede och eltillförseln bedömdes som låg, då den enbart skulle användas till belysning, undantogs klimatpåverkan kopplat till tillförsel av värme och el under trafikantbryggans driftskede. Detta innebar i förlängningen att studiens systemgräns bestämdes till att innefatta råmaterialutvinning, materialproduktion, transport och byggnation av referensobjektet, motsvarande skede A1-A5, samt ett återtag av koldioxid via karbonatisering i skede B1, vilka sågs i Figur 1. Livscykelsskede C exkluderas som en avgränsning, vilket innebar att aspekter så som rivning, bortforsling av rivningsmaterial, återvinningspotential och deponi ej berördes för konstruktionens slutskede.

Studiens funktionella enhet, som är en referensenhet som syftar till att normalisera data för in- och utflöden (Svenska institutet för standarder, 2006b), bestämdes till tillhandahållande av trafikbrygga enligt utformning i relationshandlingen, för användning under en period om 50 år på Norra Stavsudda.

Eftersom målet med studien var att utforska hur förhållandet mellan mängd av, och storlek på, ballast påverkar cementinnehållet i en grov betongkonstruktion och vad detta har för implikationer avseende klimatpåverkan, valdes miljöpåverkanskategorin klimatpåverkan, även kallat GWP från Global Warming Potential, för att kunna bedöma referensobjektets miljömässiga betydelse.

Datakvalitetskraven baserades på de riktlinjer som Svenska institutet för standarder (2006b) föreskriver för att möjliggöra livscykelanalys, där tidsmässig, geografisk samt teknisk täckning beskrivs som beaktansvärda inom systemgränsen. Dessa beskrivs nedan.

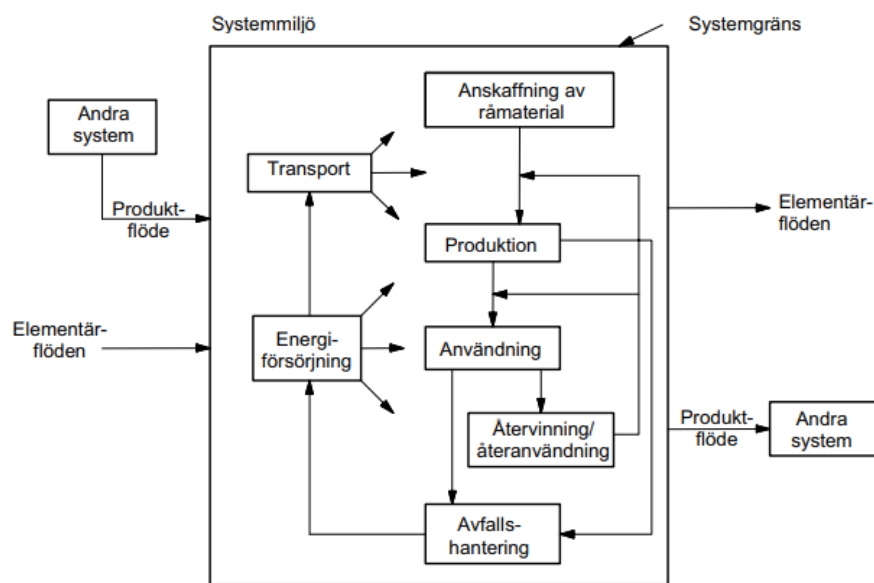
- För att säkerställa tillräcklig tidsmässig representativitet (Boverket, 2024b), begränsades dataåldern och den tidsperiod som studiens data samlades in från till högst 5 år gamla data. Således exkluderas data som märktes med varning kring dess giltighetstid, varv utgångna data ej beaktades.
- Då referensobjektets geografiska placering var i Sverige, och då tillverkningsprocesser och produktionsmetoder kan skilja avsevärt mellan olika platser, valdes data representativ för Sverige för att spegla den svenska marknaden. Material och byggprodukter producerade i Sverige valdes således.
- Den tekniska täckningen beskriver hur väl de data som används i studien överensstämmer med den specifika teknik, eller blandning av tekniker, som används

för den studerade produkten (Svenska institutet för standarder, 2006a). Avseende teknisk täckning påverkade referensobjektets ursprungliga konstruktionsmetod, krav, utformning samt geografiska placering de parametrar som livscykelanalysen utgick från.

3.2.2 Inventeringsanalys

Studiens nästa fas var inventeringsanalysen, kallad LCI från engelskans Life Cycle Inventory (Svenska institutet för standarder, 2006b). Denna fas syftade till att inventera in- och utflöden för det studerade referensobjektet, i enlighet med studiens mål och omfattning. Insamling av data som bedömdes nödvändiga för att uppnå studiens mål genomfördes, där flöden kvantifierades via uppmätning, beräkning och uppskattning.

För att kunna beskriva referensobjektets klimatpåverkan under dess livscykel sammanställdes resursanvändning och miljökonsekvenser av utsläpp för konstruktionens ingående material, med avseende på materialtyp, transporter och arbetsmoment. Sammanställningen innefattade samtliga sammanhängande stadier i referensobjektets produktsystem, utifrån de flöden som ger upphov till potentiell miljöpåverkan. Flödesschemat som låg till grund för inventeringsanalysen ses i Figur 8.



Figur 8. Flödesschema och visualisering av systemgräns i en livscykelanalys (Svenska institutet för standarder, 2006b).

De flöden som undersöktes för referensobjektet var:

- Elementärflöden – resursanvändning av material eller energi som antrar eller lämnar systemet.
- Produktflöden som antrar eller lämnar systemet – återvunnet material eller återanvända komponenter.
- Produktflöden inom systemet – råmaterial och delmontage.

Initialt gjordes en sammanställning av tillgänglig information i kostnadskalkylen och de krav som angavs i relationshandlingen. I kostnadskalkylen identifierades de huvudsakliga

konstruktionsdelarna utifrån mängder och material för respektive del. De resurstyper och mängder som ej skulle varieras mellan fallen benämndes som konstanta material och utgjorde utgångspunkten för samtliga scenarion och fall, i syfte att ge en storleksordning för vilka delar av konstruktionen som var primärt klimatpåverkande under den undersökta analysperioden. Då sammansättningen av konstruktionens betongdel sedan skulle varieras mellan olika fall, syftade sammanställningen av de konstanta materialen att synliggöra cementinnehållets bidrag till konstruktionens totala klimatpåverkan i förhållande till övriga material. I enlighet med Boverket (2024b) räknades mängder i enheter så som m, m² eller m³, om till kg och summerades till generiska resurser. Till följd av en varierande detaljnivå för konstruktionsdelarna gjordes ett antal förenklingar och antaganden, med utgångspunkt i tillgängliga handlingar, vilka nämns löpande i metoden samt beskrivs i 4. *Data*.

För att fullständiggöra de indata som krävdes för miljöpåverkansbedömningen behövdes också klimatdata om respektive produkts klimatpåverkan. Tillgänglig information i relationshandling och kostnadskalkyl jämfördes med tillgängliga byggprodukter och material i One Click LCA. I första hand valdes produktspecifika EPD:er för de material där krav på egenskaper, kvalitet och rekommenderad produkt framgick. För material vars kravställning och rekommendation av produktval framgick, men där en produktspecifik EPD ej fanns tillgänglig för den särskilda byggprodukten, gjordes en jämförelse med EPD:er för produkter med samma klassificering och egenskaper. Producentsspecifika och generiska EPD:er nyttjades enbart då produktspecifika EPD:er ej fanns tillgängliga. Lokala EPD:er föredrogs framför regionala, där en lokal EPD är produkt- eller tillverkarspecifik och en regional EPD är generisk eller branschspecifik, för att spegla studiens geografiska täckning. För material där mängder specificerades men i övrigt med ospecificerade krav, jämfördes materialets tilltänkta funktion i konstruktionen med tillgängliga produkter i One Click LCA.

Sammantaget valdes det material som bäst ansågs representera respektive material, utifrån tillgängliga fasta materialtyper i programvaran. Sammanställning av all indata finns redovisad i 4. *Data*. Den data som inventeringsanalysen resulterade i utgjorde sedan indata i miljöpåverkansbedömningen.

3.2.3 Miljöpåverkansbedömning

Efter inventeringsanalysen följde miljöpåverkansbedömningen. I studiens miljöpåverkansbedömning bedömdes både magnitud och betydelse av den potentiella miljöpåverkan som produktsystemet ger upphov till under produktens hela livscykel, som beskrivet av Svenska institutet för standarder (2006b).

Den data som sammanställdes under inventeringsanalysen utgjorde den indata som användes i miljöpåverkansbedömningen av klimatpåverkan i kategorin GWP, där resulterande klimatpåverkan beräknades enligt

$$\begin{aligned} & \text{Resursmängd [kg]} \times \text{Klimatdata per mängdenhet [kg CO}_2\text{e/kg]} \\ & = \text{Klimatpåverkan mängd [kg CO}_2\text{e]} \end{aligned} \quad (2)$$

Miljöpåverkansbedömning, utifrån Ekvation 2, presenteras för samtliga fall i studiens resultat, 5.1 Livscykelanalys.

3.2.4 Tolkning

Slutligen genomfördes tolkning av miljöpåverkansbedömningen. Tolkningsfasen av en LCA kallas LCIA, från engelskan Life Cycle Impact Assessment (Svenska institutet för standarder, 2006b). I denna fas tolkades resultatet och diskuterades utifrån studiens mål och omfattning. I enlighet med Svenska institutet för standarder (2006b) diskuterades studiens datakvalitet, antaganden och begränsningar, för att utvärdera resultatet. Tolkningen, som ses i avsnitt 5. *Diskussion*, fungerade som en grund för studiens slutsatser.

3.2.5 Antaganden

I LCA-studien gjordes en rad antaganden och förenklingar, som beskrivs kortfattat nedan.

- Referensobjektet antogs vara en nybyggnation. Således exkluderades aktiviteter rörande demontering samt återmontering av befintliga material.
- Planeringsstadiet, upprättande av projektplatsen samt temporär tilläggsponon antogs ej vara av relevans för studien.
- Konstruktionsdelar som ej innehöll betong inkluderades för att ge en övergripande storleksordning om deras respektive bidrag till konstruktionens totala klimatpåverkan mellan de olika fallen, men antogs kunna förenklas till generiska resurser och med exkluderade tomma retur.
- Mindre materialdelar, såsom förankringsringar, skarvhylsor och dylikt, antogs kunna uteslutas utan avsevärd påverkan på respektive dels totala klimatpåverkan.
- Samtliga transporter antogs ha genomförts med diesel B7/MK1 som drivmedel.
- Karbonatiseringen antogs vara proportionell med reduktionen av cementinnehåll.

3.3 Scenarion och fall

Scenarion samt fall utvecklades baserat på de konstruktionsmetoder studien undersökte för att möjliggöra jämförelse mellan olika ballaststorlekar och konstruktionsmetoder. Scenario 1 baserades på fabriksbetong, där ett samband togs fram utifrån betongproportionering som beskriver vilken inverkan den maximala stenstorleken $D_{\max}$ har på cementinnehållet i fabriksbetong och vilken trolig effekt detta har på resulterande klimatpåverkan. Scenario 2 baserades på injekteringsbetong, där en åtgångsberäkning samt en experimentell ersättning av cementtypen i det undersökta injekteringsbruket genomfördes. Scenario 3 baserades på betong med sparsten och utformades utifrån genomförd litteraturstudie samt scenario 1, då sparsten kombinerades med fabriksbetong. Studiens scenarion och fall beskrivs nedan.

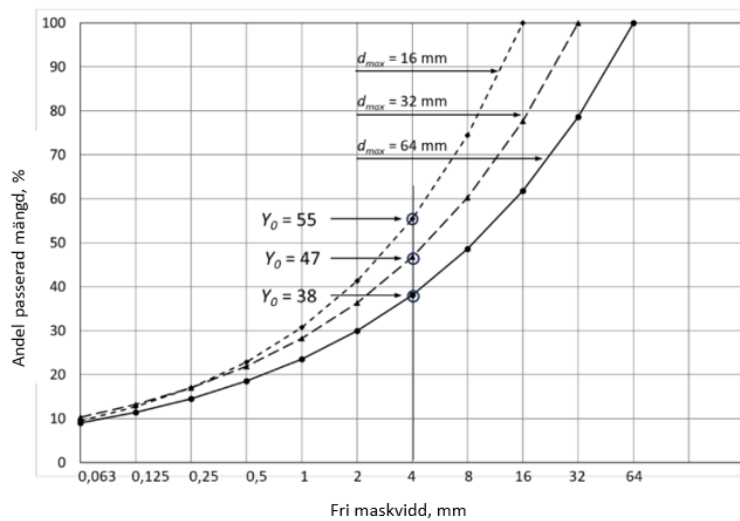
3.3.1 Scenario 1 – Fabriksbetong

För att undersöka hur en betongkonstruktions klimatpåverkan berodde av ballastens maximala storlek, inhämtades initialt information om betongproportionering med avseende på $D_{\max}$. Därefter samband mellan $D_{\max}$ och trolig klimatpåverkan. Undersökta maximala stenstorlekar begränsades till $D_{\max}$ 16 mm, 32 mm samt 64 mm, där $D_{\max}$ 16 mm valdes till referensenhet. Inverkan av ballastens maximala storlek på betongens cementmängd proportionerades utifrån Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025), vars proportionering utgår från idealkurvor av

sammansatt ballastmaterial, där graderingen är kontinuerlig. I idealkurvan används en sikt med en fri maskvidd på 4 mm, vilket är det fria avståndet mellan trådarna i sikten, som gräns mellan fin och grov ballast. Den volymprocent som passerar sikten beskrivs enligt

$$y_0 = 90 - 28,7 \times \log D_{\max} \quad (3)$$

där $D_{\max}$ beskriver den maximala stenstorleken i mm. Figur 9 visar graderingskurvor för $D_{\max}$ 16 mm, 32 mm respektive 64 mm, där y_0 för respektive $D_{\max}$ utifrån Ekvation 3 är markerade.



Figur 9. Graderingskurvor för ballastsammansättning med olika $D_{\max}$ (Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich, 2025).

Cementmängden i betongen är proportionerlig mot ytan ovanför graderingskurvan, kallad finhetsmodulen, FM. FM beskriver den genomsnittliga kornstorleken i ballasten och erhålls genom att beräkna arean över kurvan. En ballastsammansättning som innehåller mycket fint ballastmaterial, har en lägre finhetsmodul, varav FM ökar vid en större maximal stenstorlek. Utifrån graderingskurvorna i Figur 9 har Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025) beräknat värden för FM, som ses i Tabell 6.

Tabell 6. Volymprocent av ballast som passerar 4 mm-sikt samt finhetsmodul (FM) för varierande $D_{\max}$.

$D_{\max}$ [mm]	y_0 [%]	FM
16	55	4,1
32	47	4,6
64	38	5,4

Som nämnt är cementmängden i betongen proportionerlig mot FM, varav Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025) beskriver den cementreduktion som erhålls då FM ökar med en enhet enligt

$$\frac{dC}{dFM} = -\frac{46}{\frac{\rho_w}{\rho_c} + vct} \quad (4)$$

där C är cementhalt utan tillsatsmedel (kg/m^3), FM är den sammansatta ballastens finhetsmodul, ρ_w är vattnets densitet (kg/m^3), ρ_c är cementets kompaktdensitet (kg/m^3) och vct är vattencementtalet.

Utifrån Ekvation 4 beräknar Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025) dC/dFM till 65 kg/m^3 för en betong av konsistensklass S2, med vct 0,40, innehållandes anläggningscement och grov ballast av krossat berg. För denna betongtyp beskrivs förändring i cementinnehåll då FM förändras genom ett korriberat $D_{\max}$ enligt

$$dC = 65 \text{ kg/m}^3 \times dFM \quad (5)$$

vilket innebär en cementreduktion om $32,5 \text{ kg/m}^3$ betong då $D_{\max}$ ökar från 16 mm till 32 mm och $84,5 \text{ kg/m}^3$ då $D_{\max}$ ökar från 16 mm till 64 mm (Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich, 2025).

Utifrån beräknade värden för förändring i cementinnehåll, dC , av Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025) gjordes i studien en korrigering från konsistensklass S2 till S4, då S4 återfanns med större frekvens bland tillgängliga material i One Click LCA. Baserat på ett referensvärde om att bindemedelshalten ökar med 10 kg/m^3 från konsistensklass S3 till S4 (Respondent D: Hedman, 2026), korrigerades dC/dFM till 45 kg/m^3 då konsistensklass S2 byts mot konsistensklass S4. Resulterande dC beräknades till $22,5 \text{ kg/m}^3$ respektive $58,5 \text{ kg/m}^3$ då $D_{\max}$ ökar från 16 mm till 32 mm respektive 64 mm enligt Ekvation 5.

Vidare undersöktes information om cementinnehåll vid olika $D_{\max}$ i en betongbestämmelse från Statens betongkommitté (1965). Hållfasthetsklasserna betecknades då med bokstaven K, följt av ett siffervärde angiven i enheten kp/cm^2 , kallad kilopond/ cm^2 , som beskrev klassens kubhållfasthet på kuber med 15 cm kantlängd (Statens betongkommitté, 1965). Med relationen $1 \text{ kp/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$, ges att exempelvis K 350 motsvarar knappt 35 MPa kubhållfasthet.

Minimifordringar på betongkvalitet angavs i bestämmelsen med avseende på konstruktionstyp och konstruktionens belägenhet och art, där hänsyn togs till beständighet. För konstruktioner, såsom kajer och kajdäck, på ostkusten i mycket fuktig miljö, som utsätts för upprepade frysning och upptining men med ingen eller ringa salthalt, angavs minimifordringen K300

(Statens betongkommitté, 1965), varav K 350 undersöktes i studien, som högsta angiven hållfasthetsklass i bestämmelsen. I Tabell 7 ses ett utdrag för cementinnehåll för en lättflytande konsistens, motsvarande dagens konsistensklass S3, av hållfasthetsklass K 350.

Tabell 7. Utdrag ur Materialmängder i kg/m³ för lättflytande konsistens av hållfasthetsklass K 350 (Statens betongkommitté, 1965).

$D_{\max}$ [mm]	Cementinnehåll [kg/m ³]
16	400
32	380
64	355

Utifrån Tabell 7 gjordes en korrigering från konsistensklass S3 till S4, då bestämmelsen ej explicit kunde översättas till nuvarande standarder och då konsistensklass S4 återfanns med större frekvens bland tillgängliga material i One Click LCA. Baserat på ett referensvärde om att bindemedelshalten ökar med 10 kg/m³ från konsistensklass S3 till S4 (Respondent D: Hedman, 2026), beräknades det resulterande cementinnehållet för S4 enligt Tabell 8.

Tabell 8. Korrigering av cementinnehåll i kg/m³ från konsistensklass S3 till S4 för olika $D_{\max}$.

$D_{\max}$ [mm]	Cementinnehåll [kg/m ³]
16	410
32	390
64	365

Utifrån Tabell 8 beräknades förhållandet mellan dubblad $D_{\max}$ och cementinnehållet till en cementreduktion om 20 respektive 25 kg/m³ betong, motsvarande 5–6,5%. Baserat på ett referensvärde om reduktion av bindemedel på 10 kg/m³ betong då stenstorleken ökas från 16 till 22 mm (Respondent D: Hedman, 2026), samt ett antagande om att bindemedelsreduktionen var fortsatt proportionell, antogs en minsta cementreduktion motsvarande 5% per fördubbling av maximal stenstorlek för fabriksbetong.

Då ideala förutsättningar antogs utifrån de korrigerade värdena för konsistensklass S4 från Hassanzadeh, Appelquist och Fredrich (2025) beräknades cementreduktionen till 5,5-14,3% då cementinnehållet för $D_{\max}$ 16 mm i Tabell 8 antogs som referens. Sammantaget antogs en maximal reduktion av cementinnehållet om 10% vid en fördubbling av maximal stenstorlek för studiens fabriksbetong.

Utifrån ovanstående proportionering, samt med antagande om att 90% av betongens klimatpåverkan kunde härledas till cementinnehållet för referensfallet, i enlighet med Fossilfritt Sverige (u.å.b), utvecklades ett uttryck för att beskriva ett troligt intervall för resulterande kg CO₂e i fabriksbetongen då $D_{\max}$ fördubblas enligt

$$kg\ CO_2e_{fördubbling, \min.} = kg\ CO_2e_{referens} \times [(1 - 0,9) + (0,9 \times 0,95^n)] \quad (6)$$

$$kg\ CO_2e_{fördubbling, \max.} = kg\ CO_2e_{referens} \times [(1 - 0,9) + (0,9 \times 0,90^n)] \quad (7)$$

där $kg\ CO_2e_{referens}$ är resulterande klimatpåverkan för $D_{\max}$ 16 mm, $(1-0,9)$ är referensfallets kvarvarande klimatpåverkan som ej härleds till cementinnehållet, $(0,9 \times 0,95^n)$ respektive $(0,9 \times 0,90^n)$ är cementinnehållets klimatpåverkan vid minsta respektive maximal reduktion av cementmängd och n är antalet fördubblingar.

Fallen för fabriksbetong definierades enligt nedan, där referensenheten $D_{\max}$ 16 mm med konsistensklass S4 utgjorde utgångspunkten för livscykelanalysen i One Click LCA.

- Fall 1.1: $D_{\max}$ 16 mm
- Fall 1.2: $D_{\max}$ 32 mm
 - Fall 1.2.1 Minsta reduktion
 - Fall 1.2.2 Maximal reduktion
- Fall 1.3: $D_{\max}$ 64 mm
 - Fall 1.3.1 Minsta reduktion
 - Fall 1.3.2 Maximal reduktion

3.3.2 Scenario 2 – Injekteringsbetong

För injekteringsbetong inhämtades underlag avseende injekteringsbruk samt proportioner mellan bruk och ballast utifrån produkten weber prepakt injekt (Weber Saint-Gobain, 2024). Fullständig beräkning återfinns i Appendix A. Då enbart injekteringsbruk innehållande cementtypen CEM I fanns att tillgå som EPD, gjordes inhämtning av information hur injekteringsbrukets klimatpåverkan hade förändrats om cementtypen byttes mot samma cementtyp som i fabriksbetongen; cementtypen Anläggning FA CEM II (Heidelberg Materials Cement Sverige AB, 2025), där cementet delvis ersatts av flygaska. Under antagandet att samtliga komponenter och produktionsprocesser kopplade till injekteringsbruket var oförändrade, utan påverkan på den slutgiltiga produktens funktion, nyttjades EPD:n för weber prepakt injekt (Weber Saint-Gobain, 2024) för information om produktens sammansättning och omräkning för *Fall 2.2*. Även denna beräkning återfinns i Appendix A. Fallen för injekteringsbetong beskrivs enligt nedan.

- Fall 2.1: Injekteringsbetong, CEM I
 - 60% stenskelett, 24 000 kg torrprodukt injekteringsbruk
 - CEM I 42,5 N
 - Lokalt återvunnen ballast
- Fall 2.2: Injekteringsbetong, CEM II
 - 60% stenskelett, 24 000 kg torrprodukt injekteringsbruk
 - Anläggning FA CEM II/A-V 42,5 N
 - Lokalt återvunnen ballast

3.3.3 Scenario 3 – Betong med sparsten

För att ta fram respektive fall för scenariot med sparsten nyttjades den litteratur som presenterades i bakgrunden. Där återfanns fog för att sparsten potentiellt kan användas tillsammans med fabriksbetong med $D_{\max}$ 32 mm (Strand et al., 2020). Med ett intervall om 10–20% maximal sparstensmängd som ersättning av betongen (Rosenqvist, 2018), undersöktes nedan fall med sparsten av lokalt återvunnen ballast.

- Fall 3.1: Sparsten 10%, tillsammans med $D_{\max}$ 32 mm enligt Fall 1.2.
 - Fall 3.1.1 enligt Fall 1.2.1 Minsta reduktion
 - Fall 3.1.2 enligt Fall 1.2.2 Maximal reduktion
- Fall 3.2: Sparsten 20%, tillsammans med $D_{\max}$ 32 mm enligt Fall 1.2.
 - Fall 3.2.1 enligt Fall 1.2.1 Minsta reduktion
 - Fall 3.2.2 enligt Fall 1.2.2 Maximal reduktion

3.4 Programvara

Programvarorna One Click LCA samt NTMCalc användes i studiens LCA-kalkyler och beskrivs nedan. Resultaten extraherades för vidare bearbetning och sammanställning i Excel och Google Sheets för visualisering.

3.4.1 One Click LCA

Programvaran One Click LCA är ett verktyg för livscykelanalys. I programmet återfinns det europeiska ramverket Level(s) Life Cycle Assessment (EN15804+A1), som möjliggör analys av en konstruktions hållbarhetsprestanda under dess livscykel (One Click LCA, u.å.). Detta ramverk användes för att genomföra livscykelanalys av respektive fall. Tillgång till programmet gavs via licens hos Uppsala universitet.

Ett referensprojekt skapades och en genomgång av tillgängliga material gjordes enligt tidigare beskrivna bedömningsgrunder för de konstanta materialen. Därefter duplicerades projektet och variationer av material kopplade till betongdelen för respektive scenario gjordes. Karbonatisering av den variabla betongdelen lades till i respektive fall genom funktionen *Carbonisation of cementitious materials*, för att spegla konstruktionens återtag av CO₂ under analysperioden om 50 år.

Transporter korrigerades enligt tillgänglig information från inventeringsanalysen och kompletterades med generiska data tillgängliga i programvaran, vilket redovisas i 4. *Data*. Ramverket Level(s) Life Cycle Assessment exkluderar tomma returer i sin transportberäkning och i One Click LCA använder en lastkapacitet om 100%, vilket gör att transportutsläppet ej fördelades på både tur och retur. Tomma returer inkluderades dock typiskt i respektive materials resulterande kg CO₂e i respektive EPD och för de konstanta materialen antogs detta vara ett tillräckligt tillfredsställande transportupplägg, men för att uppnå högre detaljnivå för betongdelen kompletterades skede A4 med tomma returer med programvaran NTMCalc.

3.4.2 NTMCalc

NTMCalc är ett digitalt beräkningsverktyg för miljö- och klimatkalkyl kopplat till transporter. Programvaran använder sig av livscykelperspektivet well-to-wheel, som motsvarar en

livscykel från energikällans utvinning, till produktion och användning (NTM, u.å.a). Initialt nyttjades NTMCalc för att uppskatta avstånd för sjötransport mellan hemmahamn för färja, lastplats samt projektplats. Avstånd mellan lastplats och projektplats utgjorde indata för sjötransport i One Click LCA.

NTMCalc nyttjades vidare för att komplettera transportrelaterade aktiviteter med tomma returer kopplade till betongtransporten, som ej var möjliga att inkorporera i One Click LCA. För transporttyperna väg- och sjötransport gjordes en bedömning av tillgängliga transporttyper utifrån tillgängliga handlingar. Där angavs betongbilar med kapacitet för 5 m³ betong, motsvarande knappt 12 ton, samt färja med lastkapacitet på 105 ton. En tom retur antogs motsvara en last om 0,1 ton. Följande transporttyper valdes:

- Vägtransport: Rigid truck 14–20 t, med lastkapacitet 12 ton (NTM, u.å.b).
- Sjötransport: General cargo ship inland water ways (NTM, u.å.c).

3.5 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys utfördes för att utvärdera vilken påverkan transportavstånden hade på klimatpåverkan för betongdelen för studiens olika fall. Känslighetsanalysen utfördes med syfte att undersöka vilken inverkan projektplatsens geografiska placering hade för respektive fall. Följande avstånd utgjorde grund i känslighetsanalysen:

- Vägtransporten ökades från det valda referensavståndet om 40 km till 50, 75 samt 100 km, tillsammans med sjötransport om 15 km.
- Sjötransporten ökades från det valda referensavståndet om 15 km till 30, 50 samt 75 km, tillsammans med vägtransport om 40 km.

3.6 Intervjuer

En kvalitativ metoddel i form av intervjuer genomfördes för att komplettera litteratur- och LCA-studien. Detta syftade till att ge insikt i hur ballaststorlek och klimatoptimering i betong förhåller sig till varandra, samt vilka avvägningar som görs kopplat till D_{max} , ballastmängd- och storlek i en betongkonstruktion, och i vilken mån minimerad klimatpåverkan prioriteras med avseende på detta. Slutligen syftade intervjuerna till att bidra med kompletterande information om de alternativa konstruktionsmetoderna injekteringsbetong och sparsten.

3.6.1 Urval

Urvalet av respondenter grundade sig på ett målinriktat sökande, där en förhoppning fanns om att de tilltänkta respondenterna kunde bidra med relevant och intressant information inom ramen för studien. Kontakt initierades per mail, både med kända kontakter via behovsägaren samt utomstående.

Utöver de respondenter som intervju slutligen genomfördes med kontaktades ytterligare potentiella respondenter, där intervjuförfrågningarna lämnades obesvarade. Respondenterna gavs möjlighet att helt eller delvis anonymiseras, vilket ej efterfrågades i någon omfattning, varav samtliga studiens respondenter redovisas i Tabell 9.

Tabell 9. Respondenter.

Namn och roll	Företag	Datum
Respondent A: Lena Åhl, Produktchef betong	Weber Saint-Gobain	2026-02-26 30 min
Respondent B: Rikard Gustavsson, Teknisk säljare betong		
Respondent C: Kyösti Tuutti, Senior advisor, Adjungerad professor emeritus	Zander & Company AB	2026-04-17 1 h
Respondent D: Johan Hedman, Teknisk chef region betong	Skanska Industrial Solutions	2026-04-24 30 min
Respondent E: Ulf Sandström, Senior rådgivare betongteknik	Heidelberg Materials	2026-04-27 1,5 h
Respondent F: Simon Aziz, Regionteknolog		

3.6.2 Genomförande

Både digitala intervjuer och fysiska intervjuer genomfördes, då förutsättningarna för respondenterna varierade. Någon geografisk avgränsning gjordes ej då ämnet ansågs intressant oberoende geografisk placering i landet.

Samtliga intervjuer var semistrukturerade, där tematiska intervjufrågor fungerade som utgångspunkt, men med utrymme för ytterligare perspektiv och följdfrågor. Ett öppet samtal premierades, för att ge respondenterna möjlighet att fokusera på områden de var särskilt kunniga på samt ansåg var relevanta. Då expertisen hos respondenterna skiljde sig, gjorde även intervjufrågorna det i viss mån vilket ansågs ge en bred bild av ämnet. Samtliga intervjuer berörde dock samma teman. Intervjufrågorna skickades till respondenterna i förväg och dessa återfinns redovisade i sin helhet i Appendix B. Viss mailkontakt skedde i efterhand för förtydliganden och följdfrågor, dock i ringa omfattning.

Under intervjuerna togs anteckningar som i efterhand sammanställdes, där följande huvudsakliga teman identifierades:

- geografiska förutsättningar
- ballaststorlek
- alternativa bindemedel
- krav och standarder
- arbetsmiljö
- alternativa konstruktionsmetoder
- ekonomi
- teknikutveckling och framtid

4. Data

I detta avsnitt beskrivs den data som låg till grund för studien. För referensobjektet beskrivs indata för materialmängder, transporter samt arbetsmoment. Även variationen av indata mellan valda scenarion beskrivs. Beräkningar återfinns i Appendix A.

4.1 Materialmängder

För att möjliggöra jämförelse mellan systemen, har en sammanställning av referensobjektets konstruktionsdelar och material gjorts. Dessa beskrivs i Tabell 10.

Tabell 10. Sammanställning konstruktionsdelar.

Konstruktionsdel	Beskrivning	Mängd	Enhet
Slitplank	50x200	260	m
Pålar	RD 140x10 UE	72	m
Form	Regel 45x95	250	m
	Regel 45x145	100	m
	Bindregel 45x195	110	m
	Råspont, 23x120	80	m
	Formplywood, 600x2500	45	st
	Stålkonsoller, 10 kg/st	22	st
Armering	Väggar och platta	3300	kg
Betong	Krönbalk	15	m ³
	Kajdäck	15	m ³
Höjning av mark	Grus	30	m ³

Tabell 11 beskriver de förenklade konstanta konstruktionsdelarna som summerades till generiska resurser. Betongdelen återfinns under 4.4 *Scenarion och fall*.

Tabell 11. Generiska resurser för konstanta material från referensobjektet.

Generisk resurs	EPD	Mängd	Enhet
Virke	One Click LCA, 2025 Generic, Sweden Softwood framing, C24	1222	kg
Formplywood med stålkonsoller	One Click LCA, 2021 Generic, Sweden Wooden formwork plywood 20 mm, single sided with steel fixtures	40,5	m ²
Betong i pålar	Swerock, 2021	0,8	m ³

Stål i pålar	Plant, Sweden		
	Ready-mix concrete, C35/45 vct 0,5		
Armering	SSAB, 2023	2300	kg
	Manufacturer, Sweden		
	Cold rolled steel sheets and coils		
Grus	TIBNOR SE, 2025	3300	kg
	Plant, Sweden		
	Steel rebar for concrete reinforcement		
	Ledins Grus AB, 2025	48 000	kg
	Plant, Sweden		
	Crushed gneiss aggregate, 0/2-0/150 mm		

4.2 Transporter

Tabell 12, 13 och 14 beskriver transportrelaterade aktiviteter för referensobjektet.

Uppmätning av avstånd gjordes för sjötransport enligt Tabell 12.

Tabell 12. Avstånd uppmätta i NTMCalc.

A	B	Avstånd [km]
Boda Brygga	Norra Stavsudda	15
Svartsö Lådna	Boda Brygga	10
Norra Stavsudda	Svartsö Lådna	5

Tabell 13 beskriver typiska transportsценарion för de konstanta materialtyperna. Dessa baseras på generiska medelvärden för respektive materialtyp i One Click LCA, som i sin tur baseras på de projektspecifika parametrar som ställts in. För samtliga dessa materialtyper antogs ett avstånd om 15 km för sjötransport med transporttypen med 0,47 MJ/ton km, där One Click LCA refererar till Boverket. Samtliga utdata avseende de konstanta materialen hämtades från One Click LCA. För betongtransporten gjordes en sammanställning enligt Tabell 14.

Tabell 13. Transportavstånd- och typer för de konstanta materialen.

Materialtyp	Transport	Avstånd [km]
Virke	Lastbil, 40 tons kapacitet (One Click LCA)	130
Formplywood	Lastbil, 40 tons kapacitet (One Click LCA)	130
Betong i pålar	Betongbil, 8 m ³ (One Click LCA)	70
Stål i pålar	Lastbil, 40 tons kapacitet (One Click LCA)	110
Armering	Lastbil, 40 tons kapacitet (One Click LCA)	110
Grus	Dumper, 19 tons kapacitet (One Click LCA)	20

Tabell 14. Transportaktiviteter för betong.

Sträcka	Programvara	Transport	Avstånd [km]
Vägtransport, fabriksbetong	One Click LCA	Betongbil, 8 m ³ (One Click LCA)	40
Vägtransport, injekteringsbruk	One Click LCA	Lastbil, 40 tons kapacitet (One Click LCA)	40
Vägtransport, tom retur	NTMCalc	Rigid truck, 14-20 ton, lastkapacitet 12 ton (NTM, u.å.b)	40
Sjötransport, tom framkörning – Svartsö Lådna till Boda brygga	NTMCalc	General cargo ship, inland water ways (NTM, u.å.c)	10
Sjötransport, lass 1 – Boda brygga till Norra Stavsudda	One Click LCA	Sjötransport, 0,47 MJ/ton km (Boverket)	15
Sjötransport, tom retur – Norra Stavsudda till Boda brygga	NTMCalc	General cargo ship, inland water ways (NTMCalc)	15
Sjötransport, lass 2 – Boda brygga till Norra Stavsudda	One Click LCA	Sjötransport, 0,47 MJ/ton km (Boverket)	15
Sjötransport, tom hemkörning – Norra Stavsudda till Svartsö Lådna	NTMCalc	General cargo ship, inland water ways (NTM, u.å.c)	5

4.3 Arbetsmoment

Tabell 15 beskriver de arbetsmoment som involverade arbetsmaskiner för referensobjektet.

Tabell 15. Sammanställning arbetsmoment referensobjekt.

Materialtyp	Arbetsmoment	Klimatpåverkan	Enhet
Betong	Pumpning	13,48 kg CO ₂ e/m ³ (Olanrewaju, Edwards och Chileshe, 2020)	0,8 m ³ 30 m ³
Pålar	Borrning	1,39 kg CO ₂ e/m (Trafikverket, u.å.)	72 m
Armering	Kranlyft	Bränsleåtgång 25 l/h (Erlandsson, 2013), 2,97 kg CO ₂ e/l (Trafikverket, u.å.).	2 h
Virke och formplywood	Kranlyft	Bränsleåtgång 25 l/h (Erlandsson, 2013), 2,97 kg CO ₂ e/l (Trafikverket, u.å.).	1,5 h
Grus	Fyllning	0,52 kg CO ₂ e/m ³ (Trafikverket, u.å.)	30 m ³

4.4 Scenarion och fall

Indata varierade för betongdelen i respektive fall och beskrivs i Tabell 16.

Tabell 16. Variation i indata för betongdel, baserat på scenario och fall.

Scenario och fall	EPD	[m ³]
1. Fabriksbetong		
1.1 D _{max} 16 mm	FrostBI • Hållfasthet C35/45 • vct 0,40 • D_{max} 16 • Konsistensklass S4 • Cementtyp Anl FA: CEM II/A-V 42,5 N – MH/LA/NSR • Exponeringsklass XC4/XD4/XS3/XF4	30
1.2 D _{max} 32 mm	Skalad baserat på fall 1.1, utifrån beskriven metod	30
1.3 D _{max} 64 mm	Skalad baserat på fall 1.1, utifrån beskriven metod	30
2. Injekteringsbetong		
2.1 Injekteringsbetong, cem I	Weber prepakt injekt • Hållfasthet C40/50 • vct 0,35 • Konsistensklass 480–560 mm (låg SF1) • Cementtyp CEM I 42,5N MH/SR3 • Exponeringsklass X0/XC4/XS3/XD3/XF4/XA1	12
2.2 Injekteringsbetong, cem II	Baserat på fall 2.1, med omräkning för korrigering från CEM I till CEM II	12
3. Betong med sparsten		
3.1 10% sparsten + D _{max} 32 mm	Baserat på fall 1.2	27
3.2 20% sparsten + D _{max} 32 mm	Baserat på fall 1.2	24

5. Resultat

Resultatavsnittet inleds med studiens kvantitativa livscykelanalys. Respektive scenario samt fall presenteras och jämförs numeriskt, både utifrån respektive falls betongdel och övriga konstanta material. Slutligen sammanställs de kvantitativa resultaten. I resultatets andra del görs en redogörelse för den information som framkom under de genomförda intervjuerna, där material från respektive intervju sammanställdes och övergripande teman identifierades. Avsnittet är således tematiskt organiserat.

5.1 Livscykelanalys

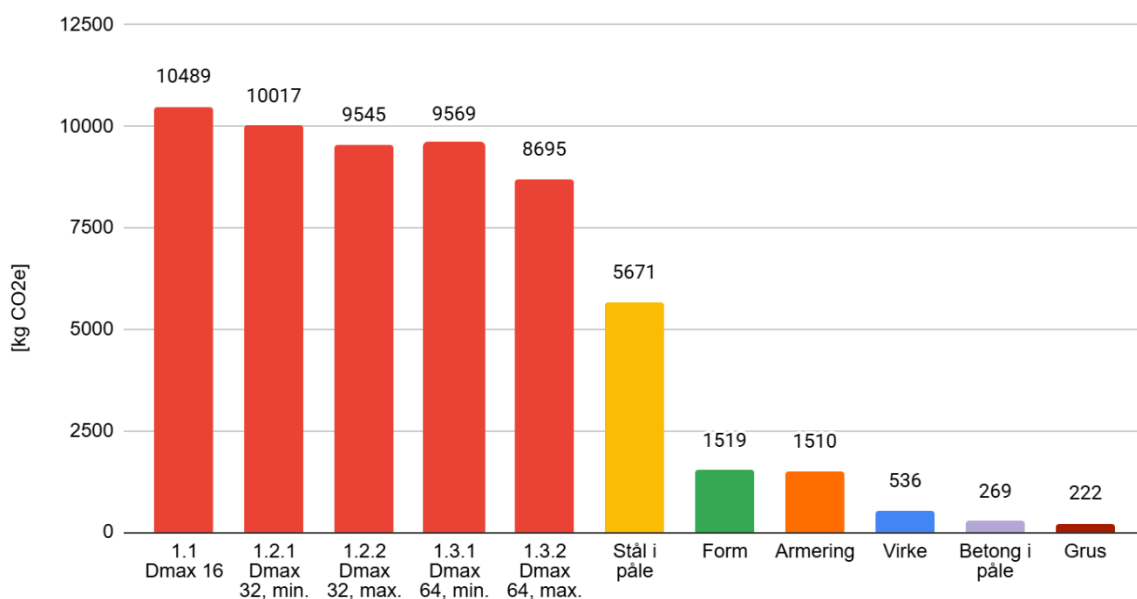
För livscykelanalysen har klimatpåverkan, benämnd som GWP från Global Warming Potential, avrundats till närmsta heltal och procent till 1 decimal.

5.1.1 Scenario 1 – Fabriksbetong

I Figur 10 visas hur GWP för fabriksbetong innehållandes olika D_{max} varierar i förhållande till konstruktionens övriga delar.

Respektive materials GWP [kg CO₂e] A1-A5

Konventionell betong



Figur 10. Fabriksbetong med olika D_{max} i förhållande till övriga konstruktionsdelar.

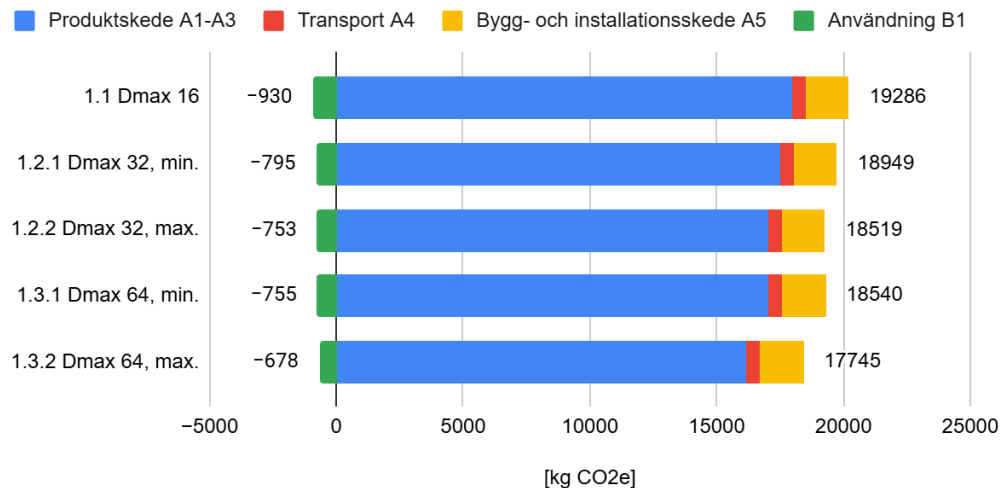
För referensfallet 1.1 D_{max} 16 utgör betongen 51,9% av konstruktionens totala GWP, som är 20 216 kg CO₂e för livscykelsskede A1-A5. Då ballaststorleken fördubblas från 16 mm till 32 mm ses en reduktion av GWP på 4,5–9% för betongdelen, och en reduktion om 8,7–17% med en ytterligare fördubbling till 64 mm. Den maximala reduktionen om 17% motsvarar 1793 kg CO₂e för betongdelen, då den maximala stenstorleken byts från 16 mm till 64 mm.

Den reduktion som ses för fall 1.2.2 D_{max} 32, max. är mycket nära reduktionen för 1.3.1 D_{max} 64, min. Differensen uppgår till 24 kg CO₂e för livscykelsskede A1-A5, där 1.3.1 D_{max} 64, min.

har en högre GWP än 1.2.2 D_{max} 32, max. Detta till följd av att intervallen för minsta och maximala reduktion går omlott. I Figur 11 ses en sammanställning av respektive falls livscykelsskeden för scenariot med fabriksbetong, där också karbonatisering av konstruktionen inkluderas.

Resultande GWP [kg CO₂e]

Fabriksbetong



Figur 11. Livscykelsskeden för konstruktionen, byggd med fabriksbetong.

För fabriksbetongen ses en minskning av klimatpåverkan i produktskedet när ballaststorleken ökar. Även en minskning noteras avseende karbonatisering. Vid dubblering av stenstorlek från 16 mm till 32 mm observeras en reduktion om 1,7–3,9% av GWP för konstruktionens totala GWP.

Den resulterande karbonatiseringen för 30 m³ fabriksbetong uppgick till maximalt 930 kg CO₂e, motsvarande en reduktion om 4,6% för den totala konstruktionen enligt referensfallet 1.1 D_{max} 16. För betongdelen svarar det för en minskning på 8,8%.

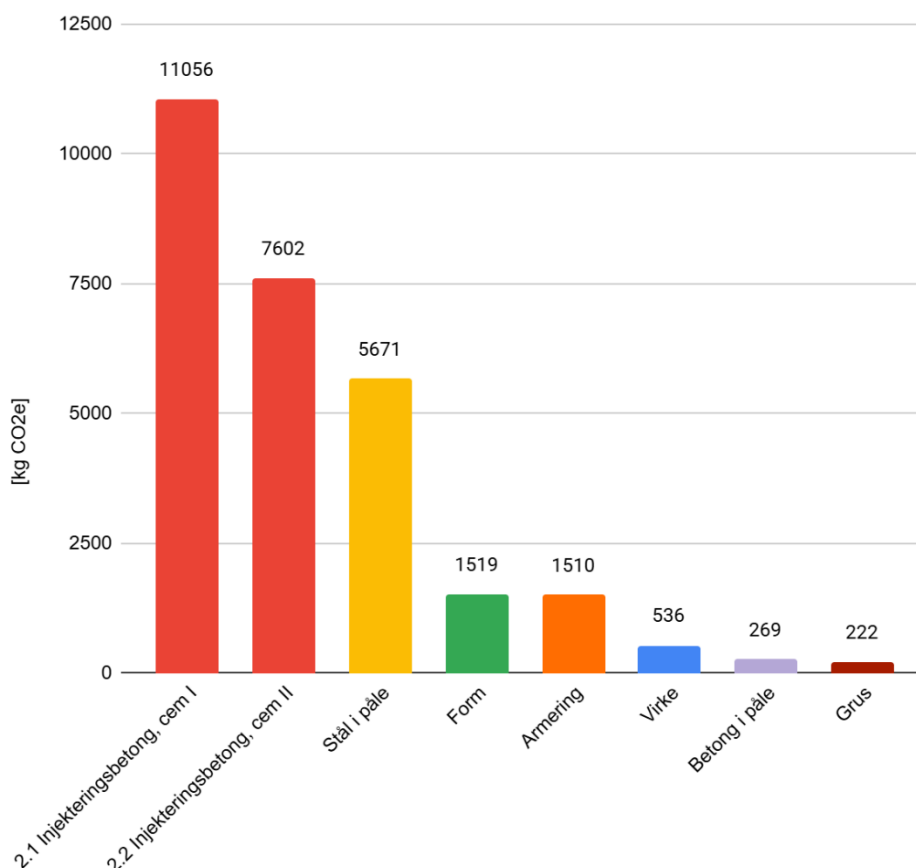
Karbonatiseringspotentialen avtar proportionellt ju mindre cement som betongen innehåller, varav fallet 1.3.2 D_{max} 64, max. hade en karbonatisering om 3,6% för den totala konstruktionen, motsvarande 7,7% för betongdelen.

5.1.2 Scenario 2 – Injekteringsbetong

Figur 12 presenterar resultatet för scenariot med injekteringsbetong, utifrån injekteringsbruk innehållande CEM I respektive CEM II. Liksom i Figur 10 presenteras GWP för konstruktionens samtliga konstruktionsdelar.

Respektive materials GWP [kg CO₂e] A1-A5

Injekteringsbetong

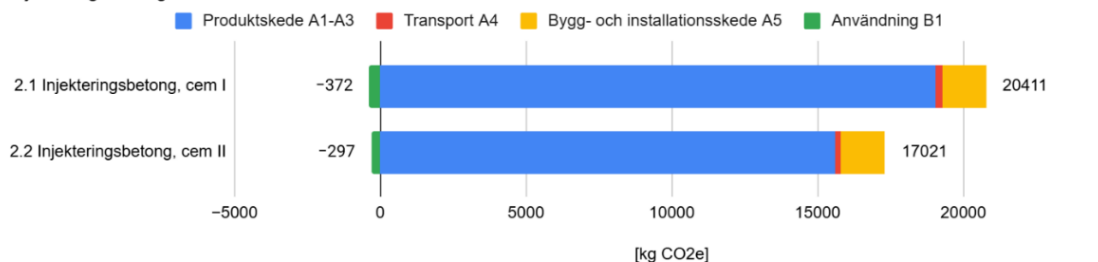


Figur 12. Injekteringsbetong av varierande cementtyp i förhållande till övriga konstruktionsdelar.

Från Figur 12 ses en drastisk skillnad mellan injekteringsbruk där CEM I respektive CEM II nyttjas. För fall 2.1 *Injekteringsbetong, cem I* uppgår betongdelen till 53,2% av konstruktionens GWP för modul A1-A5, motsvarande 11 056 kg CO₂e av konstruktionens totala GWP om 20 783 kg CO₂e. Då CEM I byts till CEM II, ses en reduktion om 3454 kg CO₂e, en minskning motsvarande 31,2% för betongdelen. I Figur 13 visas en sammanställning av respektive falls livscykelkedan för scenariot med injekteringsbetong, där också karbonatisering inkluderas.

Resultande GWP [kg CO₂e]

Injekteringsbetong



Figur 13. Livscykelkedan för konstruktionen, byggd med injekteringsbetong.

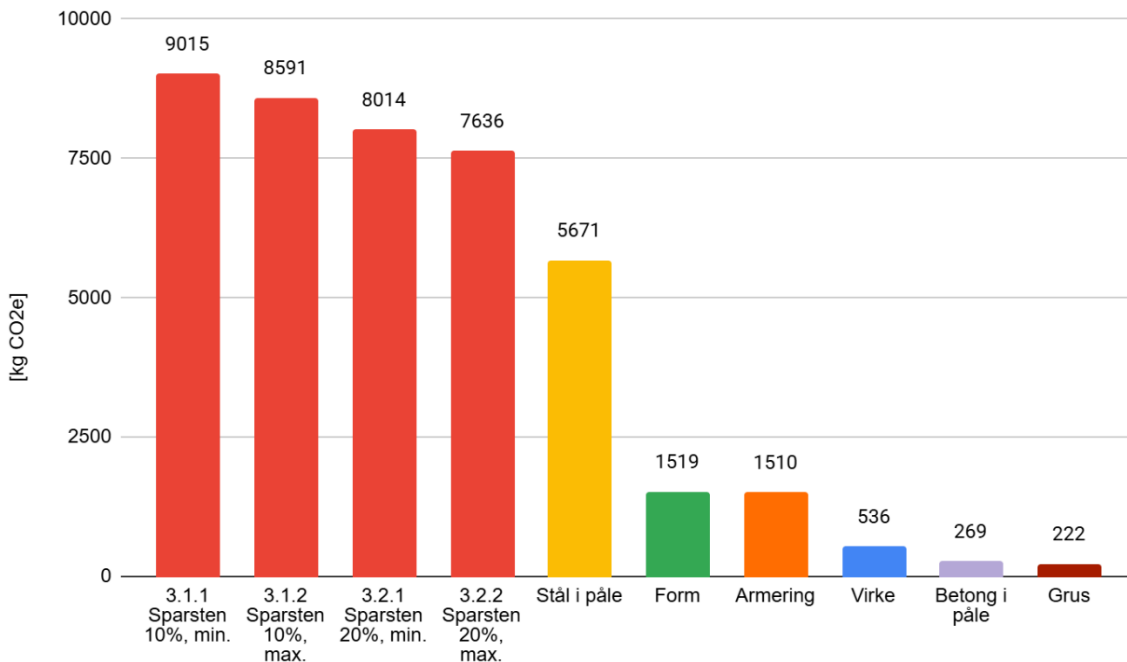
Från Figur 13 ses att skillnad mellan fallen med injekteringsbetong primärt ses i produktskedet, men också med avtagande karbonatisering då cementhalten minskar.

5.1.3 Scenario 3 – Betong med sparsten

I Figur 14 redovisas GWP för scenariot med sparsten för livscykelsskede A1-A5.

Respektive materials GWP [kg CO₂e] A1-A5

Betong med sparsten

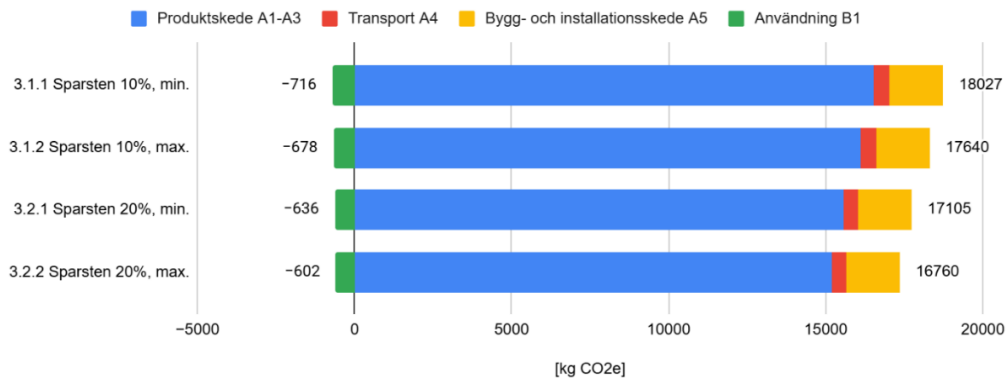


Figur 14. Betong med sparsten i förhållande till övriga konstruktionsdelar.

Från Figur 14 ses att en minsta GWP i betongdelen om 7636 kg CO₂e kan åstadkommas inom scenariot för sparsten för livscykelsskede A1-A5 för fall 3.2.2 Sparsten 20%, max., om konstruktionens betongdel kan ersättas av 20% sparsten och resterande mängd utgörs av betong med D_{max} 32 mm. Detta fall svarar för en total GWP om 16 760 kg CO₂e för konstruktionen. I Figur 15 ses en sammanställning av respektive falls livscykelsskeden för scenariot med sparsten, där också karbonatisering av konstruktionen inkluderas.

Resultande GWP [kg CO₂e]

Betong med sparsten



Figur 15. Livscykelsskeden för konstruktionen, byggd med betong med sparsten.

Som kan avläsas i Figur 15 minskar GWP både med avseende på produktskede och transport när mängden sparsten ökar.

5.1.4 Sammanställning och jämförelse

Nedan följer en sammanställning och jämförelse mellan de scenarion som presenterats. I Tabell 17 presenteras förändring i GWP för betongdelen mellan referensfallet *1.1 D_{max} 16* och de övriga fallen.

Tabell 17. Numerisk sammanställning av GWP för totala konstruktionen och betongdel för respektive fall, angiven i [kg CO₂e].

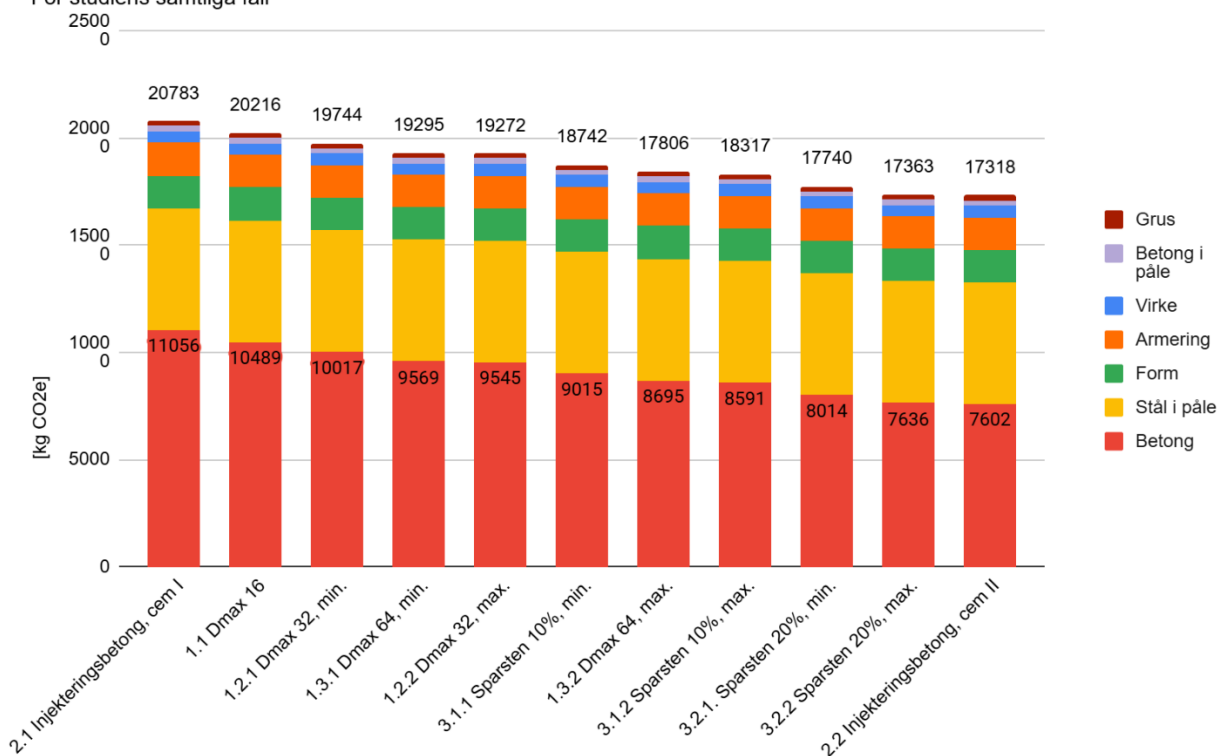
Fall	Totalt	Varav betongdel, inkl. karbonatisering	Förändring GWP betongdel jämfört med referens
1.1 D _{max} 16 (referens)	19 286	9559	-
1.2.1 D _{max} 32, min.	18 949	9222	-3,5%
1.2.2 D _{max} 32, max.	18 519	8792	-8%
1.3.1 D _{max} 64, min.	18 540	8813	-7,8%
1.3.2 D _{max} 64, max.	17 745	8017	-16%
2.1 Injekteringsbetong, cem I	20 411	10 684	+11,8%
2.2 Injekteringsbetong, cem II	17 021	7305	-23,6%
3.1.1 Sparsten 10%, min.	18 027	8300	-13,2%
3.1.2 Sparsten 10%, max.	17 640	7913	-17,2%
3.2.1 Sparsten 20%, min.	17 105	7378	-22,8%
3.2.2 Sparsten 20%, max.	16 760	7034	-26,4%

Sammantaget ses i Tabell 17 att betongdelens GWP som mest minskar med 26,4% för fallet *3.2.2 Sparsten 20%, max.* och som mest ökar med 11,8% för fallet *2.1 Injekteringsbetong, cem I*, i jämförelse med referensfallet *1.1 D_{max} 16*. Dessa är således de fall där minsta respektive högsta värde på GWP uppnås för konstruktionen.

I Figur 16 ses GWP baserat på material i livscykelsskede A1-A5 för de undersökta fallen, det vill säga utan karbonatisering. Transporter är dock inkluderade för respektive material. Totalvärde för betongdel samt totalvärde för konstruktionen per fall anges, sorterat i avtagande ordning.

Totalvärde GWP [kg CO₂e] livscykelsskede A1-A5

För studiens samtliga fall

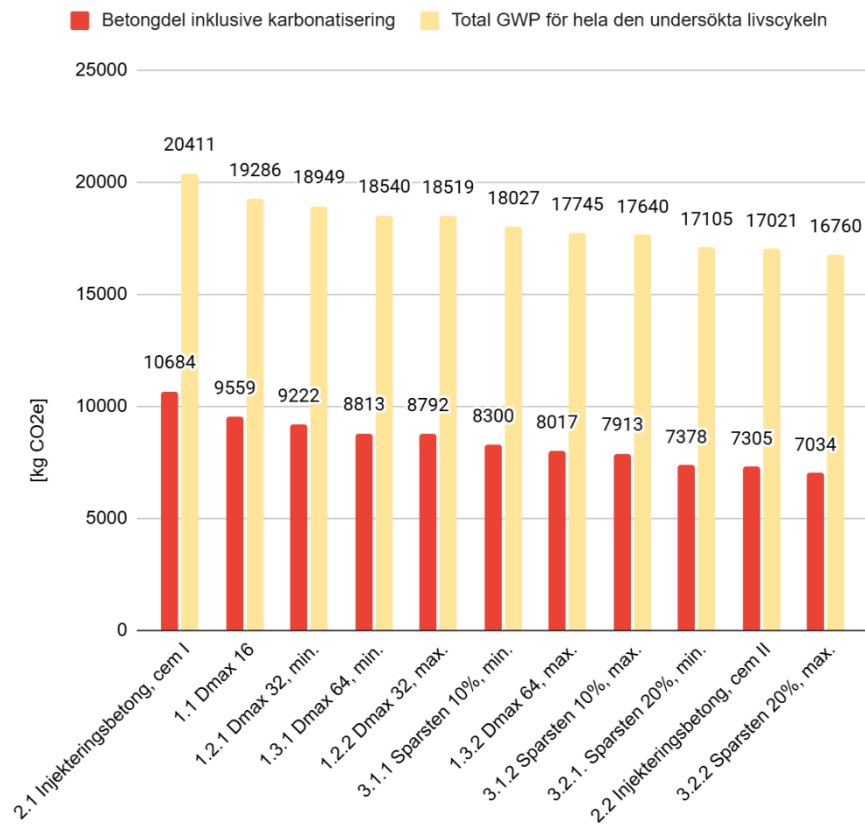


Figur 16. Fördelning GWP för konstruktionens samtliga material för livscykelsskede A1-A5, för studiens samtliga fall.

Fallen för injekteringsbetong ses i Figur 16 vara ytterligheter, motsvarande ett intervall mellan 17 318 och 20 783 kg CO₂e GWP för den totala konstruktionen, med avseende på livscykelsskede A1-A5. Differensen uppgår till 3465 kg CO₂e och härleds till betongdelen i respektive fall. När karbonatisering inkluderas sorteras fallen i stället enligt Figur 17.

Absolut totalvärde GWP [kg CO₂e] av betongdel och den totala konstruktionen för hela livscykeln

För studiens samtliga fall



Figur 17. Resultande GWP för betongdel respektive hela konstruktionen för hela livscykeln, för studiens samtliga fall

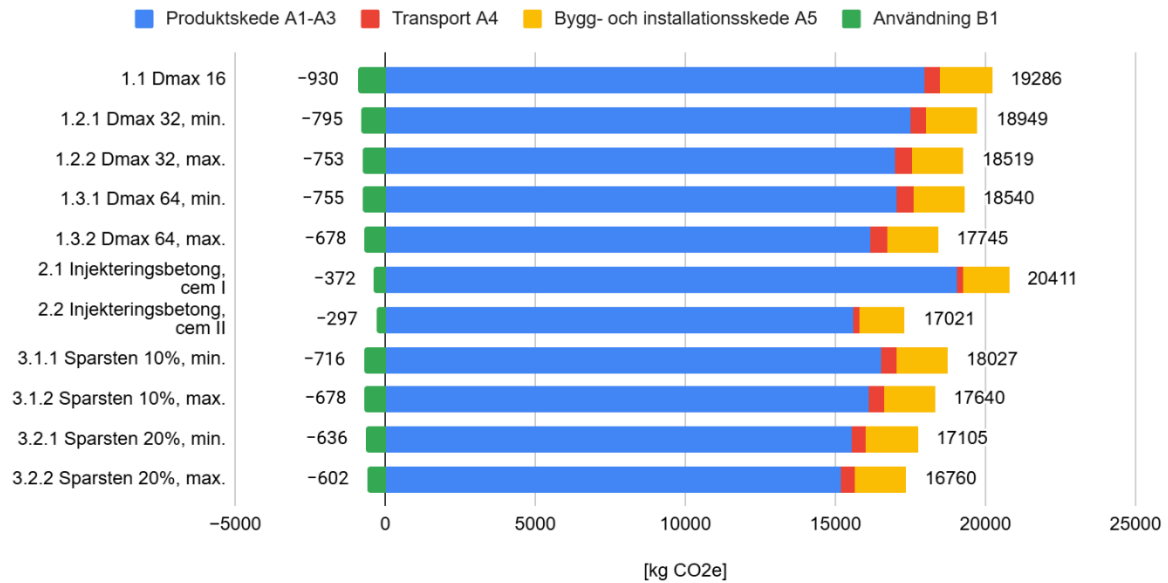
I Figur 17 visas att differensen mellan högsta och lägsta värde, 2.1 Injekteringsbetong, cem I respektive 3.2.2 Sparsten 20%, max., uppgår till 3651 kg CO₂e. Detta motsvarar en skillnad om 34,2% för betongdelen, eller 17,9% för hela konstruktionen. Mellan referensfallet 1.1 D_{max} 16 och fallet med lägst GWP, 3.2.2 Sparsten 20%, max., är differensen 2526 kg CO₂e, vilket motsvarar en reduktion om 26,4% för betongdelen, eller 13% för hela konstruktionen. Mellan referensfallet och fallet med högst GWP, 2.1 Injekteringsbetong, cem I, ses en ökning på 1125 kg CO₂e, motsvarande en ökning på 11,8% för betongdelen, eller 5,8% för hela konstruktionen.

En observation som kan göras då karbonatisering räknats in är att den cementmängd som leder till ett högt GWP i konstruktionens produktskede, sedan bidrar till ett större möjligt återtag av CO₂ genom sin karbonatiseringspotential. I viss mån kan alltså cementinnehållet i betongdelen kompensera för initiala utsläpp som skett tidigt i livscykeln.

I Figur 18 ses den sammanställda fördelningen mellan livscykelskedet för studiens samtliga undersökta fall.

Totalvärde GWP [kg CO₂e] och fördelning mellan livscykelkedan

För studiens samtliga fall



Figur 18. Livscykelkedan för konstruktionen, för studiens samtliga fall.

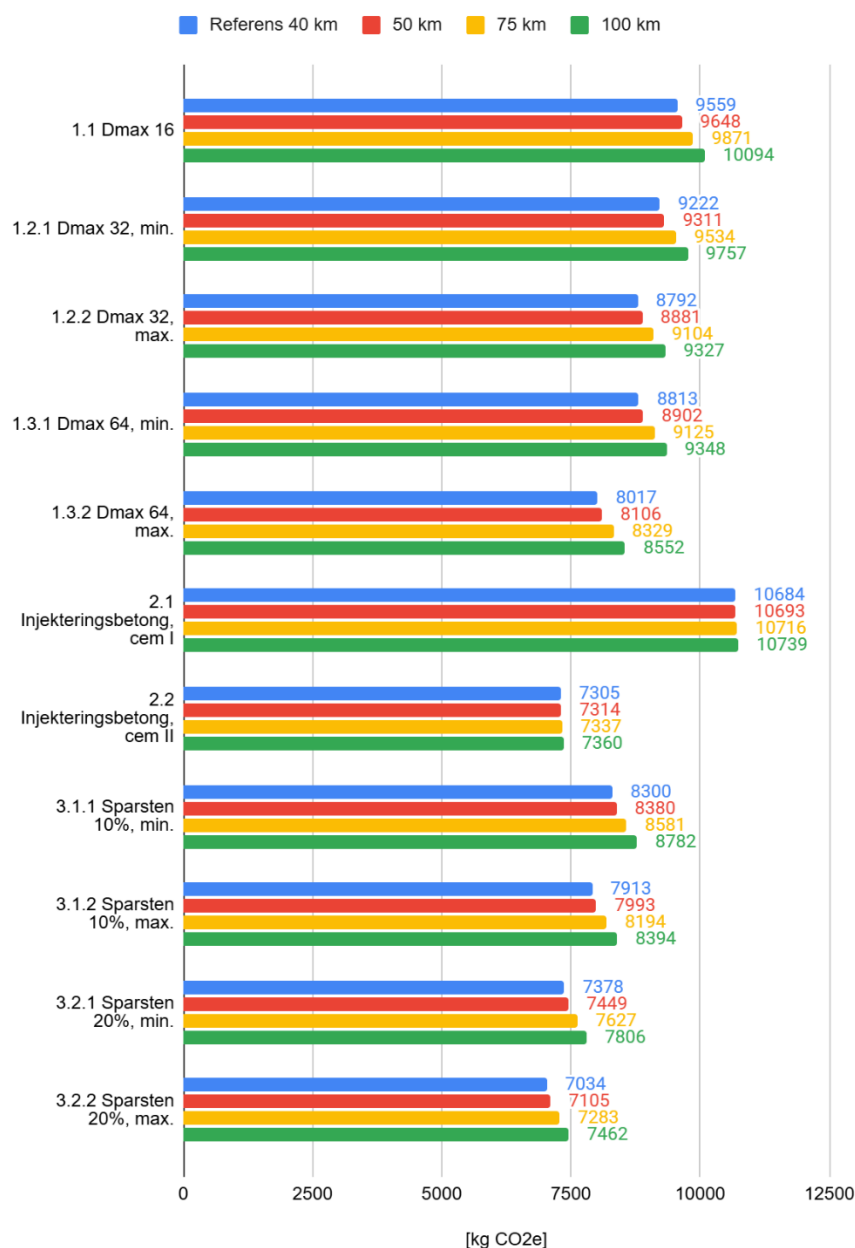
En minskning av transportrelaterade aktiviteter ses både mellan och inom scenarion på grund av skillnader i logistikupplägg samt varierande leveransvolym. För fallen i scenariot med injekteringsbetong innebär det en reduktion om 349 kg CO₂e jämfört med scenariot med fabriksbetong, en minskning om knappt 63%. För scenariot med sparsten ses en reduktion på 40–80 kg CO₂e, motsvarande 7,2–14,4%, i jämförelse med scenariot med fabriksbetong.

5.1.5 Känslighetsanalys

I Figur 19 respektive Figur 20 ses den utförda känslighetsanalysen med avseende på väg- respektive sjötransport för konstruktionens betongdel.

Känslighetsanalys - vägtransport

För studiens samtliga fall



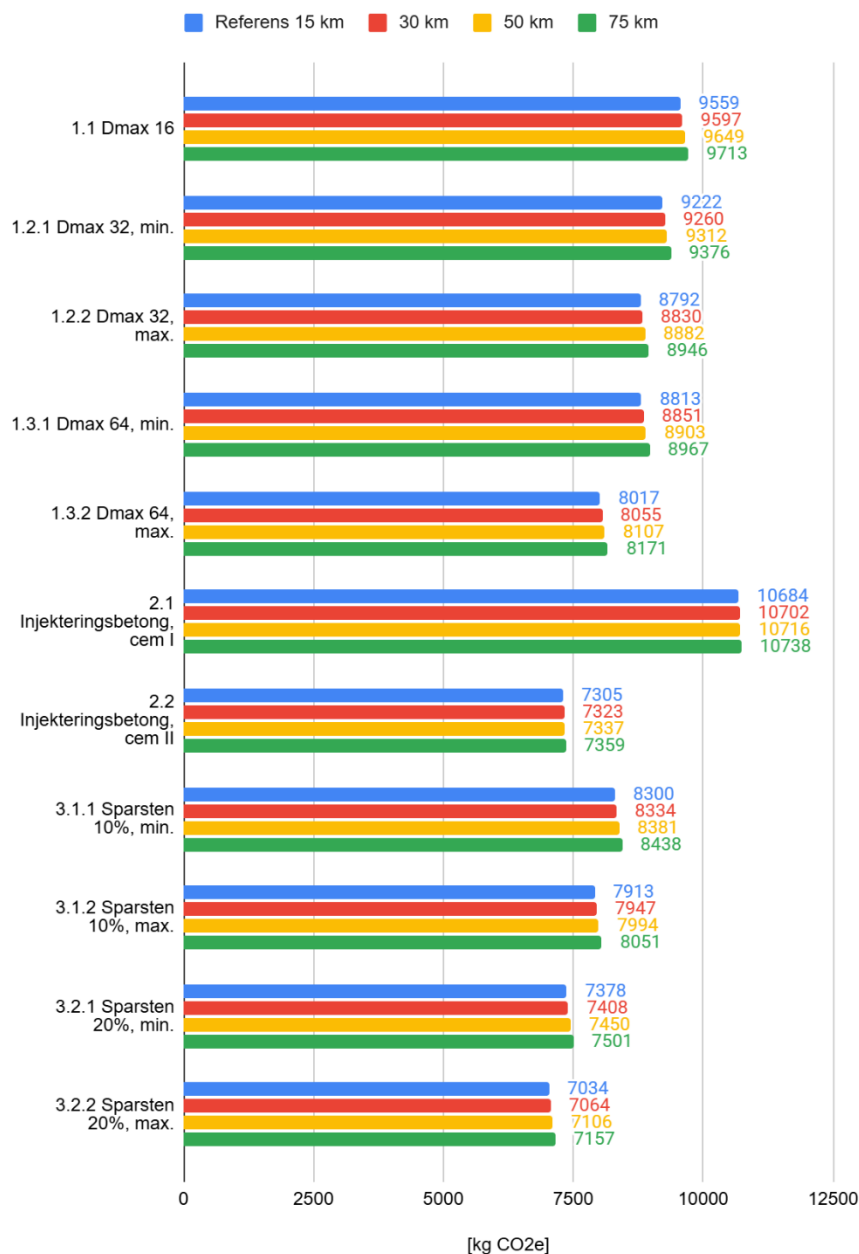
Figur 19. Känslighetsanalys för vägtransport, resulterande GWP för konstruktionens betongdel vid ökade avstånd

Från Figur 19 ses att för fabriksbetong som transporteras till projektplatsen med betongbil ökar betongdelens kg CO₂e med större procentuell ökning, än i jämförelse med injekteringsbetong, där torrbruk levereras till projektplatsen med lastbil, då vägtransportavståndet ökar. För 30 m³ fabriksbetong innebär ett ökat vägtransportavstånd från 40 km till 50, 75 respektive 100 km en ökad GWP om 89, 312 respektive 535 kg CO₂e. För scenariot med injekteringsbetong ökar GWP med 9, 32 respektive 55 kg CO₂e för dessa transportavstånd. Resultatet som ses för scenariot med sparsten är skalat utifrån betongmängd, baserat på scenariot med fabriksbetongen.

I Figur 20 visas känslighetsanalysen som utfördes för ett ökat sjötransportavstånd.

Känslighetsanalys - sjötransport

För studiens samtliga fall



Figur 20. Känslighetsanalys för sjötransport, resulterande GWP för konstruktionens betongdel vid ökade avstånd

För ett ökat sjötransportavstånd enligt Figur 20 ses en liknande trend som för vägtransport men med ett utfall som ej ökar kg CO_{2e} lika betydande, då sjötransporten för samtliga fall utgått från samma transporttyp. Ett ökat sjötransportavstånd från 15 km till 30, 50 respektive 50 km innebär en ökning av GWP om 38, 90 respektive 154 kg CO_{2e} för fabriksbetong. För torrbruket till injekteringsbetongen motsvarar det en ökning om 18, 32 respektive 54 kg CO_{2e}.

5.2 Intervjuer

5.2.1 Geografi och projektplats

Geografiska förutsättningar lyfts av flera av studiens intervjuobjekt som starkt påverkande på vilka ballastfraktioner och $D_{\max}$ som är tillgängliga, samt vilket behov och tillgång till ballastmaterial som finns på projektplatsen.

Tidigare användning av naturgrus har successivt fasats ut till förmån för krossat material (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026), då naturgrus betraktas som en ändlig resurs. Skulle branschen nyttja naturgrus skulle uppskattningsvis 3 mils rullstensås per år förbrukas. Detta innebär att man nyttjar krossat bergmaterial alltmer, vilket påverkar vilken kvalitet och storlek som går att uppnå på stenmaterialet (Respondent D: Hedman, 2026), samtidigt som det är en ballast som är svårare att hantera i jämförelse med naturgrus (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

Geografiska förutsättningar i form av olika bergarter påverkar vidare vilka fraktioner som finns tillgängliga i en lokal täkt och vilka stenstorlekar som finns att tillgå i det geografiska närområdet (Respondent D: Hedman, 2026). Det bergmaterial som bryts måste krossas för att åstadkomma en rundare form (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Beroende på bergart blir kornen olika runda vid krossning. Detta begränsar hur stora stenstorlekar som sedan finns tillgängliga, då för flisiga eller kantiga korn leder till en sämre betongkvalitet (Respondent D: Hedman, 2026), samt ökar slitaget på utrustningen (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

Betongfabrikernas utformning, utifrån dess antal av ballastfickor, är vidare en begränsande faktor. Det anses ej vara ekonomiskt försvarbart att utöka till fler fraktioner för enskilda projekt, då det innebär mycket stora kostnader för den enskilda aktören. Om det däremot skulle röra sig om en nybyggd betongfabrik, där det visat sig vara tekniskt genomförbart att använda större ballastfraktioner, skulle det potentiellt vara möjligt att utöka befintliga fraktioner (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

För injekteringsgjutning uppkommer möjligheten att nyttja lokal ballast. Detta kan minska behovet av bortforsling av material från projektplatsen, som då ballasten kan användas och fylla ett syfte. Även en minskning av tunga transporter minskar, då cementmängden minskar (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

5.2.2 Ballast

Ballaststorlekens betydelse för betongens klimatpåverkan är återkommande i intervjumaterialet, där flera respondenter tar upp att en ökad maximal stenstorlek principiellt reducerar cementinnehållet och således klimatpåverkan.

Utöver minimerad klimatpåverkan, nämns fördelar som lägre värmeutveckling och minimerad krympning kopplat till en lägre cementhalt då $D_{\max}$ ökas (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Ett primärt praktiskt hinder för att kunna öka $D_{\max}$ idag är armeringstätheten (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Dagens konstruktioner innehåller typiskt mycket armering, i vissa fall vad som skulle kunna anses

som överarmerade konstruktioner. Detta försvårar användandet av större ballast (Respondent C: Tuutti, 2026). Likt fabriksbetong placeras armeringen först i konstruktionen även vid injekteringsgjutning, varav en mycket tät armering innebär att val av ballast begränsas och måste anpassas. Även anpassning utefter armeringstyp är nödvändig, om exempelvis prefabricerade armeringsstrukturer så som armeringskorgar används. En bieffekt av användning av injekteringsbetong är att armeringen potentiellt, delvis, kan ersättas med ballast. Någon fullständig ersättning är däremot ej möjlig (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

Pumpbarhet och separationsrisk för SKB, där för stora stenar ej flyter med betongen, är hinder för användning av större ballaststorlekar (Respondent D: Hedman, 2026). I en självkompakterande betong, SKB, som kräver mycket cement, bidrar $D_{\max}$ 32 mm ej med självkompakterande egenskaper. Flytbarheten hos betongen minskar vid större stenstorlekar, varav mindre stenstorlekar föredras. Både ballasthalt och stenstorlek begränsas således för SKB och 32 mm-stenar är därför sällan förekommande idag (Respondent C: Tuutti, 2026). Ett kompletterande perspektiv är att hanteringen av 32-sten inte anses vara ett problem, utan att det är dess påverkan på konsistensen som snarare påverkar (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). För bara 6 år sedan användes betydligt mer 27 mm-sten än idag, vilket anses kunna kopplas till dagens användning av alltmer SKB (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Skanska uppskattar att ungefär 60% av den ballast som nyttjas i deras projekt har $D_{\max}$ 16 mm (Respondent D: Hedman, 2026).

Maximal stenstorlek förordas både hos Skanska och Heidelberg Materials. Hos Skanska prissätts ett lägre $D_{\max}$ högre, vilket typiskt styr kunderna till att välja ett större $D_{\max}$. Genom denna princip nås också relevant klimatoptimering, genom att kunden väljer största möjliga stenstorlek (Respondent D: Hedman, 2026). Hos Heidelberg Materials föreslås ett maximalt $D_{\max}$ i kontakt med kund och de undersöker vidare metoder för att maximera $D_{\max}$, för att minimera kostnader och som en metod för klimatoptimering (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Att större stenstorlekar bör övervägas i de sammanhang de är möjliga, utifrån konstruktionens förutsättningar, är respondenterna överens om. Respondent C (2026) kompletterar också med att ballasten bör väljas utifrån applikation och förväntat slutresultat.

Angående vilka ballasttyper som är lämpliga för injekteringsbetong, görs en bedömning utifrån de krav som respektive projekt har. En bedömning av tillgängliga material på plats är nödvändigt för att optimera de resursflöden ett projekt ger upphov till. Övergripande anses att alla typer av mineraliska produkter går att gjutas med och stenprodukter är ett naturligt val. Vid gjutning är det vanligt förekommande att tvättad ballast krävs, även vid undervattensgjutning. I sak finns inget krav på tvättad sten, däremot är det viktigt att det ej förekommer förorening från exempelvis jord för att säkerställa god vidhäftning mellan cement och sten. Om ballasten tvättas av i formen, trycks vattnet ut med lätthet vid gjutning (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

Avseende fraktioner på ballasten i injekteringsbruket ses 10 mm lämpligt som minsta ballaststorlek, då komplexiteten i gjutningen ökar om ballasten är mindre. Ballasten i

stenskelettet kan i princip vara hur stor som helst, beroende på konstruktionens utformning, men med mycket stor ballast blir hålrummen mellan stenarna stora och kräver mycket cementpasta för att fylla. En godkänd betongmatris för injekteringsbetong bör ligga på runt 60% sten för att god hållfasthet skall uppnås. Detta innebär en kraftig minimering av den mängd cement som transporteras till projektplatsen i jämförelse med fabriksbetong (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

5.2.3 Alternativa bindemedel

Avseende alternativa bindemedel är flera av respondenterna av uppfattningen att flygaska och masugnsslagg inte är hållbara alternativ i förlängningen, då dess tillgång väntas minska (Respondent C: Tuutti, 2026; Respondent D: Hedman, 2026; Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Tillgången till flygaska har varierat sedan dess introduktion som alternativt bindemedel. Rysslands invasion av Ukraina ledde dock till fortsatt tillgång, då stenkolseldning ersatte det stoppade naturgasflödet (Respondent D: Hedman, 2026). Medan tillgången till flygaska väntas minska snabbare, ses tillgång till masugnsslagg också vara avtagande, då mycket av slaggprodukterna redan idag går direkt till deponi då de inte håller kvaliteten (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

Att hitta alternativa bindemedel för att ersätta den enorma volym som idag används globalt är en mycket kritisk process. Som en av världens största handelsvaror krävs mycket stora och återkommande flöden av alternativa bindemedel. I Sverige nämns restprodukter från gruvnäring, fjärrvärme och rivningsbranschen som potentiella flöden, där deponi dessutom kan minimeras. En årsproduktion som resulterar i mindre än 100 000 ton restprodukt kan potentiellt vara en ointressant siffra för den svenska branschen (Respondent D: Hedman, 2026).

Skanska lägger primärt fokus på att ersätta cement med alternativa bindemedel, men också att nyttja så lite bindemedel som möjligt. Skanska arbetar aktivt med receptoptimering och att optimera ballasten, där minskning av bindemedelsmängden både minskar klimatpåverkan samt sänker priset (Respondent D: Hedman, 2026).

5.2.4 Krav och standarder

Ofta blir hållfasthetsklass C35/45 kravställt till följd av exponeringsklassen, vilket innebär att beständighetskravet styr hållfasthetsklassen. Beständighetskravet innebär således att hållfasthetskravet också blir strängt, vilket leder till en högre cementhalt. Respondent E och F befarar att det finns många betongkonstruktioner med överkvalitet idag, där många konstruktionsdelar har överhållfasthet. Trots att uttrycket ”rätt betong på rätt plats” återkommande används som riktlinje, är det typiskt de strängaste kraven som styr på projektplatsen. Vidare styr befintliga standarder hur långa ballastfraktionerna får vara, och i vilken utsträckning vilka fraktioner kan undantas och uteslutas i vissa sammansättningar. Detta innebär att det i vissa avseenden finns låsningar kring användandet av större stenar (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

Både Skanska, Heidelberg Materials och Weber är överens om att konstruktör och kund i slutändan styr val av stenstorlek, både utifrån utförande och konstruktionens utformning, där

det som framgår i handlingar blir styrande. Heidelberg Materials ser inga egentliga problem med stora stenar i betongen, däremot är det en fråga om hur gjutningen praktiskt skall gå till i förhållande till de krav som konstruktionen har avseende exempelvis armering och betongskikt (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

Det injekteringsbruk som används av Weber är CE-märkt, men ej i kombination med en särskild ballast. Detta innebär att det ställs höga krav på vilken ballast som cementbruket kombineras med, för att uppnå de specifika krav som ställs på konstruktionen avseende material och utförande. Ballasten måste således vara godkänd för ändamålet, då den slutliga hållfastheten både beror av ballast liksom cementpasta. Det är då konstruktören som avgör vilken kvalitet som förväntas (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

5.2.5 Arbetsmiljö

Respondent C (2026) tar upp att arbetsmiljön blivit en mycket viktig faktor för dagens betongproduktion. Arbetbarhet, som beskriver hur lätt betongen hanteras vid exempelvis transport och gjutning, och flytbarhet, som är betongens förmåga att breda ut sig, är två faktorer som till stora delar styr dagens betongproduktion. Dessa faktorer blir ofta en arbetsmiljöfråga, vilket dock leder till en betong av sämre kvalitet när betongen inte längre vibreras.

Proportionering av betong återkommer typiskt till frågan om arbetbarhet och konsistens, där konsistensen blivit alltmer lättflytande på dagens projektplatser. Detta sägs kunna härledas till att branschen successivt minskat användningen av vibrerad betong, som blivit en stor arbetsmiljöfråga. Tuutti (2026) lyfter en utbredd ovilja hos betongarbetare att använda metoden, då den är mer arbetskrävande.

Idag används mycket reducerad 16-sten, vilket innebär att $D_{\max}$ är 16 mm, men att andelen större stenar är mycket liten och då fortfarande går att pumpa i en slang av mindre innerdiameter. Heidelberg Materials kunder önskar nyttja 2"-slangar och samtidigt uppnå de krav som framgår i handlingarna att nyttja 16 mm-sten. Respondenterna upplever att detta blivit allt vanligare bland deras kunder (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Vikten på slangen är avgörande för arbetsmiljön vid gjutning, där en smalare slang, som väger mindre, är lättare att hantera. En slang med större innerdiameter minimerar klimatpåverkan, vilket innebär att val av slangstorlek slutligen blir ett optimeringsproblem mellan klimatpåverkan och arbetsmiljö. Med ett tryck på 80-100 bar i slangen innebär pumpstopp en stor arbetsmiljörisk (Respondent D: Hedman, 2026), men så länge betongmassan är sammanhållen bör det ej leda till pumpstopp, då risken uppkommer om massan separerar (Respondent C: Tuutti, 2026).

När det kommer till skillnader mellan fabriksbetong och injekteringsbetong nämns bekvämlighet med färdigblandat material som en viktig faktor på projektplatsen. Fabriksbetong kommer färdigblandad och måste gutas per omgående, medan torrbruk bidrar med flexibilitet, där blandning direkt på projektplatsen gör att gjutningen kan genomföras oberoende tidsbestämda cementtransporter. All utrustning och material kan då transporteras till projektplatsen och gjutning kan därefter ske närhelst det passar. Likheter för båda

metoderna är att slang och pump nyttjas, med exempelvis pumpbil på land (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

Hantering av ballast är ett kritiskt moment på projektplatsen, vilket kopplas till arbetsmiljön. Injekteringsbetong har dock fördelen att användningen av mer ballast leder till lägre värmeutveckling i betongen, vilket eliminerar många av de kylrelaterade aktiviteter, med exempelvis kylslangar, som är vanligt förekommande vid konventionella gjutningar (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

5.2.6 Alternativa konstruktionsmetoder

Sparsten ses som en potentiell konstruktionsmetod i exempelvis hamnar, där konstruktioner typiskt är grova, vilket kräver stora mängder betongmassa, och ej består av särskilt tät armering, vilket innebär att sparstenen ej skulle begränsas av armeringsdensitet. Rent krasst anses det ej finnas några egentliga hinder för användning av sparsten idag, däremot måste lämpliga stenar för respektive projekt säkerställas. Att stenen har en högre hållfasthet än själva cementet ses som en fördel, då god partikelkontakt mellan ballasten minskar sprickbildningen och en stark betong kan åstadkommas trots låg cementhalt (Respondent C: Tuutti, 2026).

Användning av injekteringsbetong beror till stora drag på vilka projektspecifika krav som ställs, men några omfattande begränsningar anses ej finnas. Injekteringsbetong har bland annat använts till kajkonstruktioner och tunnlar samt för att hårdseta mark för förvaring av maskinutrustning. Användning på avlägsna projektplatser, där logistikaktiviteter är komplicerade och tillgång till lokala ballastresurser finns, anses särskilt passande för konstruktionsmetoden (Respondent A: Åhl och Respondent B: Gustavsson, 2026).

Injekteringsbetong och sparsten tros kunna vara relevanta i vissa projekt, exempelvis för byggnation av ett stort antal vindkraftsfundament i en ny vindkraftspark. Där hade sparsten eller andra typer av sparkroppar kunnat minimera en mycket stor cementmängd, eftersom den totala volymen är mycket stor. Att nyttja injekteringsbetong eller sparsten för varje enskilt projekt ses dock ej. Skanska ser istället en större effekt av att nyttja alternativa bindemedel, än att öka ballastanvändningen, utöver den optimering som görs i betongrecepten (Respondent D: Hedman, 2026).

Hos Heidelberg Materials har sparsten förekommit då betongmassan ej räckt till, men är i övrigt inte en metod som nyttjas aktivt i någon större utsträckning. Vidare har de möjlighet att leverera cementbruk till injekteringsbetong, men är i övrigt inte mer insatta i själva gjutmetoden (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

5.2.7 Ekonomi

Samtliga respondenter tar i olika bemärkelse upp den ekonomiska infallsvinkeln, som beskrivs som ofrånkomlig.

Cementfabriker har stora kapitalkostnader, vilket kan antas innebära att det finns incitament för att sälja mycket cement (Respondent C: Tuutti, 2026). Heidelberg Materials, som också agerar cementleverantör, avfärdar dock att det skulle finnas något egenintresse att maximera

cementinnehållet och framhåller att det finns ett mycket stort fokus på klimatoptimering (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

I en cement sägs bindemedlet vara den dyraste komponenten (Respondent C: Tuutti, 2026). Samtidigt nämns att ett projekt måste vara av en viss storleksordning för att det ska finnas en fungerande ekonomi att använda större sten (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Både Skanska och Heidelberg Materials är av uppfattningen att ekonomi i slutändan är en avgörande faktor och att större ballast i betongen ej är aktuellt vid mindre projekt (Respondent D: Hedman, 2026; Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Alla aktiviteter som bidrar till ytterligare logistik eller energianvändning önskas typiskt undvikas i så stor utsträckning som möjligt i branschen, vilket i förlängningen är en ekonomisk fråga (Respondent C: Tuutti, 2026).

5.2.8 Teknikutveckling och framtid

Heidelberg Materials ser behovet av teknikutveckling och nya arbetsmetoder för att kunna maximera stenstorleken, då arbetsmiljö och klimatoptimering i många fall står i motsats till varandra idag. Gällande teknikutveckling ute på projektplatserna är respondenterna av uppfattningen att mycket av arbetsmiljöproblematiken byggs in i konstruktionsmetoderna. Det finns också press från upphandlingar avseende effektivitet och risk att fastna i gamla hjulspår med befintliga metoder (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Breda samarbeten inom branschen, över företagsgränser och med universitet, förväntas vara nödvändiga för att utveckla nya sammansättningar och standarder för framtidens betongbyggande (Respondent D: Hedman, 2026).

Både Skanska och Heidelberg Materials beskriver branschen som konservativ gällande användning av större ballaststorlek, om det ej finns tekniskt verifierade lösningar som ger tillräckligt med fog och motivering (Respondent D: Hedman, 2026; Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Det kan dock även röra sig om kunskapsbrist, eller att den lokala ballastförsörjningen inte kan tillhandahålla större stenstorlekar på ett praktiskt genomförbart och effektivt vis. Användning av större ballaststorlekar kopplas således till både resurser och erfarenhet, samt till hur stor aktören är (Respondent D: Hedman, 2026).

I framtiden tror Skanska att mer slimmade konstruktioner kommer att vara aktuella, vilket innebär att både betongmängd och kostnader väntas minska. I de fall där grova konstruktionsdelar ändå är nödvändigt, bör det användas så lite bindemedel som möjligt i dessa för att få upp volymen utan att nyttja stora mängder cement (Respondent D: Hedman, 2026). Även Heidelberg Materials tror att slankare konstruktioner kommer att vara mer förekommande. Dessa behöver dock ha en högre hållfasthet för att klara samma laster (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026). Tunna konstruktionsdelar ställer typiskt krav på en mindre stenstorlek, vilket blir en begränsande faktor för användning av större stenstorlekar (Respondent C: Tuutti, 2026). En slimmad konstruktion behöver förmodligen också mer stål, vilket slår mot klimatpåverkan även om cementåtgången blir mindre (Respondent E: Sandström och Respondent F: Aziz, 2026).

6. Diskussion

I detta avsnitt görs en kombinerad analys och diskussion med utgångspunkt i det resultat som presenterats och med förankring i litteraturstudien, i syfte att besvara studiens frågeställningar. Inledningsvis diskuteras potentialen som finns för att reducera klimatpåverkan i betong genom att använda mer och större ballast, följt av vilka förutsättningar som finns för att realisera denna potential. Avsnittet avslutas med förslag på framtida studier.

6.1 Reduktion av klimatpåverkan

Studiens resultat visar att användning av grövre och mer ballast har en stor påverkan på en betongs klimatpåverkan, där ballastens främsta klimatkfunktion är dess möjlighet att ersätta cement. Initial cementhalt visas dock också påverka vilken karbonatiseringspotential som betongkonstruktionen har under dess livslängd, vilket utifrån ett livscykelperspektiv kan innebära att konstruktionens karbonatisering kan anses premieras genom en högre initial cementhalt. De fall som undersökts i studien påvisar att det finns potential att uppnå betydande reduktion av klimatpåverkan genom att maximera $D_{\max}$ och att nyttja alternativa konstruktionsmetoder, med vissa förbehåll.

Som sågs i studiens kvantitativa resultat beror en stor del av fabriksbetongens klimatpåverkan av dess cementinnehåll, vilket är i linje med framkommen information i bakgrund samt intervjuer. Vidare sågs att den maximala ballaststorleken som används i betongblandningen har stor inverkan på cementinnehållet och att större ballaststorlekar reducerar cementhalten per m^3 betong, vilket leder till ett lägre processutsläpp. Med större ballaststorlek i betongblandningen i fabriksbetong fås därmed principiellt en lägre cementhalt, som svarar mot en lägre klimatpåverkan. En maximal reduktion av GWP motsvarande 1542 kg CO_2e kunde ses genom att enbart byta ut $D_{\max}$ 16 mm till $D_{\max}$ 64 mm i fabriksbetongen, vilket sågs i Figur 17. Det reducerade cementbehovet genom att öka $D_{\max}$ är därför av betydande karaktär för fabriksbetongen för att reducera dess klimatpåverkan, då den absoluta majoriteten av utsläppen som relateras till betong härleds till cementproduktionen.

Ökad användning av större sten, som påtalades vara billigare och av bättre hållfasthet än cement av studiens respondenter, skulle kunna leda till både lägre klimatpåverkan och minskade kostnader. Aktiviteter kopplat till transport och övrig hantering av materialet kan dock antas ske på samma sätt och med oförändrad volym. Detta medför att någon reducerande effekt i övriga skeden ej anses möjlig, då volymen fortsatt är densamma och gjutningen utförs med samma utsläppsintensitet, varav ingen minskning ses i transport- eller bygg- och installationsskede. Ballast är förvisso tungt, men är i klimathänsyn betydligt mindre belastande i förhållande till cement.

Användningen av mer ballast leder inte per automatik till en lägre klimatpåverkan, som sågs i scenariot med injekteringsbetong. Det undersökta torrbruket för injekteringsbetong är i dagens utformning ej helt jämförbart med den undersökta fabriksbetongen, då det ej nyttjar något alternativt bindemedel. Däremot ses en betydlig reduktion i klimatpåverkan då den nuvarande cementtypen byts ut mot en cementtyp som innehåller alternativa bindemedel. Vid

användning av injekteringsbruk med alternativa bindemedel ses en reduktion utifrån Figur 17 på 2265 kg CO₂e i jämförelse med referensfallet med fabriksbetong D_{max} 16 mm.

Med en omvärldsbevakning ses att injekteringsbetong används med framgång i bland annat Kina, med RFC som kombineras med HSCC. Där har alternativa bindemedel i kombination med stora ballastmängder visat sig vara ett lyckat koncept för grova dammkonstruktioner, vilket också kan tänkas influera framtida byggande av grova betongkonstruktioner i Sverige. Under studiens gång har det framkommit att denna metod undersöks för implementering i de nordiska länderna.

De stora reduktioner av klimatpåverkan som observerats i studier från de kinesiska dammkonstruktionerna visar att materialval kan vara en klimatåtgärd, liksom fylla en funktion som konstruktion. Trots att erfarenheten i Sverige av injekteringsbetong är något begränsad, ses ett ökat intresse som lovande för att tillgängliga injekteringsbruk på den svenska marknaden ska utvecklas. Det återfinns också material som säger att injekteringsbetong med alternativa bindemedel redan förekommit i Sverige.

Med fortsatt användning av CEM I i injekteringsbetong med torrbruk kan en reduktion av klimatpåverkan endast åstadkommas genom reducerade transportrelaterade aktiviteter och arbetsmoment. Detta genom en mindre mängd produkt som måste transporteras till projektplatsen i jämförelse med fabriksbetong, samt genom användning av lokala ballastresurser som ej måste forslas bort. Ett intressant användningsområde för injekteringsbetongen, jämfört med fabriksbetong, är därför projektplatser där stor mängd ballast annars hade behövt hanteras. Förutom arbetsmoment kopplade till hanteringen av materialet med arbetsmaskiner på plats, hade också transportaktiviteter kopplat till bortforsling av material kunnat minska. För en mycket otillgänglig projektplats, med långa leveransavstånd, hade detta kunnat innebära en betydlig total minskning, i jämförelse med referensfallet där fabriksbetong nyttjas. Studiens känslighetsanalys, som ses i Figur 19 samt 20, indikerar att användning av injekteringsbetong är lovande för användning då transportavstånden är längre, särskilt då CEM I byts mot CEM II.

När grövre ballast i fabriksbetongen kombineras med ytterligare ballastanvändning i form av sparsten på projektplatsen, nås ytterligare en reduktion av GWP. En maximal reduktion om 2526 kg CO₂e ses i Figur 17, då fabriksbetong D_{max} 16 mm byts mot en sparstensbetong innehållande 20% sparsten och resterande fabriksbetong med D_{max} 32 mm. Detta uppstår genom att mängden fabriksbetong som behövs i betongkonstruktionen reduceras, vilket innebär ett lägre processutsläpp och färre tunga transporter. Sett utifrån ett livscykelperspektiv kan sparsten därför bidra både till reducerad cementproduktion och färre tunga transporter, baserat på att lämpligt ballastmaterial redan finns på projektplatsen. Detta innebär att användningen av sparsten blir mycket projektspecifik, då klimatpåverkan av att behöva transportera sparstensmaterial till projektplatsen kan anses motverka syftet med minimerad logistik och klimatpåverkan. Utifrån framkommen information i litteraturstudien finns intresse för att inspireras av användandet av sparsten, som föregångare till dagens injekteringsbetong. I kontrast till den gamla tidens sparstensanvändning, finns idag också tillgång till tillsatsmedel och tekniker som möjliggör bättre kringgjutning.

Reduktionen kopplat till transport av 30, 27, 24 respektive 12 m³ betongmaterial visar att den logistiska verksamheten är av betydande karaktär och att en minskning av tunga transporter är av stor relevans för att minimera en betongkonstruktions klimatpåverkan, vilket ses i Figur 19 samt 20. Val av konstruktionsmetod utifrån transportavstånd till projektplatsen och tillgång till lokal ballast kan därför vara av stor vikt för att uppnå största möjliga reduktion av klimatpåverkan. Även olika logistikupplägg för olika material och projektplatsens geografiska placering påverkar vilken klimatpåverkan ett material i slutändan får, vilket bör tas i beaktning vid jämförelse mellan alternativ.

Genom användning av sparsten och injekteringsbetong förväntas även mängden armering kunna minska. Armeringen ses utifrån resultatet utgöra ungefär 7–9% av konstruktionens totala GWP, baserat på fallen med högst respektive lägst resulterande GWP. Medan någon variation av armering ej gjordes i denna studie, kan en potentiell minimering av armeringen antas vara en önskvärd bieffekt, både logistiskt, ekonomiskt och klimatomfattigt. Hållfasthetskrav kommer dock kvarstå, varav påverkan på hållfasthet genom mindre armering men desto mer ballast måste undersökas.

Ett ökat $D_{\max}$ i fabriksbetong och användning av lokal ballast adresserar betongens mest klimatbelastande komponent; cementet. Användning av mer ballastmaterial på projektplatsen innebär i förlängningen att en bättre resurshushållning kan åstadkommas, genom en lägre efterfrågan på betong. Detta är i linje med de krav som ställs på bygg- och anläggningssektorn i de färdplaner som studerats. Med anledning av slopade CCS-åtgärder kan alternativa sätt att minimera processutsläppen och resursanvändningen tros vara intressanta framåt, även om behovet av CCS-åtgärder kvarstår med samma styrka för att åstadkomma en klimatneutral betong.

I studien gjordes ingen distinktion med avseende på konstruktionens två olika konstruktionsdelar innehållande betong; kajdäck respektive krönbalk. Att betongdelen förenklades till en och samma betongtyp utifrån högst ställda krav, var till följd av begränsad tillgång av lämpliga produkter i One Click LCA. I förlängningen innebär detta att studiens livscykelanalys kan antas ha överskattat den klimatpåverkan betongdelen har för konstruktionens totala GWP med avseende på fabriksbetongen. Att variabla krav mellan konstruktionsdelar, baserat på funktion och exponering, efterföljs, är givetvis att föredra utifrån ett klimatperspektiv. Förmodligen är det samma problem som uppstår vid byggprojekt, där det strängaste kravet blir styrande.

Sett till studiens datakvalitet användes delvis generiska data, trots ambition att undvikas. Då generiska dataset typiskt baseras på konservativa värden kan användning av dessa innebära att resulterande GWP blivit högre än om en specifik EPD använts. Vissa förenklingar av livscykelanalysen kan också innebära att inventeringen var ofullständig och inte reflekterat verkligheten. Syftet med livscykelanalysen är dock att synliggöra vilken klimatpåverkan material, metoder och processer har i övergripande drag, för att kunna utvärdera dem i förhållande till varandra, vilket representerar en trolig storleksordning.

6.2 Förutsättningar för grövre ballast och alternativa konstruktionsmetoder

Maximering av $D_{\max}$ och användning av mer ballast visar sig vara en komplex fråga som påverkas av flertalet faktorer, vilket framgick både i studiens bakgrund liksom resultat. Respondenterna lyfte flera fördelar med användning av mer och grövre ballast, mer än att klimatpåverkan reduceras i betongen. Att en lägre cementshalt leder till flera produktionstekniska fördelar är återkommande både hos respondenterna samt i den undersökta litteraturen. Att värmeutvecklingen minskar är en önskvärd effekt som åstadkoms med en lägre cementshalt, vilket både minskar risken för sprickbildning, samtidigt som det minimerar kylaktiviteter vid gjutning. Även volymförändringar i form av krympning av betongen minskar. Att maximera $D_{\max}$ är således också en fråga om produktionsteknik, där en betong av bättre kvalitet kan åstadkommas. Detta är en eftersträvarvärd egenskap som talar för användning av grövre ballast.

Geografiska begränsningar kopplade till bergart och tillgängliga ballastfraktioner hos lokala betongleverantörer fungerar som grundläggande förutsättningar för att ökat $D_{\max}$ ska vara möjligt i fabriksbetongen. Dagens användning av krossmaterial innebär att tillgången till stor ballast av bra kvalitet inte är säkerställd på lokal nivå. Här kan potentiellt återbrukad betong från rivning fungera som ett komplement, vilket främjar cirkularitet och minimerar att rivningsmassor går till deponi.

Medan aktörer i branschen förordar användning av större ballast och styr sina kunder mot större $D_{\max}$ genom sin prissättning, visar trenden att självkompakterande betong tagit upp en betydligt större del av efterfrågan, vilket gör att stenstorleken i stället reduceras. Från betongleverantörernas håll beror detta på vilka krav som ställs i handlingar, vilket i sin tur förhåller sig till standarder. Standarder kan således både hjälpa och stjälpa, genom att skapa låsningar både för alternativ hos konstruktören och i förlängningen vilket utrymme betongleverantören har att använda större ballaststorlekar. Dagens standarder utgår från fabriksbetong och kan antas behöva kompletteras för att alternativa konstruktionsmetoder ska ges plats.

Från att vibrerad betong varit standardiserat, till att självkompakterande betong tagit en allt större marknadsandel, kan sägas att arbetsmiljön fått en allt större plats i dagens betongbyggande. Detta är en god utveckling för betongarbetarna, samtidigt som det lyfts att arbetsmiljöproblematiken byggs in i konstruktionsmetoderna. Detta kan innebära en stagnation för teknikutvecklingen. Om en vibrerad betong kan uppvisa högre kvalitet som färdig produkt, vilket antyds utifrån intervjumaterialet, medan en självkompakterande betong gjuts mer effektivt, blir det i slutändan en fråga om att kortsiktighet premieras över långsiktighet när SKB väljs. Teknikutveckling behövs för att brygga denna diskrepans.

Armeringsdensiteten i dagens betongkonstruktioner är en begränsande faktor för studiens samtliga undersökta fall. Att vissa konstruktioner benämns som överarmerade kan förmodat härledas till dagens högt ställda krav på hållfasthet, och tillgängliga standarder. Som nämns måste alla konstruktionsmetoder förhålla sig till hur tät armeringen är. Som tidigare nämnts

finns dock potential för att armeringen kan minskas genom användning av till exempel injekteringsbetong. Detta är något som måste undersökas närmare för att kunna bekräftas.

Dagens betongpumpning framstår som en konkret praktisk begränsning av vilken $D_{\max}$ som är möjlig. Risken för olyckor vid pumpstopp är en reell fara som förvärras av användning av grövre $D_{\max}$, men ställer snarare krav på att ny utrustning, arbetsmaskin och metoder utvecklas, än att vara en omöjlighet att åtgärda. För pumpning med slang finns i dagsläget en utbredd begränsning på $D_{\max}$ 32 mm, vilket innebär att de resultat som ses för $D_{\max}$ 64 mm kan antas vara ouppnåeliga utifrån dagens tillgängliga arbetsmaskiner- och metoder. För $D_{\max}$ 32 mm finns det däremot tillgängliga metoder, varav frågan väcks om vilken teknikutveckling som skulle krävas för att detta i högre utsträckning skulle användas, för att säkerställa arbetsmiljön ute på projektplatsen.

Tillgången på erfarenhet och kunskap om sparsten baseras på begränsade studier av gamla konstruktioner där metoden nyttjats, vilket innebär att någon aktuell information ej finns om användning av sparsten i nutid. Resultatet för sparsten indikerar att den gamla metoden kan komma att få ny relevans för att bemöta vår tids största kris, men är samtidigt av mycket spekulativ karaktär då någon nutida användning av metoden inte finns. Dagens standarder innehåller inga anvisningar om metoden, däremot återfinns desto mer material från förr. Att vissa sparstenskonstruktioner stått i 100 år, med fortsatt god funktion, påvisar att metoden kan vara en hållbar konstruktionslösning, men att ytterligare efterforskningar och inte minst omfattande testning krävs för att återintroducera metoden. Det gamla måttet en mansbördas storlek som beskrivning av maximal sparstensstorlek kan då förmodas bytas ut mot mer standardiserade mått. Vid sparstensgjutning uppkommer frågan om hur hanteringen av större ballast ska gå till rent praktiskt. För att det ska vara genomförbart krävs hög säkerhet vid lyft av större stenar, och då förmodligen med arbetsmaskiner.

De applikationsområden som nämns både för sparsten och injekteringsbetong är för grova betongkonstruktioner, projekt där många fundament förekommer och projektplatser där befintlig ballast eller schaktmassa finns tillgänglig. Trots en tro om att konstruktioner kommer att bli mer slimmade, finns alltså en uppfattning om att dessa konstruktionsmetoder kan fylla en funktion för grova betongkonstruktioner, som kommer att vara fortsatt förekommande. Det finns begränsade incitament att använda sparsten och injekteringsbetong som en generell konstruktionsmetod, men när projektet tillåter är det av relevans. Bevarad hållfasthet, beständighet och livslängd spelar stor roll för att överhuvudtaget överväga en sådan alternativ konstruktionsmetod. Livslängden hos konstruktioner där mer och grövre ballast används måste säkerställas, för att klimatvinster inte skall gå förlorade genom exempelvis ökat behov av underhåll eller reparationer.

Dagens betongproduktion optimeras utifrån effektiv produktion, med standardiserade arbetsmoment och med fokus på pumpbarhet. Att sparstensmetoden skulle ha en lägre produktionshastighet i jämförelse med en betong utan sparsten går att anta, då sparstenen måste placeras mellan gjutningar, vilket kan ses som en nackdel för effektiviteten. För att åstadkomma ytterligare klimatfördelar måste dock ytterligare plats ges för optimering med

avseende på att maximera användning av lokala ballastresurser och minskad cementanvändning.

Medan en livscykelkostnadsanalys ej genomförts i studien är ekonomin i ett projekt en mycket viktig faktor, som nämndes av studiens respondenter. Resurseffektivitet och minimerad logistik är två viktiga aspekter avseende dagens byggande. Detta genomsyrar utvecklingen av bland annat ballastfraktioner, energianvändning och logistikfrågor. Ekonomi är ofrånkomligt, och hållbarhetsaspekter med reducerad klimatpåverkan kan antas ständigt vara beroende av att ekonomin också kan säkerställas. Att satsa på reducerad klimatpåverkan måste vara lönsamt.

6.3 Framtida studier

För framtida studier hade en livscykelkostnadsanalys (LCC) av studiens fall varit intressant, för att även få en ekonomisk dimension av ämnet. Då sparstensmetoden är av något spekulativ natur, främst med avseende på gjutmetod, finns dock en rad osäkerheter och antaganden hade förmodat behövt ligga till grund för en sådan studie, då bygg- och installationsskede undersöks. Ett återkommande tema under studiens gång är vilken teknikutveckling som är nödvändig för att kunna återintroducera sparsten som konstruktionsmetod i Sverige. En översikt över vilken användning och anpassning av befintliga maskiner, eller eventuell utveckling av nya arbetsmaskiner, som krävs för att kunna använda metoden är av relevans för att kunna säkerställa att gjutmetoden är säker ur ett arbetsmiljöperspektiv.

Ett kompletterande perspektiv för fortsatt undersökning av sparsten och injekteringsbetong som konstruktionsmetoder, är hur metoden Rock-Filled Concrete (RFC) skulle kunna implementeras vid byggnation av grova betongkonstruktioner i Sverige. Förvisso används RFC för dammkonstruktioner, men kan tänkas influera betongbyggande i Sverige även på andra håll. Vidare kan armeringsdensitet vara en intressant infallsvinkel att studera, i syfte att maximera $D_{\max}$. Via detta perspektiv kan också minimering av armering genom exempelvis injekteringsbetong undersökas.

7. Slutsats

Syftet med detta examensarbete var att undersöka hur en grov betongkonstruktions klimatpåverkan kan reduceras genom användning av mer och grövre ballast. Vidare syftade studien till att studera vilka förutsättningar aktörer i branschen har för att realisera detta. Studiens resultat visar att en betongkonstruktions klimatpåverkan kan reduceras betydande, men att potentialen beror av konstruktionsmetod, projektspecifika förutsättningar och vilken cementtyp som används i betongen.

För fabriksbetong visar studien att en fördubbling av den maximala ballaststorleken, $D_{\max}$, från referensfallet 16 mm till 32 mm resulterar i en minskning om upp till 8% av betongens klimatpåverkan. Vid ytterligare en fördubbling, till $D_{\max}$ 64 mm, reduceras klimatpåverkan med upp till 16%. Att klimatpåverkan minskar för grövre ballast härleds till att den specifika yta som cementpastan måste täcka minskar, i jämförelse med finare ballast. En lägre cementhalt per m^3 kan då åstadkommas, vilket adresserar betongens främsta klimatpåverkan; cementtillverkningen. Med injekteringsbetong ses en potentiell reduktion av klimatpåverkan på 23,6%, i jämförelse med referensfallet. Detta resultat är dock baserat på att cementtypen i injekteringsbruket kan bytas från CEM I till CEM II, då en ökad klimatpåverkan om 11,8% observeras för ett injekteringsbruk som ej nyttjar något alternativt bindemedel.

Injekteringsbetong visar sig vara gynnsam ur ett transportperspektiv, genom färre tunga transporter till följd av att en mindre mängd material behöver levereras till projektplatsen om lokal ballast kan nyttjas. Studiens känslighetsanalys indikerar vidare att injekteringsbetongen har en lägre klimatbelastning vid längre transportavstånd i jämförelse med fabriksbetongen. Betong med sparsten visar att en klimatreduktion om 26,4% är möjlig i jämförelse med referensfallet, då 20% av betongvolymen ersätts av lokal ballast. Detta är det fall som uppvisar störst potential för klimatreduktion i studiens undersökning, genom en lägre total cementanvändning och minskade transportaktiviteter genom en lägre betongvolym. Konstruktionsmetoden saknar dock nutida kontext, då det saknas aktuell erfarenhet och standarder för att använda sig av sparsten.

Förutsättningarna för att nyttja grövre ballast och alternativa konstruktionsmetoder påverkas av flertalet faktorer. Geografiska förutsättningar påverkar vilka ballaststorlekar som finns att tillgå från lokala täkter och vilka ballastfraktioner som finns hos betongfabrikerna. Vidare lyfts armeringsdensitet som ett praktiskt hinder för ökad $D_{\max}$ i dagens konstruktioner, likaså är betongens pumpbarhet en avgörande och begränsande faktor. Den utveckling som ses mot självkompakterande betong främjar arbetsmiljön men motverkar användning av grövre ballast, till nackdel för klimatet. Medan branschen beskrivs som konservativ avseende teknikförändring, efterfrågar aktörer inom branschen breda samarbeten och utveckling av nya standarder för att möjliggöra anpassningar för framtiden.

Sammantaget görs slutsatsen att en ökad maximering av ballaststorlek och ballastanvändning, både i fabriksbetong samt genom alternativa konstruktionsmetoder, är relevanta åtgärder för att reducera klimatpåverkan från grova betongkonstruktioner, specifikt då projektspecifika krav möjliggör det. Däremot krävs ytterligare forskning på området, då ett bredare genomslag för användning av mer och grövre ballast kommer att kräva teknikutveckling och nya standarder.

Referenser

- Betongindustri Heidelberg Cement Group (u.å.). Fabriksbetong.
https://www.betong.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/assets/document/48/6f/50._bi-fabriksbetong.pdf [Hämtad: 2026-04-12].
- Boverket (2018). *Vad visar en LCA?* Boverket. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/vad-visar-en-lca/> [Hämtad: 2026-05-17].
- Boverket (2021). *Efterfrågan på cement och möjliga climateffekter av ökad import*. Karlskrona: Boverket. No. 2022:11.
- Boverket (2024a). *Mer om miljövarudeklaration för byggprodukter (EPD)*. Boverket. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/miljodata-och-lca-verktyg/miljovardeklaration-for-byggprodukter-epd/> [Hämtad: 2026-04-18].
- Boverket (2024b). *Metodval för LCA*. Boverket. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/sahar-gors-en-lca/metodval-for-lca/> [Hämtad: 2026-01-28].
- Bäckman, Anders (2022). Cementtyper SS-EN 197-1:2011 Sammansättning och fordringar för ordinära cement. <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/2022-05/Cementtyper%20och%20applikationer%20Anders%20B%C3%A4ckman.pdf> [Hämtad: 2026-02-17].
- Erlandsson, Martin (2013). Generell byggproduktinformation (BPI) för bygg- och fastighetssektorn - Miljödata för arbetsfordon. <https://ivl.diva-portal.org/smash/get/diva2:1549896/FULLTEXT02.pdf>.
- Fagerlund, Göran (2012). Nytt cement med gynnsam miljöprofil. *Bygg & teknik*, s. 28–32.
- Fossilfritt Sverige (2018). Färdplan för fossilfri konkurrenskraft - Bygg- och anläggningssektorn. https://fossilfrittssverige.se/wp-content/uploads/2020/10/ffs_bygg_anlaggningssektorn.pdf [Hämtad: 2026-01-28].
- Fossilfritt Sverige (2023a). Färdplan för klimatneutral konkurrenskraft - Betongbranschen. <https://fossilfrittssverige.se/wp-content/uploads/2023/10/Fardplan-for-klimatneutral-konkurrenskraft-Betongbranschen-Uppgraderad-2023.pdf> [Hämtad: 2026-02-13].
- Fossilfritt Sverige (2023b). Färdplan för konkurrenskraft och nettonollutsläpp - Cementbranschen. https://fossilfrittssverige.se/wp-content/uploads/2023/10/Cement_fardplan_uppgraderad_2023.pdf [Hämtad: 2026-02-13].
- Fossilfritt Sverige (u.å.a). Cementbranschen. <https://fossilfrittssverige.se/roadmap/cementbranschen/> [Hämtad: 2026-02-10].
- Fossilfritt Sverige (u.å.b). Betongbranschen. <https://fossilfrittssverige.se/roadmap/betongbranschen/> [Hämtad: 2026-02-10].

- Hassanzadeh, Manouchehr, Appelquist, Karin och Fredrich, Birgit (2025). *Metoder för att reducera cementåtgång vid dammbyggnad*. Energiforsk. No. 2025:1143.
- Heidelberg Materials (2025). *CCS-satsningen vid cementfabriken i Slite pausas | Heidelberg Materials Cement Sverige*. CCS-satsningen vid cementfabriken i Slite pausas. <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/ccs-satsningen-vid-cementfabriken-i-slite-pausas> [Hämtad: 2026-03-30].
- Heidelberg Materials (2026). Prislista Stockholm 2026. https://www.ballast.heidelbergmaterials.se/system/files/2026-01/Prislista_Ballast_Stockholm_2026%2025-12-19.pdf [Hämtad: 2026-05-04].
- Heidelberg Materials (u.å.a). *Utan cement stannar Sverige | Slite CCS*. <https://www.sliteccs.se/sv/utan-cement-stannar-sverige> [Hämtad: 2026-03-30].
- Heidelberg Materials (u.å.b). *Räkna med karbonatisering – en permanent koldioxidlagring | Heidelberg Materials Cement Sverige*. <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/rakna-med-karbonatisering-en-permanent-koldioxidlagring> [Hämtad: 2026-03-09].
- Heidelberg Materials Cement Sverige AB (2025). CEM II/A-V 42.5 N Anläggningscement FA Slite. https://www.cement.heidelbergmaterials.se/system/files/2025-06/NEPD-11487-11381_CEM-II-A-V-42.5-N-Anl--ggningscement-FA-Slite.2025-06-23.pdf.
- ICOLD (2020). *Cemented Material Dam: Design and Practice - Rock-Filled Concrete Dam*.
- Jin, Feng, Huang, Duruo, Lino, Michel och Zhou, Hu (2024). A Brief Review of Rock-Filled Concrete Dams and Prospects for Next-Generation Concrete Dam Construction Technology. *Engineering*, 32(1), s. 109, doi:10.1016/j.eng.2023.09.020.
- Klimatguiden (u.å.). *Beräkning – KLIMATGUIDEN*. <https://klimatguiden.betongforeningen.se/faktablock/berakning/> [Hämtad: 2026-04-06].
- Kosmatka, Steven, Kerkhoff, Beatrix och Panarese, William (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*.
- KTH (2021). *Byggande i betong*. KTH. <https://www.byv.kth.se/avd/betong/byggande-i-betong-1.25040> [Hämtad: 2026-03-05].
- Lindvall, Anders (2012). *Injekteringsbetong*. SBUF ID: 12550.
- Lindvall, Anders, Löfgren, Ingemar och Esping, Oskar (2015). Val av exponeringsklasser – miljöer och exponeringsförhållanden där särskild utredning erfordras. *Bygg & teknik*, 2015-10-19. <https://byggteknikforlaget.se/val-av-exponeringsklasser-miljoer-och-exponeringsforhallanden-dar-sarskild-utredning-erfordras/> [Hämtad: 2026-04-19].
- Lu, H., Jin, F., Konow, T., Midboe, F., Trætteberg, G. och Egeland, O. M. (2026). Prospect of RFC (Rock-filled Concrete) dam in Nordic countries. Presenterad vid Symposium "Water, Energy and Society: The Evolving Role of Dams in a Changing World" - 94th ICOLD Annual Meeting 23-29 maj 2026, Guadalajara, Mexico.

- Lujabetong (u.å.). Betong VCT - Förhållandet mellan vatten och cement. *Lujabetong*.
<https://lujabetong.se/betong-vct/> [Hämtad: 2026-03-31].
- Naturskyddsföreningen (2022). *Cement, klimat och miljö*. Naturskyddsföreningen.
<https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/> [Hämtad: 2026-02-17].
- NTM (u.å.a). 1.1 Cargo calculations. *Network for Transport Measures*, u.å.a.
<https://www.transportmeasures.org/en/wiki/manuals/all-modes/1-2-calculations/>
 [Hämtad: 2026-05-15].
- NTM (u.å.b). 5.3 Vehicle type characteristics and default load factors. *Network for Transport Measures*, u.å.b. <https://www.transportmeasures.org/en/wiki/manuals/road/vehicle-types-and-characteristics/> [Hämtad: 2026-05-17].
- NTM (u.å.c). Sea cargo transport baselines. *Network for Transport Measures*, u.å.c.
<https://www.transportmeasures.org/en/wiki/evaluation-transport-suppliers/sea-cargo-transport-baselines/> [Hämtad: 2026-05-17].
- Olanrewaju, Oludolapo Ibrahim, Edwards, David John och Chileshe, Nicholas (2020). Estimating on-site emissions during ready mixed concrete (RMC) delivery: A methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 13, s. e00439, doi:10.1016/j.cscm.2020.e00439.
- One Click LCA (2025a). *Life Cycle Stages | One Click LCA*.
<https://help.oneclicklca.com/en/articles/275901-life-cycle-stages> [Hämtad: 2026-05-17].
- One Click LCA (2025b). *How we work with data*.
<https://oneclicklca.com/en/resources/articles/how-we-work-with-data> [Hämtad: 2026-04-07].
- One Click LCA (u.å.). *Level(s) Carbon or Life Cycle Assessment | One Click LCA*.
<https://help.oneclicklca.com/en/articles/275718-level-s-carbon-or-life-cycle-assessment> [Hämtad: 2026-04-11].
- Paulsson-Tralla, Jonatan och Ekman, Tom (2008). Injekteringsbetong kan bli ett miljövänligt alternativ. *Husbyggaren nr 2*, s. 70–78.
- Respondent A: Åhl, Lena och Respondent B: Gustavsson, Rikard (2026). Intervju - Weber Saint-Gobain (2026-02-26).
- Respondent C: Tuutti, Kyösti (2026). Intervju - Zander & Company AB (2026-04-17).
- Respondent D: Hedman, Johan (2026). Intervju - Skanska Industrial Solutions (2026-04-24).
- Respondent E: Sandström, Ulf och Respondent F: Aziz, Simon (2026). Intervju - Heidelberg Materials (2026-04-27).
- Rosenqvist, Martin (2018). *Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*. Energiforsk. No. 2018:481.

- Scrivener, Karen L., John, Vanderley M. och Gartner, Ellis M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, s. 2–26, doi:10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- Statens betongkommitté (1965). *Bestämmelser för betongkonstruktioner - Material och utförande - Betong*. B5. uppl. Stockholm: Statens betongkommitté.
- Statens provningsanstalt (1934). *Meddelande 34. 1. Statliga normalbestämmelser av år 1934 för material till betong och armerad betong. 2. Arbetsförfarande vid provning av betongmaterial och betong*. 2. uppl. Stockholm.
- Strand, Martin J., Westberg Wilde, Marie, Rosenqvist, Martin och Janz, Mårten (2020). *Betong för vattenkraftsbyggnad*. Stockholm: Energiforsk. No. 2020:653.
- Svensk betong (u.å.). *Val av betongkvalitet och exponeringsklass*. <https://www.svenskbetong.se/om-betong/platsgjutet/statik/kontorshus/bjalklag/val-av-betongkvalitet-och-exponeringsklass> [Hämtad: 2026-03-05].
- Svenska institutet för standarder (2006a). *SS-EN ISO 14044:2006 Miljöledning - Livscykelanalys - Krav och Vägledning*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2006b). *SS-EN ISO 14040:2006 Miljöledning - Livscykelanalys - Principer och struktur*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2008). *SS-EN 12620+A1:2008 Ballast för betong*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2010). *SS-EN 14025:2010 Miljömärkning och miljödeklarationer - Typ III miljödeklarationer - Principer och procedurer*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2013). *SS-EN 197-1:2011 Cement - Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2023). *SS-EN 1992-1-1:2023 Eurokod 2 - Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, broar och anläggningskonstruktioner*. SIS.
- Svenska institutet för standarder (2025). *SS 137003:2021+T2:2025 Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (2026). *SS-EN 206-1:2026 Betong - Specifikation, prestanda, tillverkning och överensstämmelse - Del 1: Prestanda, krav, fabrikproduktionskontroll och bedömningskriterier för individuella värden*. Stockholm: SIS.
- Svenska institutet för standarder (u.å.a). *ISO – internationella standardiseringsorganisationen*. Svenska institutet för standarder, SIS. <https://www.sis.se/delta-och-paverka/internationell-standardisering/iso/> [Hämtad: 2026-02-10].

- Svenska institutet för standarder (u.å.b). *Om oss*. Svenska institutet för standarder, SIS. <https://www.sis.se/om-sis/> [Hämtad: 2026-02-10].
- Svenska institutet för standarder (u.å.c). *Vad är en standard?* Svenska institutet för standarder, SIS. <https://www.sis.se/standarder/vad-ar-en-standard/> [Hämtad: 2026-02-10].
- Svenska institutet för standarder (u.å.d). *Standarder inom bygg*. Svenska institutet för standarder, SIS. <https://www.sis.se/konstruktionochtillverkning/bygg/> [Hämtad: 2026-02-10].
- Svenskt Näringsliv (u.å.). *Cementindustrin*. Svenskt Näringsliv. https://www.svensktnaringsliv.se/ageranu_gamla-3587tyyv8n/cementindustrin_1196084.html [Hämtad: 2026-03-04].
- Sveriges geologiska undersökning (2023). *Cement och betong*. <https://www.sgu.se/mineralnaring/industrimineral/cement-och-betong/> [Hämtad: 2026-03-04].
- Swedish Association for Concrete Admixtures (u.å.a). *Tillsatsmedel*. SACA. <https://saca.se/tillsatsmedel/index.html> [Hämtad: 2026-03-19].
- Swedish Association for Concrete Admixtures (u.å.b). *Tillsatsmedel för betong*. <https://swe.sika.com/dms/getdocument.get/cce2b785-5f98-350d-a475-84960bfbbb99/Tillsatsmedel%20f%C3%B6r%20betong.pdf> [Hämtad: 2026-03-07].
- Thomas Betong (2024). Välj rätt betong. https://thomasbetong.se/wp-content/uploads/sites/6/2024/04/Valj-ratt-betong_2024.pdf [Hämtad: 2026-03-12].
- Thomas Betong (u.å.). Storlek på slang för betongpumpning. https://thomasbetong.se/wp-content/uploads/sites/6/2024/04/Thomas-Betong_Storlek-pa-slang-for-betongpumpning.pdf [Hämtad: 2026-04-19].
- Trafikverket (u.å.). *Start - Klimatkalkyl*. Klimatkalkyl. <https://klimatkalkyl.trafikverket.se/> [Hämtad: 2026-05-16].
- Vemaventuri (u.å.). *Utmaningar för massiva betongkomponenter*. <https://sv.vemaventuri.io/challenges-in-massive-concrete-components> [Hämtad: 2026-04-02].
- Weber Saint-Gobain (2024). weber prepakt injekt. https://www.se.weber/files/se/2021-10/PDS-SE-weber_prepakt_injekt.pdf [Hämtad: 2026-02-27].
- Xu, Weichi, Zhou, Yuande, Guo, Yutai och Jin, Feng (2025). Mesoscopic representation of conventional concrete and rock-filled concrete: A novel FEM-SBFEM coupled approach. *Computers and Geotechnics*, 177, s. 106820, doi:10.1016/j.compgeo.2024.106820.
- Åhl, Lena och Gustavsson, Rikard (2025). *Injekteringsgjutning: Med lokal eller återvunnen ballast – Prepakt Injekt*. Saint-Gobain Sweden. <https://www.saint-gobain.se/webinarier/injekteringsgjutning-med-lokal-eller-atervunnen-ballast-prepakt-injekt> [Hämtad: 2026-03-04].

Appendix A: Mängdberäkning

Material	Specifikationer och antaganden	Mängdberäkning
Grus	30 m³ grus $\rho_{\text{grus}} = 1600 \text{ kg/m}^3$	$m_{\text{grus}} = \rho_{\text{grus}} \times V_{\text{grus}} = 1600 \text{ kg/m}^3 \times 30 \text{ m}^3 = 48\,000 \text{ kg}$
Pålar	- Ytterdiameter 140 mm, $R = 0,07 \text{ m}$ - Godstjocklek 10 mm, innerradie $r = 0,06$ - Längd 72 m - Antagande: påle = homogen cylinder	<i>Stål</i> $V_{\text{stål i påle}} = \pi(R^2 - r^2) \times L = 0,294 \text{ m}^3$ $m_{\text{stål i påle}} = \rho_{\text{stål}} \times V_{\text{stål i påle}} = 7850 \text{ kg/m}^3 \times 0,294 \text{ m}^3 = 2300 \text{ kg}$ <i>Betong</i> $V_{\text{betong i påle}} = \pi r^2 \times L = 0,814 \text{ m}^3$
Virke	- Regel 45×95, 250 m - Regel 45×145 C24, 100 m - Regel 45×195 C24, 110 m - Råspont 23×120, 80 m - Antagande: hållfasthetsklass C24, fukthalt 12%	$m_{\text{virke}} = \rho_{\text{C24}} \times V_{\text{virke}} = 420 \text{ kg/m}^3 \times 2,91 \text{ m}^3 = 1222,2 \text{ kg}$
Form	- Formplywood 600×2500, 45 st - Antagande: tjocklek 12 mm - Tillgänglig materialtyp i One Click hade tjocklek 20 mm, varav A_{plywood} skalades proportionellt för att uppnå samma volym	$A_{\text{plywood}} = 0,06 \times 2,5 \times 45 \text{ st} = 67,5 \text{ m}^2$ $V_{\text{plywood}} = 67,5 \text{ m}^2 \times 0,012 = 0,81 \text{ m}^3$ $A_{\text{plywood, One Click LCA}} = 40,5 \text{ m}^2$
Injekteringsbruk: proportionering	Förhållanden togs från produktens produktdatablad samt i mailkontakt med Rikard Gustavsson, Weber. Beräkningen utgick från materialåtgång för 30 m³ färdig betong. 20 kg torrprodukt (standardprodukt) = ca 10 L färdig massa 1 m³ (1000 L) injekteringsbruk kräver 1000 L/10 L = 100 satser 100 satser $\times$ 20 kg = 2000 kg torrprodukt per m³ injekteringsbruk - Med 60% ballast i betongmatrisen, är resterande injekteringsbruk, dvs $30 \text{ m}^3 \times 0,4 = 12 \text{ m}^3$	$m_{\text{injekteringsbruk}} = 2000 \text{ kg torrprodukt/m}^3$ $\text{injekteringsbruk} \times 12 \text{ m}^3 = 24\,000 \text{ kg}$

Injekteringsbruk: från CEM I till CEM II	Material inhämtades avseende cementtyperna CEM I 42,5 N respektive • Weber prepakt injekt nyttjar cementtypen CEM I 42,5 N som utgör 50–75% av 1 kg torrprodukt (One Click LCA) • CEM I 42,5 N (One Click LCA) har en GWP om 873 kg CO₂e/ton • GWP weber prepakt injekt uppgår till 0,45 kg CO₂e/kg torrprodukt (Weber Saint-Gobain, 2024) och används för att kontrollera att beräkningen för CEM I är applicerbar på CEM II • CEM II/A-V 42.5 Anläggningscement FA Slite har en GWP om 589 kg CO₂e/ton (Heidelberg Materials Cement Sverige AB, 2025) • Antagande: Andelen i injekteringsbruket utgör 50%	<i>CEM I</i>: 0,873 kg CO₂e/kg × 0,5 = 0,4365 kg CO₂e/kg i torrprodukt Differens mot faktisk GWP: 0,0135 kg CO₂e/kg <i>CEM II</i>: 0,589 kg CO₂e/kg × 0,5 = 0,2945 kg CO₂e/kg torrprodukt Med korrektion med avseende på differens, antas GWP för injekteringsbruk med CEM II/A-V 42.5 Anläggningscement FA Slite vara 0,31 kg CO₂e/kg torrprodukt. Resultande GWP: 0,31 kg CO₂e/kg
---	---	---

Appendix B: Intervjufrågor

Stenstorlek och ballast i betong

- Vilka direkta för- eller nackdelar ses med att öka $D_{\max}$?
- Hur resonerar ni kring valet av maximal ballaststorlek ($D_{\max}$) i standardrecepten?
- Vilka avvägningar görs hos er i frågan om ballaststorlek?
- I vilken utsträckning väljs $D_{\max}$ utifrån klimatoptimering, respektive utformning och utförande?
- Vilka praktiska hinder finns för att öka $D_{\max}$?
- Kan branschen anses konservativ eller öppen för att använda större ballaststorlek?
- Varierar det mellan olika aktörer inom branschen? Hur?

Betongrecept

- Vilket övergripande resonemang förs vid proportionering av stenstorlek i betong?
- Vid justering av ballastfraktionerna, undersöks då också alternativa $D_{\max}$?
- Vilka utmaningar respektive möjligheter ser aktörer inom branschen med att minska cementinnehållet i betong?
- Vilka risker finns med minskad tillgång på flygaska och masugnsslagg?
- Ser ni att grövre ballast kan komma att bli aktuellt i framtida klimatoptimerad betong?
- Skulle alternativa konstruktionsmetoder, så som injekteringsbetong eller sparsten, kunna komma att vara intressanta för branschen framåt?

Injekteringsbetong

- Vilka för- och nackdelar finns med sparsten som konstruktionsmetod?
- Vilka begränsningar finns kring val av ballast i stenskelettet?
- Hur påverkar valet av ballast injekteringsgjutningen?
- Finns någon rekommenderad eller kravställd största fraktion?
- Hur avgörs vilken ballastkvalitet som är lämplig för ett visst projekt?
- I vilken grad måste ballasten förädlas (krossas/tvättas/siktas)?
- Vilket riktvärde används på andelen sten i betongmatrisen?
- Hur förhåller sig armering, ballast, ingjutningsgods och injekteringsbruk till varandra?

Sparsten

- Vilka är de primära skillnaderna jämfört med fabriksbetong?
- Vilka för- och nackdelar finns med sparsten som konstruktionsmetod?
- Vad kan anses vara de främsta hindren för att återuppta sparsten som konstruktionsmetod?
- För vilka konstruktionstyper hade sparsten lämpat sig idag?