

KLIMATFÖRBÄTTRAT BYGGANDE AV YTGRUNDLÄGGNINGAR



Stefan Svensson, Martin Heinegård, Elin Jönsson

2021-12-10

FÖRORD

Detta projekt har genomförts med hjälp av finansiering från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF). Det projekt har genomförts mellan november 2020 och december 2021. Huvudförfattare till rapporten är Stefan Svensson, Martin Heinegård och Elin Jönsson, Skanska.

Vi vill tacka projektets referensgrupp för sitt engagemang och som bidragit med kunskap och erfarenhet.

- Mats Andersson, JSB Construction
- Elin Hiller, Tyréns
- Thomas Widehag, NCC
- Nils Rydén, Peab
- Eva Frühwald Hansson, LTH
- Carl Jonsson, Skanska Teknik
- Henrik Berg, BGJ Bygg

Vi vill även tacka alla andra som på något sätt deltagit med sin tid och kunskap för projektet.

2021-12-10

SAMMANFATTNING

Klimatpåverkan från bygg- och fastighetsbranschen utgör en betydande andel av utsläppen som generas i Sverige, men även globalt. År 2017 stod bygg- och fastighetsbranschen för cirka 12 miljoner ton koldioxidekvivalenter, inkluderas utsläpp i andra länder på produkter som används i byggbranschen ökar utsläppen med 5,9 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Fördelningen av utsläppen har över tid förskjutits från att övervägande ligga på bruksskedet till att ligga högre och högre på produktionsskedet. Idag står produktionsskedet för cirka 50% av utsläppen, medan det för 30 år sedan låg på runt 30%. Det har inte heller skett någon större förändring av utsläppen från produktionsskedet under en längre tid. Därför finns det idag ett större intresse för att minska utsläppen under produktionsskedet för att kunna uppnå klimatneutrala byggnader.

Syftet med projektet är att undersöka hur större byggnaders grundläggning kan optimeras ur klimatsynpunkt, samt tydliggöra vilka val från entreprenören som ger positiva klimateffekter och hur dessa kan konkretiseras till krav i projekteringen. Syftet är även att göra en kostnads – och tidsanalys för klimatåtgärderna för att se de ekonomiska konsekvenserna, så att entreprenören kan välja åtgärder som är ekonomiskt försvarbara i relation till klimatbesparingen.

Arbetet med rapporten har utförts genom att först göra en litteraturstudie för att studera det nuvarande kunskapsläget. Därefter har ett flertal byggda projekt valts ut och studerats. Olika material- och konstruktionsval har testats för att se vilka effekter åtgärderna har haft.

Resultatet av arbetet är att det finns betydande klimatbesparingar som kan göras för grundkonstruktioner. Materialval kan ha en stor påverkan för klimatbelastningen, men utformning av konstruktioner när det kommer till dimensionering, tekniska lösningar, detaljutformning och systemval har en betydande roll i slutresultatet för klimatbelastningen av konstruktionen.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND	1
1.1 SYFTE	2
1.2 OMFATTNING	2
1.2.1 <i>Materialval</i>	2
1.2.2 <i>Konstruktionsoptimering</i>	2
1.2.3 <i>Definiering av förutsättningar och kravställning</i>	3
1.2.4 <i>Referensprojekt</i>	3
1.2.5 <i>Avgränsningar</i>	3
2 MATERIALVAL	4
2.1 FÖRUTSÄTTNINGAR	4
2.1.1 <i>Referensprojekt</i>	4
2.1.2 <i>Förenklad livscykelanalys</i>	5
2.1.3 <i>Emissionsfaktorer</i>	5
2.1.4 <i>Transport</i>	6
2.1.5 <i>Kostnadsuppskattning</i>	6
2.2 BETONG	6
2.3 ARMERING	7
2.4 ISOLERINGS-, DRÄNERINGS- OCH TÄTNINGSMATERIAL	8
2.5 DISKUSSION.....	8
3 KONSTRUKTIONSOPTIMERING	10
3.1 SYSTEMVAL.....	10
3.1.1 <i>Ytgrundläggning</i>	10
3.1.2 <i>Källare</i>	10
3.2 TUNNA GRUNDPLATTOR.....	12
3.2.1 <i>Alternativa material och utföranden</i>	14
3.3 TJOCKA BÄRANDE BOTTENPLATTOR	15
3.3.1 <i>Slimmad konstruktion eller alternativ utformning</i>	15
3.3.2 <i>Varierad betonghållfasthet</i>	15
3.3.3 <i>Stansarmering</i>	16
3.3.4 <i>Delad betonggjutning</i>	16
3.3.5 <i>Livslängdsanpassning</i>	16
3.4 PLINTFUNDAMENT OCH GRUNDBALKAR	17
3.4.1 <i>Varierande hållfasthetsklass</i>	17
3.4.2 <i>Rationellt byggande</i>	17
3.4.3 <i>Slimmande av fundament</i>	17
3.5 KÄLLARVÄGGAR.....	18
3.5.1 <i>Sprickbegränsning</i>	18
3.5.2 <i>Definiering av exponeringsklass</i>	19
3.5.3 <i>Källarväggars tjocklekar</i>	20
3.5.4 <i>Fallstudie</i>	20
3.5.4.1 <i>Fall A - Referensvägg</i>	20
3.5.4.2 <i>Fall B – Detaljerad indelning i flera exponeringsklasser</i>	21
3.5.4.3 <i>Fall C - Tätad utsida</i>	23
3.5.4.4 <i>Fall D - Föreskriven stenstorlek</i>	24
3.5.4.5 <i>Fall E - Föreskriven stenstorlek med detaljerad indelning i flera exponeringsklasser</i>	25

4	SLUTSATSER	27
	LITTERATURFÖRTECKNING	28
	BILAGOR	I
	BILAGA 1 – BERÄKNINGSDEL 1	I

1. BAKGRUND

De senaste åren har politiker på både nationell och internationell nivå satt upp mål och överenskommelser för att få bukt med klimatproblematiken som mänskligheten står inför. Den största internationella klimatöverenskommelsen är Parisavtalet, som antogs i december 2015. I Parisavtalet kom man överens om att den globala uppvärmningen ska hållas under 2 grader, men helst under 1,5 grader. 2015 antogs även de 17 globala målen för hållbar utveckling av FN, varav 13 handlar om att bekämpning av klimatförändringar. I Sverige beslutade riksdagen 2017 att införa ett klimatpolitiskt ramverk med nya klimatmål till 2030, 2040 och 2045, en klimatlag och ett klimatpolitiskt råd. Det långsiktiga klimatmålet innebär att Sveriges nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären ska vara noll senast år 2045, för att landet därefter ska uppnå negativa utsläpp. Många företag har också satt upp klimatmål som ska matcha målen om att nå klimatneutralitet till år 2045.

Bygg- och fastighetsbranschen har en stor inverkan på koldioxidutsläppen. I Sverige uppgick byggbranschens utsläpp till cirka 12 miljoner ton koldioxidekvivalenter 2017, vilket motsvarar 19% av landets totala årliga utsläpp av koldioxid. Inkluderas utsläpp i andra länder på produkter som används i byggbranschen ökar utsläppen med 5,9 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Av branschens utsläpp kommer ungefär 50% från byggverksamhet och 50% från uppvärmning. Utsläppen från byggverksamheten har över tid inte minskat i Sverige, till skillnad från utsläppen från uppvärmningen där man ser en stadig minskning i takt med att byggnaderna blir allt mer energisnåla.

Det vanligaste sättet att bedöma en byggnads eller anläggnings klimatpåverkan är att genomföra en livscykelanalys. Flertalet rapporter med livscykelanalyser har utkommit de senaste åren, även inom ramen för SBUF-projekt. SBUF-projekt 13355 jämförde olika stomsystem (Erlandsson et al. 2018) och projekt 12912 undersökte byggprocessens klimatpåverkan på en mer övergripande nivå (Liljenström et al. 2015). Analyserna är gjorda på olika sätt och med olika systemgränser, men en gemensam nämnare är att de inte inkluderar grundkonstruktioner. Grundkonstruktioner förbrukar stora mängder betong och armering, vilket således även genererar stora koldioxidutsläpp. Även träbyggnader har oftast grundläggning med betong, och i vissa fall behöver grunden göras ännu kraftigare än för en betongbyggnad för att undvika problem med byggnadens stabilitet.

Hur stor klimatbelastning en enskild grundläggning genererar påverkas av flertalet parametrar varav några exempel är exponeringskrav, vattentäthetskrav, anpassningar för produktionsförenkling, dimensioneringsmetod och dimensionerande livslängd. Dimensionering av grundkonstruktioner utförs på olika sätt beroende på vem som utför den. En konservativ dimensionering av konstruktionen kan ge upphov till mycket materialanvändning, dock kan en felaktig konstruktion leda till skador eller en tidig nedbrytning av konstruktionen som leder till dyra, verksamhetsstörande och klimatbelastande renoweringar. Idag styr tids- och arbetsbesparande utformningar över klimat- eller bärighetsoptimerade konstruktioner men i framtiden måste detta ändras för att kunna uppnå klimatmålen som ställts. Även kostnadsbesparingar går idag före klimatförbättrande åtgärder.

För att entreprenörer ska kunna minska koldioxidutsläppen från grundkonstruktioner krävs en ökad kunskap om hur de ingående materialen och utformningen av konstruktionen inverkar på utsläppen. Det krävs också en ökad kunskap om vad de koldioxidbesparande åtgärderna har för inverkan på grundläggningens kostnad och projektets tidsramar för att entreprenören ska kunna välja åtgärder som är ekonomiskt försvarbara och samtidigt ger en positiv klimateffekt. Detta skulle

även ge entreprenörerna möjlighet att redan i projekteringen ställa tydligare klimatkrav för grundkonstruktioner.

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka hur större byggnaders grundläggning kan optimeras ur klimatsynpunkt, samt tydliggöra vilka val från entreprenören som ger positiva klimateffekter och hur dessa kan konkretiseras till krav i projekteringen. Syftet är även att göra en kostnads – och tidsanalys för klimatåtgärderna för att se de ekonomiska konsekvenserna, så att entreprenören kan välja åtgärder som är ekonomiskt försvarbara i relation till klimatbesparingen.

Projektets mål är att

- Identifiera konkreta åtgärder som kan implementeras i projekt och vilka klimatkrav entreprenörer kan ställa för att minska klimatbelastningen från grundläggningskonstruktioner.
- Ta fram kostnadseffekter av implementeringen av de olika åtgärderna.
- Uppskatta tidseffekter av implementeringen av de olika åtgärderna.

1.2 Omfattning

Projektet inleddes med en litteraturstudie för att identifiera det rådande kunskapsläget och se hur kunskapen kan tillämpas i projektet. Efter litteraturstudien delades beräkningarna upp i tre delar - materialval, konstruktionsoptimering samt definition av krav och förutsättningar.

1.2.1 Materialval

I den första delen av rapporten undersöks hur valet av produkter påverkar konstruktionens klimatpåverkan och kostnad. Byggbranschen använder ungefär hälften av allt råmaterial som utvinns i Europa så en ökad materialeffektivitet utgör en stor del av arbetet för att minska klimatbelastningen från branschen (Ruuska & Häkkinen 2014). I studien undersöks inverkan från de vanligaste komponenterna i ytliga grundläggningar, vilket inkluderar

- Betong
- Armering
- Isolerings-, dränerings- och tätningsmaterial

I analysen inkluderades även transport från tillverkare till byggarbetsplats. Även om transportsträckan för betong är relativt kort i jämförelse med andra produkter, finns flertalet gröna armerings- och isoleringsprodukter på marknaden som ger betydligt längre transportsträckor. Inverkan från transportsträckor har i studier visat sig vara svåra att kartlägga, men har en betydande inverkan på både byggnadens slutkostnad och miljöpåverkan (Larsson & Andersson 2014). Kartläggning av byggtransporter avser dessutom i de flesta fall prefabricerade konstruktionsdelar och inte platsgjutna grundkonstruktioner.

1.2.2 Konstruktionsoptimering

I den andra delen av rapporten undersöktes hur den konstruktiva utformningen påverkar koldioxidutsläpp och kostnader. Grundkonstruktioner har inte analyserats i lika stor utsträckning som stomkonstruktioner när det gäller koldioxidutsläpp, och analyserna för betongkonstruktioner ovan mark är inte alltid direkt applicerbart. Grundkonstruktioner ställer helt andra krav på betongen jämfört med stomkonstruktioner ovan mark. Till skillnad från stomsystem som oftast prefabriceras och därefter transporteras till arbetsplatsen så gjuts grunden i de allra flesta fall på plats vilket innebär att utformningen anpassas för att förenkla produktionsarbetet.

Följande parametrar kopplat till den konstruktiva utformningen undersöktes:

- Grundläggning med och utan källare
- Grundläggning med tunn, icke-bärande grundplatta
- Grundläggning med tjock, bärande grundplatta
- Källarväggars utformning utifrån
 - Sprickbegränsning
 - Exponeringsklass
 - Väggtjocklek i förhållande till armeringsinnehåll

1.2.3 Definiering av förutsättningar och kravställning

Kontorsbyggnader och flerfamiljshus byggs ofta med källare för garage vilket ger höga exponeringskrav på betongen och innebär även att krav på vattentätthet kan bli aktuellt. De förutsättningar och krav som definieras av konstruktören får således en stor inverkan på den slutliga konstruktionen. I rapporten undersöks hur följande faktorer påverkar koldioxidutsläppet:

- Vattentätthetskrav
- Livslängd
- Exponeringsklass

1.2.4 Referensprojekt

Referensprojekt valdes ut som underlag till beräkningarna, samtliga med olika typer av ytgrundläggning. I tabell B:1, Bilaga 1 beskrivs ingående konstruktionsdelar för respektive referensprojekt och dess uppbyggnad. Följande referensprojekt och konstruktioner undersöktes:

- Referensprojekt 1 - Flerbostadshus, plattgrundläggning utan källare
- Referensprojekt 2 - Kontorshus, plattgrundläggning med källare
- Referensprojekt 3 - Kontorshus, plattgrundläggning med källare

Projekten utgör typhus för en huskonstruktör som arbetar med grundläggning av större byggnader. Namnen på referensprojekten har anonymiserats i rapporten av sekretessskäl.

1.2.5 Avgränsningar

Vissa avgränsningar var tvungna att implementeras för att arbetet skulle rymmas inom ramen för ett SBUF-projekt. Endast ytgrundläggning kommer att studeras i projektet, att inkludera djupgrundläggning, så som pålning hade gjort projektet alltför omfattande och skulle istället kunna utföras som ett separat projekt. I valet av material utgår ballast ur analysen då de höga beständighetskraven för grundkonstruktioner försvårar återbruk av krossad betong, vilket annars är ett alternativ för att minska miljöpåverkan.

I livscykelanalysen (LCA) undersöks endast de två första skedena, produktskede och produktion. Användningsskedet undantas då möjligheten till underhåll och reparation är begränsad för en grundkonstruktion. Även slutskedet som omfattar rivning, transport, restproduktbehandling och bortskaffning bortses ifrån. Det finns möjlighet för betongkonstruktioner att efter gjutning binda koldioxid som genererats under tillverkningen. Detta sker genom karbonatisering, vilket innebär att koldioxid reagerar med kalciumhydroxiden i betongen som återgår till kalciumkarbonat. Karbonatisering kan dock också ha en påverkan på konstruktionens livslängd, detta gäller speciellt för konstruktioner som är exponerade för fukt eller salter. Det har framförts förslag i branschen att utforma betongkonstruktioner på ett sätt så att man kan maximera absorptionen av koldioxid. Då grundkonstruktioner ofta är utsatta för fukt eller salt bör en minskad livslängd för konstruktionen troligen inte vara värd den positiva effekten av absorption av koldioxid. Karbonatisering kräver också att betongen är fritt exponerad för omgivande luft, vilket innebär att grundkonstruktionens bindning av koldioxid bör vara försumbar och bortses därför ifrån i analysen.

2 MATERIALVAL

En analys utfördes för att undersöka hur produktval av betong, armering samt isolerings-, dränerings- och tätningsmaterial påverkar klimatbelastningen och den totala kostnaden.

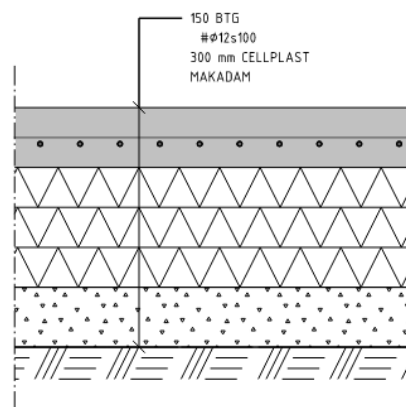
2.1 Förutsättningar

En förenklad livscykelanalys utfördes för de utvalda referensprojekten.

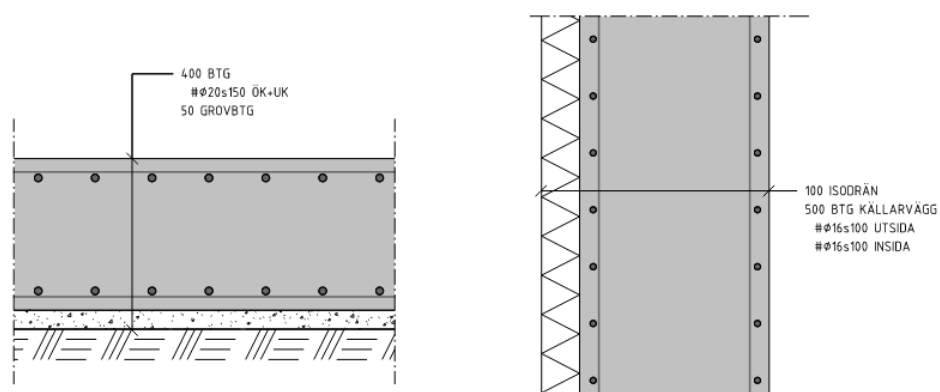
2.1.1 Referensprojekt

Referensprojekten utgör underlaget till analysen. För flerbostadshuset analyserades grundplattan, och för de två kontorshusen analyserades både grundplatta och källarvägg. I tabell B:1, bilaga 1 beskrivs ingående konstruktionsdelar för respektive referensprojekt och dess uppbyggnad, och i tabell B:2 resultatet från analyserna. I avsnitten nedan presenteras förutsättningarna för analysen. I figur 1–3 nedan illustreras de analyserade konstruktionerna från referensprojekten. Studien omfattar endast grundläggning och inte hela byggnader. Därför studeras en representativ del för varje referensprojekt, motsvarande en kvadratmeter.

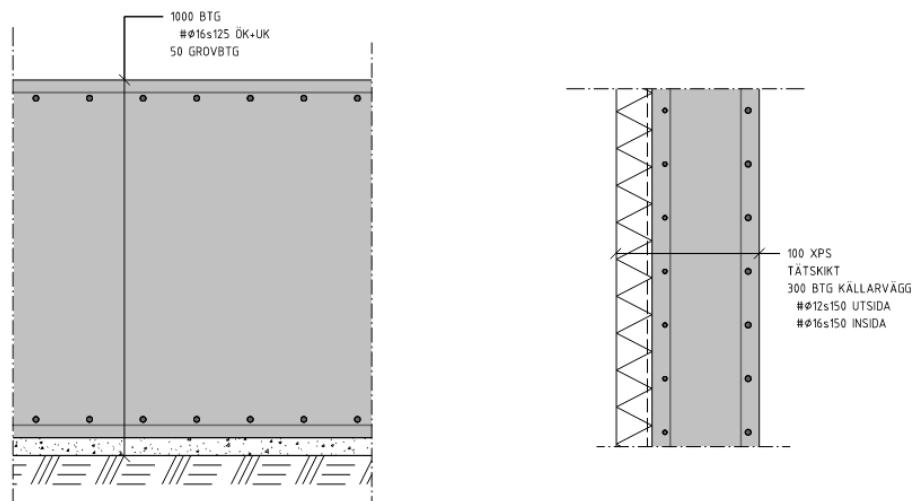
Vid vissa undersökningar har även andra färdigställda projekt analyserats.



Figur 1. Grundkonstruktionen för referensprojekt 1 som är ett flerbostadshus.



Figur 2. Referensprojekt 2 är en kontorbyggnad där grundplatta och källaryttervägg analyserades.



Figur 3. Referensprojekt 3 är en kontorsbyggnad där grundplatta och källaryttervägg analyserades.

2.1.2 Förenklad livscykelanalys

För att utvärdera komponenternas inverkan på det totala koldioxidutsläppet utförs en förenklad livscykelanalys (LCA) enligt riktlinjer från Boverket (Boverket 2019). En LCA delas in fem olika skeden som motsvarar skeden i byggnadens livslängd: produktskede (A1-3), byggproduktionsskede (A4-5), användningsskede (B1-7), slutskede (C1-4) samt fördelar och belastningar utanför systemgränserna (D) (Boverket 2019). Med miljöpåverkan avses i denna analys endast utsläppet av koldioxid. Livscykelanalysen avgränsas till att endast omfatta de två första skedena: produktskedet (A1-3) och byggproduktionsskedet (A4-5). Produktskedet tar hänsyn till utsläpp från råvaruförsörjning, transport till tillverkning och tillverkning av produkten. Byggproduktionsskedet omfattar transport från tillverkning till byggarbetsplats samt bygg- och installationsprocessen. Fokus i analysen ligger på transporten från tillverkning till produktionsplats, medan utsläpp på byggarbetsplatsen inte inkluderas (endast en kvadratmeter studeras).

2.1.3 Emissionsfaktorer

Utsläppet av koldioxid för varje material beräknas med en emissionsfaktor, som anger utsläpp av CO₂ per kg eller m³ byggnadsmaterial. En specifik emissionsfaktor kan tas fram för varje produkt och anger utsläppet av koldioxid under produktskedet (A1-3). Det innebär att emissionsfaktorerna kan skilja sig åt stort mellan olika tillverkare. För att minska risken för att underskatta eller överskatta koldioxidutsläppen används generiska värden från Svenska Miljöinstitutets (IVL) miljödatabas. Emissionsvärdena i databasen är medelvärden från olika tillverkare. I tabell 1 presenteras emissionsfaktorer för materialvalen. Den klimatförbättrade isoleringen har samma koldioxidutsläpp som standardisoleringen, men ger samma isolerande förmåga för en 30% tunnare skiva.

Tabell 1. Emissionsfaktorer för ingående material.

Material	Emissionsfaktor	Enhet
Anläggningsbetong C35/45 XC4 vct 0.4	427	kg CO ₂ -ekv./m ³
Klimatförbättrad anläggningsbetong C35/45 XC4 vct 0.4	340	kg CO ₂ -ekv./m ³
Armering, Celsa Nordisk	0,48	kg CO ₂ -ekv./kg
Armering, Celsa Norge	0,36	kg CO ₂ -ekv./kg
EPS S80	3,86	kg CO ₂ -ekv./kg
EPS Climate	3,86	kg CO ₂ -ekv./kg
Isodrän, 95 kPa	75,5	kg CO ₂ -ekv./m ³
XPS	153,4	kg CO ₂ -ekv./m ³

Tättskikt Preprufe	2,1	kg CO ₂ -ekv./ kg
--------------------	-----	------------------------------

2.1.4 Transport

Med transporter avses i den här analysen sträckan från tillverkaren till arbetsplatsen, vilket inte inkluderas i emissionsfaktorerna utan beräknas separat. Materialtransporterna antas ske med lastbil och delas upp i två kategorier: lastbilstransport 20–70 km och lastbilstransport längre än 70 km. För den kortare transportkategorin antas en större del ske på mindre vägar, medan den längre transportkategorin antas ske nästan uteslutande på motorväg vilket resulterar i olika emissionsfaktorer. Emissionsfaktorerna i tabellen nedan är hämtade ur IVL:s miljödatabas.

Tabell 2. Emissionsfaktorer för transportalternativen.

Transportkategori	Emissionsfaktor [kg CO ₂ / ton km]
Lastbil 20-70 km	0,106
Lastbil > 70 km	0,070

Samtliga referensprojekt är placerade i södra Sverige, men analysen utförs även för en alternativ placering i Mellansverige. I uppskattningen av transportutsläpp och transportkostnader används ett medelvärde av de två olika placeringarna. Skillnaden mellan placeringarna är att sträckan för transport av betong är längre för alternativet i Mellansverige och sträckan för transport av armering och isolering är längre för alternativet i södra Sverige.

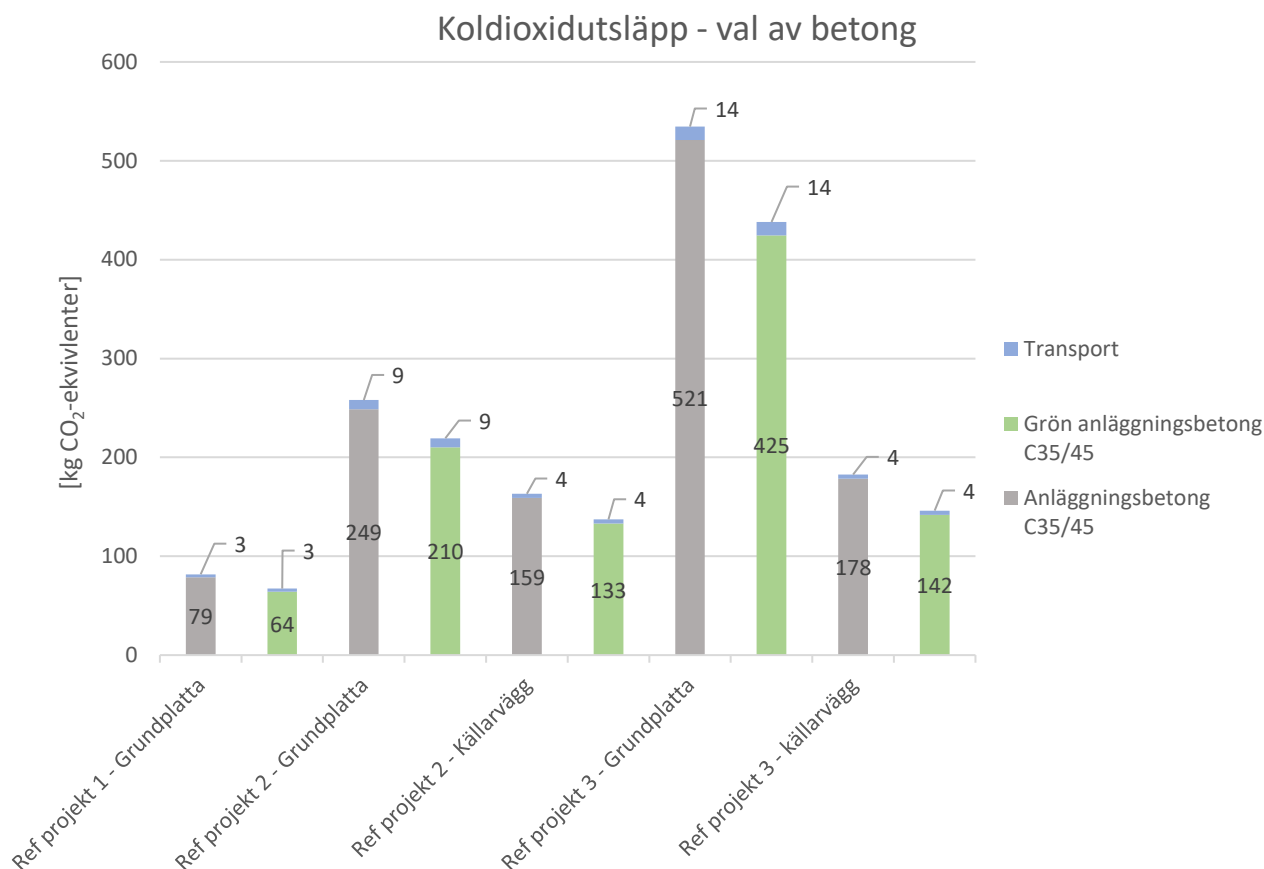
2.1.5 Kostnadsuppskattning

Uppskattning av kostnader är tagna ur aktuellt prisregister hos Skanska. Av sekretesskäl redovisas kostnader endast som jämförelser i procent. I kostnadsjämförelser bör man också ha i åtanke att materialpriser varierar relativt mot varandra över tid.

2.2 Betong

Ungefär 90 % av koldioxiden som genereras från betongen kommer ifrån själva tillverkningen av cementklinkers, och övriga utsläpp fördelar sig ungefär jämnt mellan tillverkningen av betong och transporten till betongfabriken (Svensk betong 2017). Ett kritiskt moment är därför själva tillverkningen av cement och det effektivaste sättet att minska utsläpp är en ökad energieffektivitet och användning av gröna energikällor under tillverkning (Favier, De Wolf, Scrivner & Habert 2018). Tillverkningsprocesserna är dock snarlika hos cementleverantörerna i Sverige. Fokus i analysen blev därför att hitta sätt att minska utsläpp från själva gjutningen. Ett sätt att göra detta är alternativa bindemedel och i analysen undersöks därför klimatpåverkan från en klimatförbättrad anläggningsbetong där en del av cementen ersatts med slagg.

I analysen gjordes en jämförelse mellan en vanlig anläggningsbetong och en klimatförbättrad betong från Skanska. I den klimatförbättrade betongen har en del av cementen ersatts med slagg för att minska koldioxidutsläppet. Figur 4 visar totala utsläpp från de olika referensprojekten. De grå staplarna visar utgångsvärdena och de gröna visar koldioxidutsläppet efter bytet till det gröna alternativet. Bytet till klimatförbättrad betong genererar en minskning av koldioxidutsläppen med upp till 20%. Kostnadsmissigt är den endast marginellt dyrare, cirka 2–3 %, jämfört med en standard anläggningsbetong.

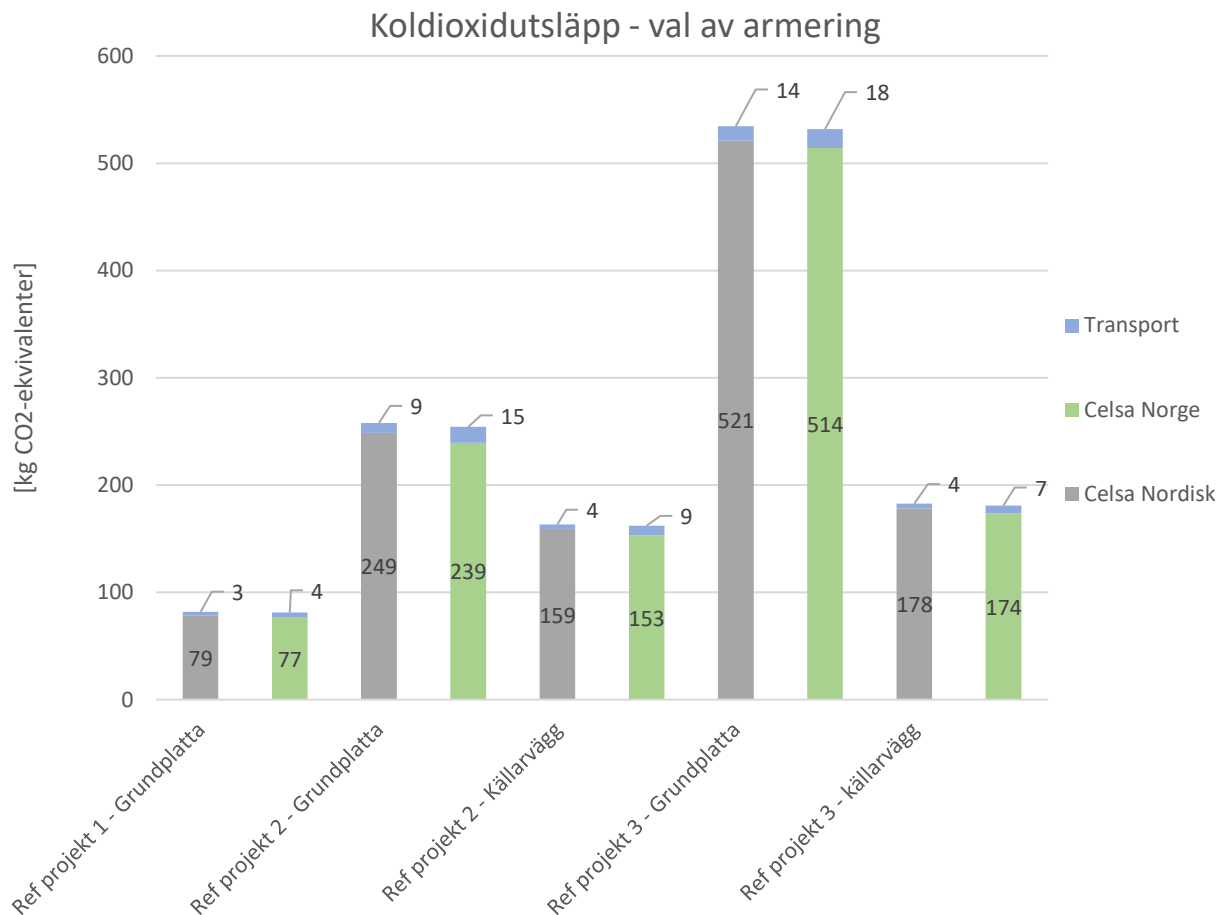


Figur 4. Koldioxidutsläpp från grundkonstruktionerna för standard anläggningsbetong och grön anläggningsbetong i kg CO₂-ekvivalenter per m² av konstruktionen.

2.3 Armering

Armeringen utgör viktligt den näst största materialkategorin i grundkonstruktionen. I figur 5 nedan visas utsläppen av koldioxid (i kg koldioxidekvivalenter) för både material och transport. Jämförelse gjordes mellan två olika armeringstyper från Celsa, den nordiska och den norska. Den största skillnaden mellan alternativen är att den norska varianten tillverkas i stålverk där energianvändning består uteslutande av vattenkraft, medan den nordiska variantens tillverkningsprocess använder blandning av förnybara och fossila energikällor. Analysen visar en försumbar minskning av koldioxidutsläppen kopplat till valet av armering, till stor del eftersom klimatbesparingen från de minskade utsläppen från tillverkningen ersätts av de ökade transportutsläppen. Koldioxidutsläppen kopplat till transport dubblas för flera av konstruktionerna. Kostnadmässigt sker en ökning med 3–6% för det gröna stålet.

Användande av höghållfast armering med en sträckgräns på 600 MPa, istället för det normala 500 MPa, har också utvärderats. Detta kan ge en mindre besparing av klimatutsläpp på grund av den minskade stålmängden, men för de flesta konstruktioner utgår detta bara till 1–2%.



Figur 5. Koldioxidutsläpp från grundkonstruktionerna för Celsas nordiska och norska armeringsalternativ i kg CO₂-ekvivalenter per m² av konstruktionen.

2.4 Isolerings-, dränerings- och tätningsmaterial

Den sista materielgruppen i analysen är isolerings- och tätningsmaterial. För referensprojekt 1 har bytet till en klimatförbättrad isolering försumbar inverkan på det totala koldioxidutsläppet eftersom isoleringen utgör en ytterst liten andel av konstruktionens totala vikt. Däremot minskar kostnaderna med 5% till följd av att en mindre mängd isolering krävs för att uppnå samma isolerande förmåga. Det visar att det är möjligt att göra kostnadsbesparingar samtidigt som man minskar koldioxidutsläppen. Jämförelsen mellan de två olika dränerings- och tätningslösningarna, Isodrän eller XPS med Preprufe, gav en 10% lägre klimatpåverkan från Isodrän-alternativet. Kostnaden ökade med cirka 5%. Isodrän används i syfte att dränera och inte täta, vilket innebär att bytet mellan alternativen inte alltid är tillämpligt.

2.5 Diskussion

Klimatbelastningen från grundkonstruktioner påverkas i störst utsträckning av själva betongen, som vikt- och volymmässigt utgör den största komponenten i konstruktionen. Varken armering eller isolering har i närheten så stor inverkan på utsläppen sett till materialanalysen. Den uppnådda minskningen med 18–20% stämmer ändå väl överens med Skanskas tidigare tester där koldioxidutsläppen minskat med 16–40% vid användning av grön anläggningsbetong. Analysen gav inte en lika drastisk minskning av koldioxid som ett byte från byggbetong till grön byggbetong där Skanska har kunnat visa minskningar omkring 50%. Det beror troligtvis på den höga hållfasthetsklassen hos anläggningsbetongen som kräver en större mängd cement för att uppnå 28-dagarshållfastheten, vilket medger mindre mängd slagg eftersom denna ger en långsammare

hållfasthetsutveckling. Studier har visat att även om inblandning av slagg ger en långsammare hållfasthetstillväxt så fortsätter hållfasthetstillväxten för slaggbetong betydligt efter 28 dagar till skillnad från helt cementbaserad betong (Siddique & Bennacer 2012). En intressant vidare studie hade därför varit att undersöka hur stora klimatbesparingar hade kunnat uppnås om man tillåtit hållfasthetstillväxt i längre än 28 dagar, men det skulle kräva praktisk provning.

Det vore också intressant att i större detalj undersöka hur tjockleken på konstruktionen och valet av hållfasthetsklass påverkar kostnaden och utsläppen. Under arbetet uppstod till en början svårigheter att finna grön anläggningsbetong i hållfasthetsklass C35/45 och därför undersöktes alternativet att byta till grön anläggningsbetong C45/55. Detta gav tunnare konstruktioner och vissa klimatbesparingar även om armeringsmängden i flera fall även behövde ökas för att uppnå sprickkrav. Detta stämmer överens med studier som visat att en optimering av betongen sett ur ett LCA-perspektiv uppnås omkring hållfasthetsklass C50, där de tunnare konstruktionerna med högre hållfasthetsklass genererar mindre koldioxidutsläpp (Purnell 2013). I den sista delen av rapporten undersökts vidare hur valet av exponeringsklass från konstruktören påverkar koldioxidutsläppen.

För konstruktionerna är inte besparingen koldioxid vid tillverkning av grön armering tillräcklig för att väga upp den ökade transportsträckan för den norska armeringsvarianten, vilket visar vikten av att väga in samtliga faktorer innan ett materialbeslut tas. Transportsträckan för betongen är generellt kortare och får därför inte en lika stor inverkan på det totala utsläppet, men det är svårt att avgöra hur representativa de undersökta transportsträckorna är för grundläggningstypen. Isolering- och tätningsmaterial utgör en ytterst liten del av den totala vikten och får därför försumbar inverkan på de totala utsläppen, men analysen visade att en effektivare materialanvändning med det dyrare isoleringsalternativet ändå totalt gav en kostnadsbesparing samtidigt som koldioxidutsläppen minskade.

3 KONSTRUKTIONSOPTIMERING

Den konstruktiva utformningens påverkan på koldioxidutsläpp undersöktes genom jämförelser mellan olika konstruktionsalternativ.

3.1 Systemval

En stor del av påverkan av klimatpåverkan för byggnader bestäms i ett tidigt skede när utformningen av huset, stommen och grundläggningen görs.

Utformningen av stommen har en påverkan på hur grundkonstruktionen måste utföras. Parametrarna som avgör stommens påverkan på grundutformningen är för omfattande för att behandlas i detta arbete. Dock kan det noteras att hantering av laster från stomstabilisering kan bidra till stora mängder betong för att tynga ned konstruktionen. Speciellt för hus med en trästomme som är lättare än en betongstomme är detta en viktig parameter. Trähus har också kortare avstånd mellan pelare vilket leder till mindre, men fler fundament. Något som visat sig bidra till en något ökad betongmängd i grunden.

3.1.1 Ytgrundläggning

I detta arbete begränsas undersökningar till ytgrundläggningar. Detta inkluderar plintfundament, grundbalkar, tunna grundplattor och tjocka grundplattor.

En stor del av byggnader som utförs med ytgrundläggning byggs med plintfundament och långsgående fundament under väggar med en tunn grundplatta som golv för entréplan eller till ett garage. Därtill kommer också plattor under stabiliserande kärnor.

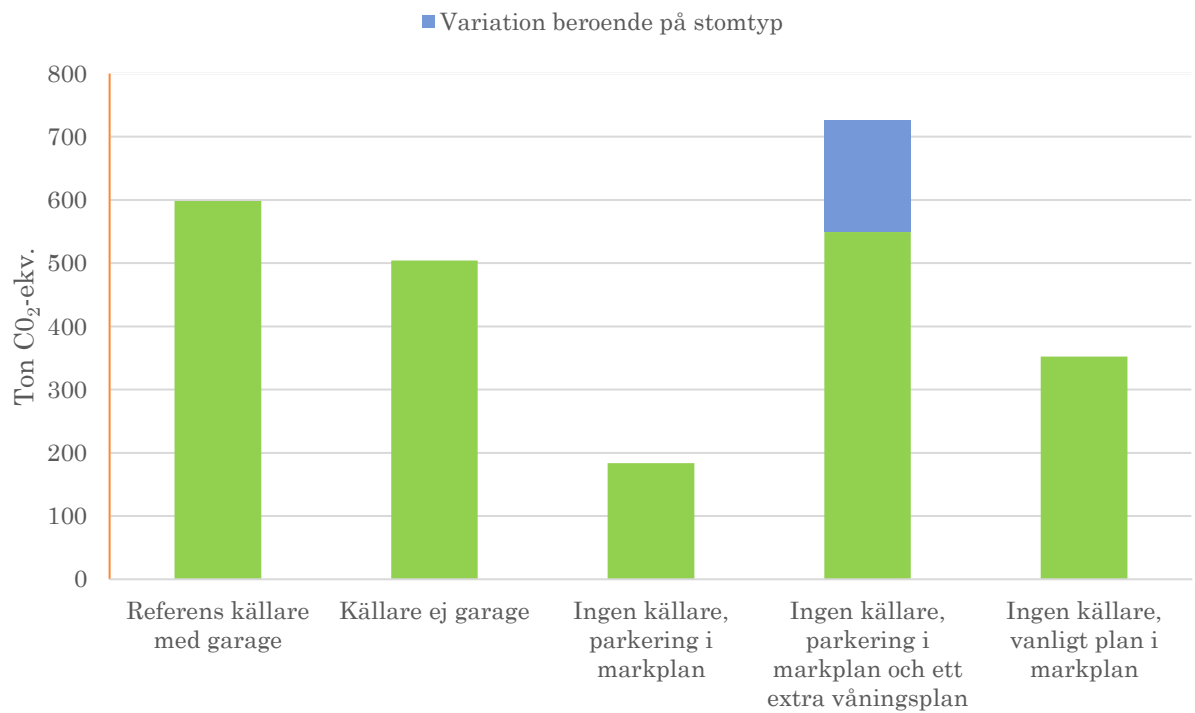
Tjocka grundplattor är traditionellt till för att fördela ut lasten från byggnader över svaga jordmassor. Dock används det idag ofta för att få en produktionsvänlig lösning, där man också kan hantera eventuella vattentryck från grundvattnet.

3.1.2 Källare

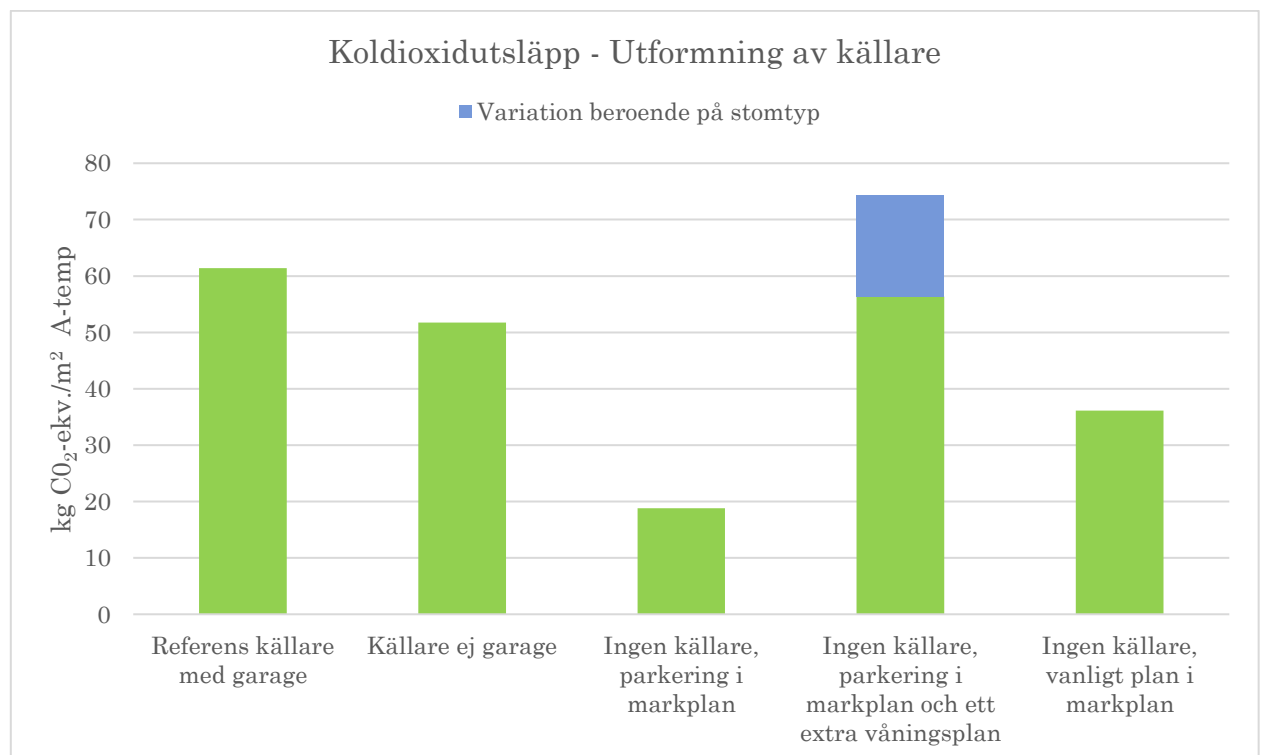
Källarkonstruktioner har identifierats som en stor drivande post för klimatbelastningar av grundkonstruktioner. I en studie som undersökte miljöpåverkan från olika grundkonstruktionstyper fann man att det effektivaste sättet att minska klimatpåverkan från ett flerbostadshus med källare är att ta bort källaren och istället grundlägga med platta på mark (Larsson, Erlandsson, Malmqvist & Kellner 2016). Verksamheten som hade planerats till källaren får förläggas i markplan istället.

En utvärdering gjordes på en byggnad som representerar ett ganska typiskt projekt. Byggnaden omfattade $1625 \text{ m}^2 A_{\text{Temp}}$ per våning, med 6 våningar. En källare för parkering låg under huset och omfattade i princip hela tomtens yta på 2500 m^2 . Ett par olika fall undersöktes för att se vad skillnaden i klimatbelastning blev. Sammanställning av resultat kan ses i Figur 6 och i Figur 7.

Koldioxidutsläpp - Utformning av källare



Figur 6 Total klimatbelastning beroende på val av utformning av källare.



Figur 7 Klimatbelastning per m² beroende på val av utformning av källare.

Källare utan garage innebär en anpassning av användandet av källare till något annat än garage. Detta sänker kraven på betongen vilket i sin tur sänker cementmängden. Detta ber en minskad klimatbelastning på cirka 15%.

Att utesluta källaren helt och istället förlägga en parkering till markplanet ger en minskad klimatbelastning på cirka 70%. Detta medför dock att den uthyrningsbara/försäljningsbara ytan för huset minskar. Grundläggningen hamnar också högre upp vilket leder till att den ofta hamnar på sämre markmassor vilket leder till en något större mängd betong och armering i grunden.

För att bibehålla den uthyrningsbara/försäljningsbara ytan skulle ett extra våningsplan kunna läggas till på huset. Beroende på typ av stomme kan detta ge ett något mer gynnsamt resultat än att bibehålla källaren.

Om man kan acceptera att göra sig av med parkeringen i huset och bibehålla markplanet som en uthyrningsbar/försäljningsbar yta kan klimatbelastningen minska med cirka 40%.

Vid beräkningar ovan har inga speciella åtgärder tagits för att minimera utsläppen, till exempel har det räknats med att markmaskiner ej använder HVO bränsle och traditionell betong och asfalt används. För valet där en parkering placeras i markplan finns en större möjlighet idag att reducera klimatutsläpp med ytterligare klimatvänliga val, som HVO bränsle och klimatneutral asfalt; därför kan detta val göras ännu gynnsammare.

Som en summering kan följande effekter observeras för ett förändrat val av källarkonstruktioner.

Positiva effekter

- Minskad klimatbelastning
- Mindre mängd schaktmassor att hantera
- Potentiellt minskad kostnad för byggnation
- Potentiellt kortad tidplan för byggnation

Negativa effekter

- Minskad boyta/uthyrbar yta, alternativt minskat antal parkeringsplatser.
- Mindre attraktivt markplan för entréer och verksamheter.
- Grundläggning hamnar potentiellt i sämre mark vilket ökar mängden betong och armering för grundläggningen.

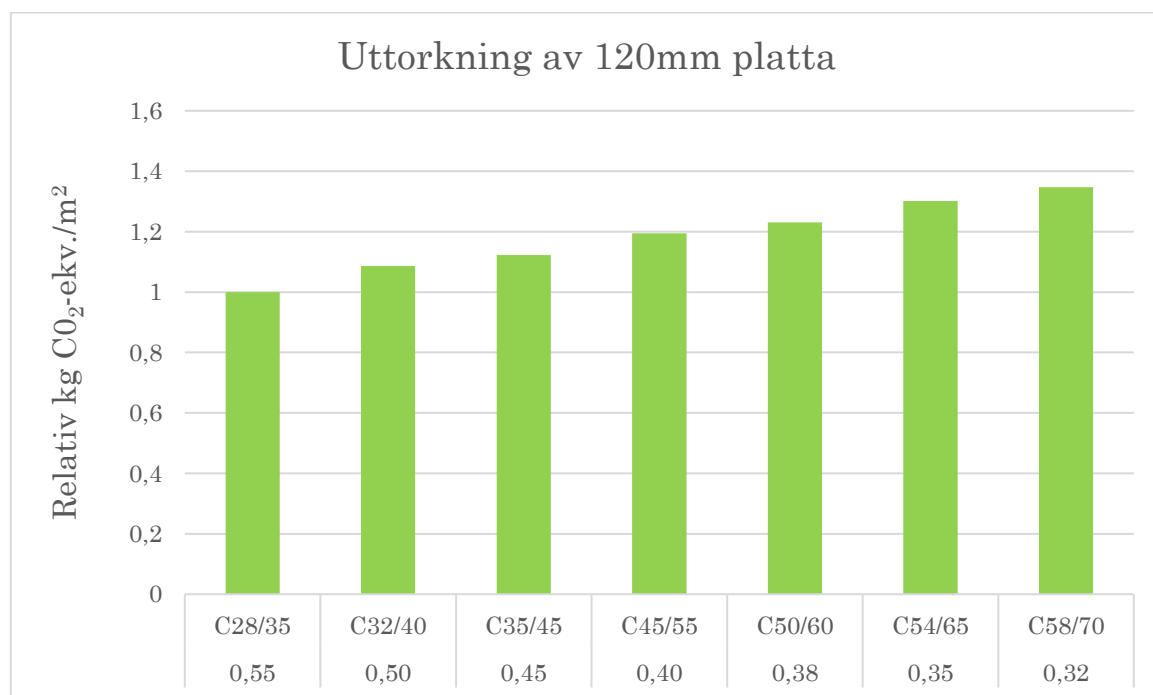
3.2 Tunna grundplattor

Hus byggs idag generellt med tunna grundplattor i betong. Tunna grundplattor avser här plattor som inte bidrar till att bära stommen av huset, undantaget är plattor till villor där stommen står på en tunn grundplatta med kantförstyvningar. Denna typ av plattor kommer huvudsakligen att belastas av en utbredd nyttig last. På grund av den låga lasten blir plattorna ofta byggda med mått som passar av praktiska skäl. Tjockleken kan ökas av olika skäl, till exempel för att tillåta ursparingar i golvet kan behöva plattan vara tjockare.

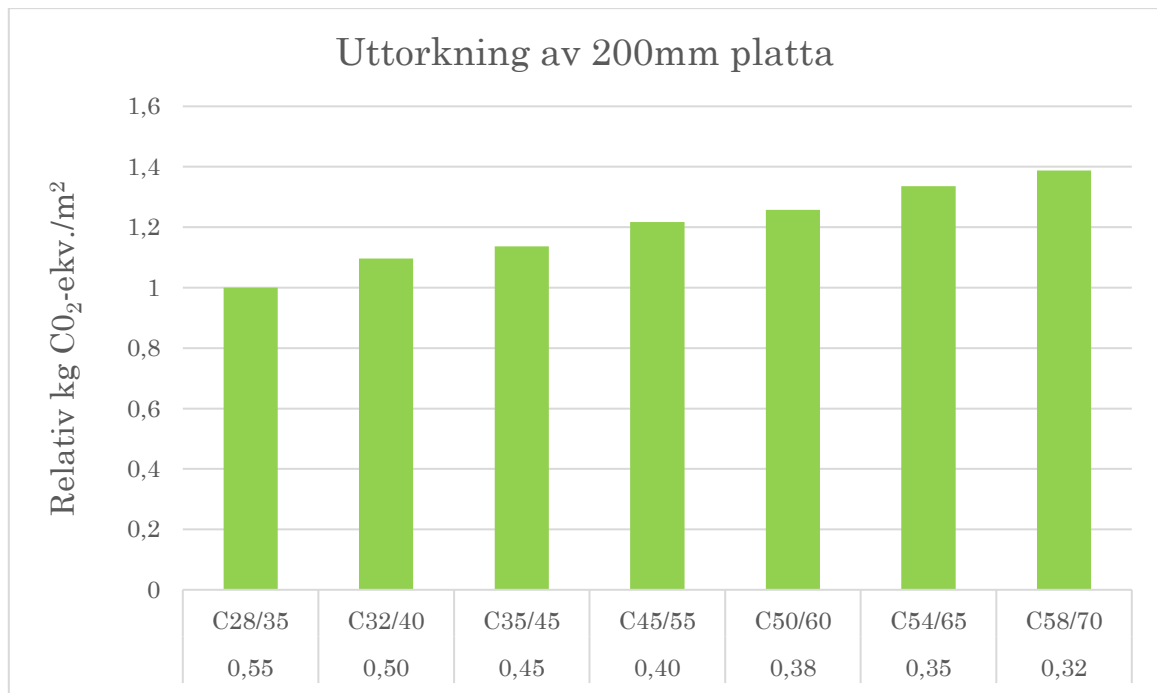
Beroende på val av golvlaggningsmaterial kommer olika uttorkningsnivåer krävas innan golvbeläggning görs. Detta leder i dagens byggande med stor fokus på att korta byggtiden ofta till att låga vct väljs för betong i plattor vilket leder till högre klimatbelastningar än nödvändigt.

För att reducera klimatbelastningen på grund av uttorkningskrav kan man göra vissa justeringar tidigt i projektering:

- Ändra golvbeläggning för att sänka krav på uttorkning i betongen.
- Går det att förlänga tiden som plattan tillåts torka genom att justera i
- Använd endast betong med lägre vct i områden där det krävs.
- Klimatförbättrad betong med en inblandning av slagg har också visat sig ha kortare uttorkningstider än motsvarande traditionell betong. Vilket innebär att ett byte till klimatförbättrad betong kan ha en större effekt genom att reducera vct.



Figur 8 Klimatbelastning för en 120mm betongplatta inklusive isolering under en platta med vct_{ekv} 0,55 betong.



Figur 9 Klimatbelastning för en 200mm betongplatta inklusive isolering under en platta med $v_{ct,ekv}$ 0,55 betong.

I Figur 8 och i Figur 9 redovisas klimatbelastningen för tunna grundplattskonstruktioner, inklusive, isolering, relativt en

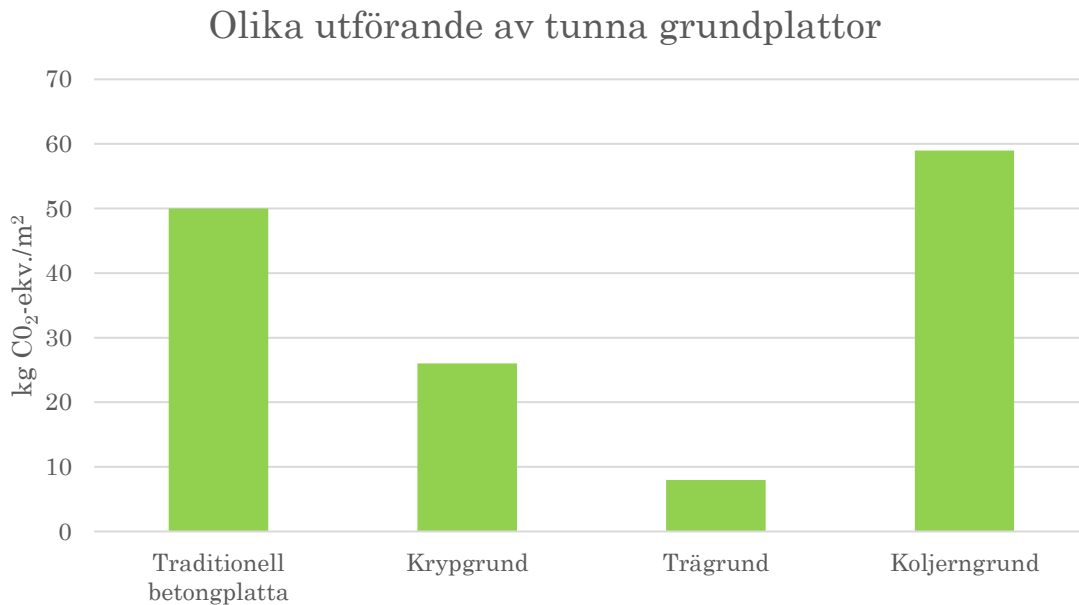
3.2.1 Alternativa material och utföranden

Även om grundläggning traditionellt utförts av betong finns det möjlighet att byta ut tunna betonggrundplattor mot alternativa material och alternativa utföranden.

Krypgrunder, eller torpargrund som det tidigare kallats, är en konstruktion som använts mycket förr i Sverige. Dock har mycket fuktproblem uppstått i konstruktionen när den har anpassats för att uppfylla moderna energikrav och uppvärmningssystem. Konstruktionen är idag en riskkonstruktion som sällan byggs, men som kan ha en avsevärd positiv effekt för klimatbelastningen av grunden.

Plattor i trä har tidigare inte använts i Sverige men har presenterats som ett alternativ nyligen. Klimatberäkningar visar att man kan uppnå en reduktion på cirka 84% av klimatbelastning för konstruktionen jämfört med en betongplatta (Gustafsson 2019).

Cellglasgrunder, ofta tillverkad under varumärket koljern, består av element av isolering som läggs på ett packat friktionsmaterial. Klimatbelastningen under byggskedet kan bli högre än för en betonggrund, dock kan en reduktion av köldbryggor ske vilket (Sidenmark & Vlassopoulou 2021).



Figur 10. Klimatbelastning för olika grundläggningstyper. (Sidenmark & Vlassopoulou 2021)

3.3 Tjocka bärande bottenplattor

Referensprojekt 2 och 3 är projekt som har en grund bestående av en nästan jämntjock platta. I båda fallen har marken bärighet för att klara laster utan att utnyttja hela plattans lastfördelande kapacitet.

3.3.1 Slimmad konstruktion eller alternativ utformning

Utifrån en analys av de tjocka plattorna har beräkningar gjorts för att kunna få en uppfattning av hur mycket klimatbelastningar som skulle kunna sparas in på att slimma konstruktionen eller att utföra en alternativ lösning. En slimmad konstruktion består i att plattan bibehåller hela sin funktion men smalnas av där den kan vara smalare. Resultatet för detta är att man kan spara in cirka 20% av klimatbelastningarna.

En alternativ utformning av grunden innebär i detta fall att byggnaden grundläggs på fundament och får en tunnare platta som armeras ihop med fundamenten. En alternativ lösning skulle kunna spara in på mellan 25–50% av klimatbelastningarna från konstruktionen.

3.3.2 Varierad betonghållfasthet

En undersökning gjordes för att se hur en varierad hållfasthet för betongen påverkar konstruktionens klimatbelastning. För båda referensprojekten hade en justering av betonghållfastheten en väldigt liten påverkan på momentkapaciteten. Vilket innebar att armeringsinnehållet inte påverkades.

Skjuvbrottskapaciteten påverkades dock mer av förändringen av betonghållfasthet. Tjockleken reduceras med cirka 10% vid en övergång från C35/45 till C50/60. En reduktion av tjockleken gav en något ökad mängd armering för att klara momentkrafter i plattan, denna ökning var så liten att den kan ignoreras i sammanhanget. Minskningen av betongmängden blir dock för liten för att

kompensera för den ökade klimatbelastningen för en högre hållfasthetsklass. Rekommendationen för betonghållfasthet är att välja en så låg hållfasthet som möjligt.

3.3.3 Stansarmering

Då det visade sig i föregående kapitel att en minskad tjocklek inte nödvändigtvis medförde någon större ökning av armeringen i plattan finns det en vinning i att minska plattjockleken. Då tjockleken till stor del bestäms av skjubbrott kan stansarmering vara en lösning för att minska tjockleken på plattan.

Vid beräkning på referensobjekten kunde plattjockleken minskas med 10–15% vid inläggning av stansarmering.

Denna lösning medför en ökad mängd armering i plattan, dels armering för att ta upp momentkrafter, men även stansarmeringen. Även en ökning av arbetstid tillkommer för att lägga in armeringen, vilket är anledningen till att denna lösning ej brukar användas även om den medför en betydande besparing ur miljösynpunkt.

3.3.4 Delad betonggjutning

Ofta förekommer högre krav i form av exponeringsklasser på ovansidan av betongen än på undersidan då man har parkering på plattan. Genom att dela in plattan och gjuta den nedre delen med en betong som har lägre klimatbelastning och gjuta den övre delen med en betong som klarar högre exponeringsklasser kan klimatpåverkan reduceras.

För referensprojekten beräknades det att de översta 100 mm gjöts med betongen som valts för att skydda armeringen tillräckligt, resten gjöts i en betong avsedd för lägre exponeringsklasser. Reduktionen av klimatbelastningar blev cirka 5%.

3.3.5 Livslängdsanpassning

Vid dimensionering av betongkonstruktioner används oftast en rekommendation att dimensionera konstruktioner som är åtkomliga för inspektion och underhåll för en 50 års livslängd. Övriga konstruktioner dimensioneras ofta för 100 års livslängd. Ur perspektivet över hela konstruktionens livscykel har det undersökts om det inte kan vara lämpligare att dimensionera även exponerade konstruktioner för 100 års livslängd för att undvika eller försena kostsamma reoveringar av konstruktioner.

Tabell 3 Undersökning av livslängdsdimensionering för 1000mm platta.

Exponeringsklass	XC1		XC3/4		XD3	
Betong hållfasthetsklass	C25/30		C30/37		C35/45	
Livslängdsklass	L50	L100	L50	L100	L50	L100
Sprickkrav	-	0,45 mm	0,40 mm	0,30 mm	0,20 mm	0,15 mm
Täckskikt för armering	20mm	20 mm	25mm	30 mm	40 mm	45 mm
<u>Dimensionering för brott</u>						
Ändring av bärrighet vid bibehållen armering	-	0%	-	0%	-	-1%
Ändring av armering för att uppnå originell bärrighet	-	0%	-	0%	-	1%
<u>Dimensionering för bruk</u>						
Ändring av bärrighet vid bibehållen armering	-	0%	-	-5%	-	-30%
Ändring av armering för att uppnå originell bärrighet	-	0%	-	4%	-	25%

Tabell 4 Undersökning av livslängdsdimensionering för 400mm platta.

Exponeringsklass	XC1		XC3/4		XD3	
Betong hållfasthetsklass	C25/30		C30/37		C35/40	
Livslängdsklass	L50	L100	L50	L100	L50	L100
Sprickkrav	-	0,45 mm	0,40 mm	0,30 mm	0,20 mm	0,15 mm
Täckskikt för armering	20mm	20 mm	25mm	30 mm	40 mm	45 mm
<u>Dimensionering för brott</u>						
Ändring av bärlighet vid bibehållen armering	-	0%	-	-2%	-	-3%
Ändring av armering för att uppnå originell bärlighet	-	0%	-	1%	-	3%
<u>Dimensionering för bruk</u>						
Ändring av bärlighet vid bibehållen armering	-	0%	-	-27%	-	-27%
Ändring av armering för att uppnå originell bärlighet	-	0%	-	20%	-	18%

I Tabell 3 och Tabell 4 redovisas resultaten för beräkningarna. För båda referensprojekten sågs det att den största påverkan uppstod när betongkonstruktionen överskred sprickkraven och extra armering för att hantera sprickor behövde läggas in. Detta blir speciellt noterbart i högre exponeringsklasser. Utifrån detta kan bedömningen göras att en kontroll alltid bör göras vid dimensionering om en konstruktion kan dimensioneras för en 100 års livslängd kan göras då det inte behöver medföra några stora förändringar, utan endast större täckskikt.

3.4 Plintfundament och grundbalkar

3.4.1 Varierande hållfasthetsklass

En undersökning gjordes för att se hur en varierad hållfasthet för betongen påverkar konstruktionens klimatbelastning.

En justering av betonghållfastheten hade en väldigt liten påverkan på momentkapaciteten för fundamenten. Vilket innebar att armeringsinnehållet inte påverkades. Vid en förändring av betonghållfastheten från C35/45 till C50/60 kunde tjockleken dock minskas med cirka 10%. Minskningen av betongmängden blir dock för liten för att kompensera för den ökade klimatbelastningen för en högre hållfasthetsklass. Rekommendationen för betonghållfasthet är att välja en så låg hållfasthet som möjligt.

3.4.2 Rationellt byggande

I alla projekt som undersökts har utformningen av grunden till stor del anpassats för att få en så produktionsvänlig lösning som möjligt. Detta inkluderar anpassningar som att ha typfundament för att få en större upprepbarhet i byggnationen. I stor utsträckning försöks höjder och kantlinjer linjera för att underlätta formsättning. Dessa åtgärder driver dock upp mängden betong som används. Vid en undersökning av utförda projekt kunde det beräknas att mängden betong skulle kunna minskas med cirka 25% om en mer miljöanpassad konstruktion valdes.

3.4.3 Slimmande av fundament

Vid en undersökning av genomförda projekt noterades det också att många fundament är större än vad som egentligen krävs. Dessa konstruktioner slimmas sällan. Anledningar till detta som identifieras inkluderar bland annat:

- På grund av pressade tidsplaner dimensioneras grundkonstruktioner innan slutgiltiga last har erhållits från stomkonstruktör. Detta leder till att man lägger till en säkerhet för att inte behöva ändra konstruktioner när laster mottagits.
- Projektering för delar högre upp i hus pågår fortfarande när grund byggs vilket gör att det läggs på en säkerhet för att ha en möjlighet att hantera förändringar av förutsättningarna.
- Konstruktörer tar fram lösningar som fungerar och tar inte hänsyn till hur klimatbelastningen blir vid dimensionering om det inte efterfrågas.
- Entreprenörer tror att konstruktioner som tas fram är optimerade och ställer inga specifika krav på slimmade konstruktioner.

Den exakta nyttan av att slimma konstruktioner varierar mycket från projekt till projekt och beroende på de specifika förutsättningarna, men en uppskattning på betongmängden som kan sparas ligger på 10–30%.

Det finns även möjlighet att spara in på klimatbelastningar genom vissa alternativa utformningar. Användning av stansarmering i plintfundament sparar in på cirka 10% av utsläppen. Att gjuta sluttande fundament skulle kunna spara in på upp till 25% av utsläppen.

3.5 Källarväggar

Källarytterväggar för större byggnader, så som flerfamiljshus och kontor, har en bärande funktion och utsätts för såväl vertikal som horisontal last. Förutom strukturella krav har väggarna även funktionella krav som måste beaktas vid dimensionering, som exempelvis täthet, beständighet, avsett användningsområde samt produktionsanpassning. De funktionella kraven kan ha stor påverkan på konstruktionens utformning och geometri. I projektet studeras hur definitionen av funktionskraven kan påverka källarväggars utformning och i förlängningen påverkan på klimatutsläppen. Även vertikal belastning påverkar väggens utformning, men studeras inte vidare i analysen.

3.5.1 Sprickbegränsning

Det finns flera anledningar till att begränsa sprickor i en källaryttervägg. Konstruktionen ska kunna uppfylla sin funktion, ha tillräcklig beständighet, uppfylla estetiska krav och uppfylla täthetskrav. För konstruktioner utan täthetskrav (visst läckage tillåts) ska sprickor begränsas enligt Tabell 5 (EKS11).

Tabell 5. Acceptabla sprickbredder enligt EKS11.

Exponeringsklass	Föga korrosionskänslig		
	L100	L50	L20
X0	-	-	-
XC1	0.45	-	-
XC2	0.4	0.45	-
XC3, XC4	0.3	0.4	-
XS1, XS2, XD1, XD2	0.2	0.3	0.4
XS3, XD3	0.15	0.2	0.3

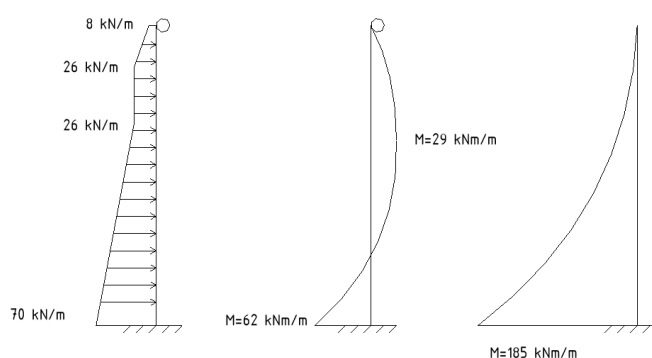
För konstruktioner där viss fukt tillåts bestäms acceptabel sprickbredd i förhållande till det vattentryck som väggen utsätts för. Sprickbredder kan i detta fall behöva begränsas till $w_k =$

0.05 mm. För högre täthetskrav bör uppkomsten av genomgående sprickor förhindras helt och ytterligare tätskikt kan vara nödvändigt för att uppnå en helt vattentät konstruktion.

Det finns flera typer av sprickor som behöver beaktas för att uppfylla de krav som ställs på konstruktionen, bland annat plastiska krympsprickor, böjsprickor och krympsprickor. Plastiska krympsprickor uppkommer ofta inom ett par timmar efter att betongen börjat härda då vatten snabbt lämnar betongen. Dessa sprickor propagerar ofta från ytan men kan även påverka hela tvärsnittet av en konstruktion, dock ofta med liten sprickvidd. Att konstruktionsmässigt minska dessa sprickor kan vara svårt. Ett effektivt sätt att minska risken för uppkomsten av denna typ av sprickor är att begränsa evaporationen från betongen.

Böjsprickor i betongen uppkommer från momentbelastning. I källarväggar är dessa sprickor ofta horisontellt orienterade över den yta vart väggen utsätts för ett moment som överskrider betongens draghållfasthet. För att minska antalet och sprickornas bredd kan flera tillvägagångssätt användas. Bland annat kan väggens tjocklek ökas, vilket minskar dragspänningen i betongen och således sprickorna. Att öka armeringsandel i väggen minskar inte uppkomsten av sprickor men kan minska den sprickbredd som slutligen erhålls. Ytterligare en aspekt att ta hänsyn till är den belastning och randvillkor som väggen designas för, samt i vilket skede som väggen belastas. Till exempel har tiden för återfyllnad stor påverkan på vilken belastning som väggen ska dimensioneras för. Som illustreras i Figur 1, ökar momentbelastningen för väggen med faktor tre, om återfyllnad görs före väggens övre del har fått ett horisontellt stöd (för källarväggar ofta i form av ett bjälklag).

Krympsprickor uppkommer i konstruktioner som är utsatta för tvångskrafter. Dessa krafter uppkommer genom en volymförändring i betongen. Om betongen samtidigt inte tillåts att röra sig fritt, leder detta till dragspänningar i betongen. Det kan vara mycket svårt att förhindra dessa spänningar från att uppkomma och vanligtvis är tillvägagångssättet att sprida ut spänningarna med hjälp av armering för att på så sätt minska sprickornas bredd. Sprickorna är ofta vertikalt orienterade och det är den horisontella armeringen i väggen som har till uppgift att sprida ut lasten. Värt att notera, är att rörelsens storlek är direkt beroende av betongens sammansättning samt den miljö betongen är i kontakt med.



Figur 11. Visar en källarvägg utsatt för ett lastfall. Beroende på hur randvillkoren definieras (när återfyllnad sker) blir momentbelastningen i väggen annorlunda.

3.5.2 Definiering av exponeringsklass

Exponeringsklass är ett begrepp som har i syfte att klassificera den miljö som betongkonstruktionen är utsatt för. Denna ska ta i hänsyn till vilka nedbrytningsmekanismer som är relevanta för en specifik miljö samt hur detta påverkar konstruktionens livslängd. Exponeringsklassen är avgörande för bland annat minsta tillåten betongkvalitet, minsta täckande betongskikt samt största tillåtna

sprickvidd. Syfte är att skydda armeringen i konstruktionen mot korrosion för att säkerställa erforderlig livslängd. Således bör val av exponeringsklass göras med aktsamhet, då det dels kan få stor påverkan på konstruktionen. Ett för högt val av exponeringsklass leder till att betong innehållande mer cement används och mycket material används, medan en för låg klass kan innebära att konstruktionens livslängd blir lägre än förväntat.

I studerade referensprojekt har noterats att exponeringsklass i vissa fall väljs konstant över hela källarytterväggar. Detta trots att miljön som väggen exponeras för varierar mycket över väggens höjd samt beroende på vilken sida av väggen som studeras. Att försöka definiera exponeringsklass mer omsorgsfullt borde således kunna reducera mängden material som åtgår för att uppföra en källarvägg och således även minska mängden koldioxid.

3.5.3 Källarväggars tjocklekar

En betongkonstruktions momentkapacitet är linjärt beroende av hävarmaren till armeringen. Således är bärförmågan i en källarvägg beroende av dess tjocklek, förutsatt att armeringsinnehållet förblir konstant.

I studerade referensprojekt har observerats att vissa källarväggar har en kapacitet som ofta är mycket större än det dimensionerande lastfallet, alternativt hade väggen kunnat göras tunnare genom att öka armeringsinnehållet. En förklaring till denna överdimensionering kan vara att underlätta för gjutningsprocessen. För att gjutning ska kunna utföras på ett effektivt sätt, är ofta en stor andel av väggen avsedd just till att föra ner gjutslangen. Storleken på slangen beror i sin tur på betongens stenstorlek (Thomas Betong, 2021). Genom att föreskriva med mindre stenstorlek på betongen tillåts en mindre slangdiameter, vilket innebär att utrymmet för gjutning i väggen kan minskas.

Tabell 6. Slangstorleks beroende av stenstorlek (Thomas Betong, 2021)

Stenstorlek (d_{max}) [mm]	Invändig diameter [mm]	Utvändig diameter [mm]
8	51	69
16 reducerat	63	85
16	76	100
32	102	128
32	127	155

Observera att resonemang ovan endast tar hänsyn till horisontella laster. Vertikala lastfall kan däremot innebära att vägg tjockleken ökas. I det flesta fall görs det lokalt där lasterna förs ner i grunden, och inte över hela väggens längd.

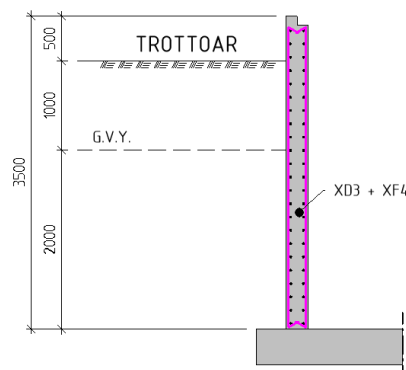
3.5.4 Fallstudie

För att studera hur klimatbelastningen påverkas av definieringen av exponeringsklass, samt valet av föreskriven stenstorlek i betongen, har en fallstudie utförts. Bestämning av betongkvalitet för angiven exponeringsklass (mer exakt maximal $v_{ct_{ekv}}$), täckande betongskikt och acceptabla sprickbredder görs i enlighet med EKS 11. I studien beaktas en godtycklig källaryttervägg. Utrymmet i källarlokalen är tänkt som garage. Väggens höjd antas vara 3,5 m med återfyllnad upp till 3 m, grundvattenytan återfinns på ett djup av 1 m under mark. Väggen byggs intill en trottoar och blir därav belastad en yttre last. Observera, i följande fall har endast sedvanlig betong och armering beaktats. Resultaten bör dock uppvisa samma procentuella förhållande oberoende av om miljöförbättrande material används.

3.5.4.1 Fall A - Referensvägg

Ett referensfall studeras där samma exponeringsklass är föreskriven för hela väggen och ingen stenstorlek har angivits, se Figur 12. Utifrån exponeringsklass kan betongkvalitet och geometri fastställas. Då ingen stenstorlek finns föreskriven, får antas att $d_{\max} = 32$ mm. I Tabell 7 presenteras definierade förutsättningar för referensfallet.

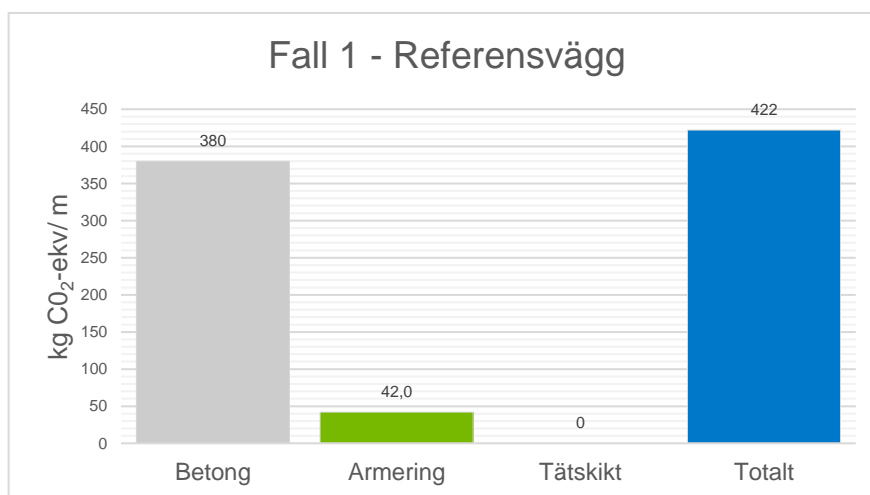
REFERENS



Figur 12: Schematisk skiss över källarytterväggs geometri samt angiven exponeringsklass.

Tabell 7. Definierade förutsättningar för referensväggen.

Fall A - Referensvägg		
Stenstorlek:	32	mm
Slangdiameter:	155	mm
Täckskikt utsida:	55	mm
Täckskikt insida:	55	mm
Väggtjocklek:	340	mm
Betongkvalitet:	C40/50	-

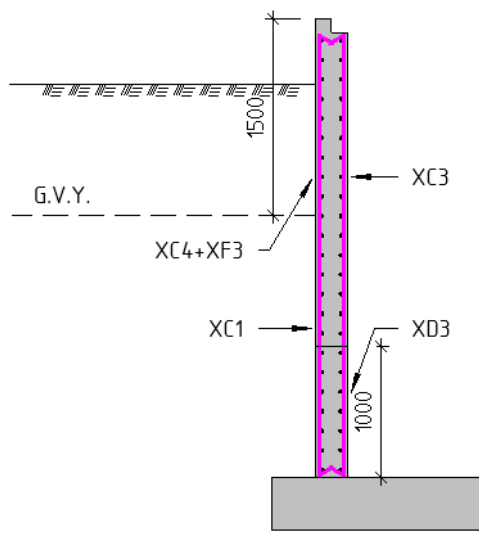


Figur 13: Visar klimatbelastning i CO₂-ekvivalenter per m för referensväggs beståndsdelar.

Resultatet visar att väggens klimatbelastning mestadels kommer från betongen (cirka 90%) medan armeringen endast står för cirka 10% av utsläppen.

3.5.4.2 Fall B – Detaljerad indelning i flera exponeringsklasser

En alternativ utformning studeras för referensväggen där exponeringsklassen anpassas efter djup och placering för de olika delarna av väggen, se Figur 14. Schematisk skiss över hur indelning av exponeringsklasser görs. Figur 14. Genom uppdelningen av exponeringsklass kan betongen gjutas med olika betongkvalitet, vilket gör att en lägre kvalitet kan användas för väggens övre del. En lägre betongkvalitet innebär även att krympningen blir mindre, vilket leder till minskad horisontell armering. Ytterligare en effekt av lägre exponeringsklass är att tätskiktet kan minskas, vilket leder till en minskad total vägg tjocklek. Utifrån exponeringsklass fastställs betongkvalitet och geometri för väggens olika delar, se Tabell 8 nedan.



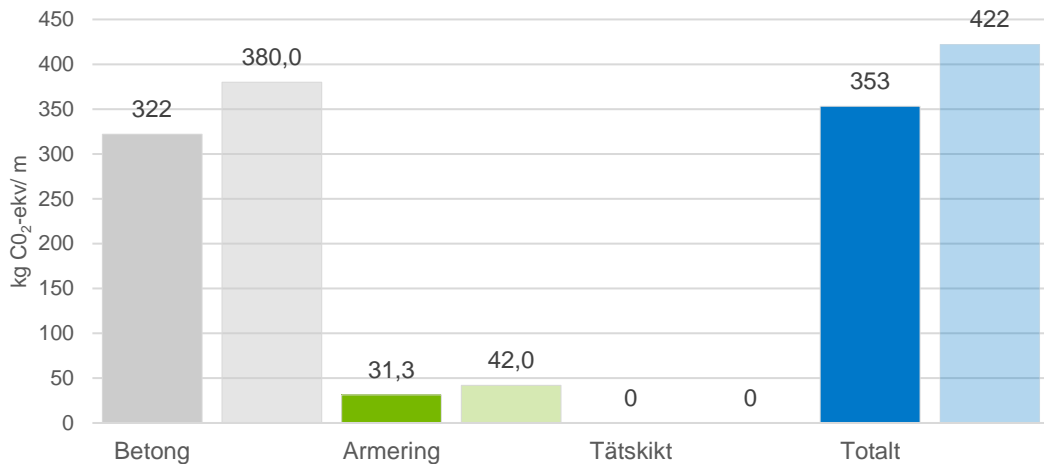
Figur 14. Schematisk skiss över hur indelning av exponeringsklasser görs.

Tabell 8. Definierade förutsättningar för fall B med varierad exponeringsklass.

Fall B - Detaljerad indelning i exponeringsklasser		
Stenstorlek	32	mm
Slangdiameter	155	mm
Täckskikt utsida	35	mm
Täckskikt insida	55	mm
Vägg tjocklek	320	mm
Betongkvalitet UK	C40/50	-
Betongkvalitet ÖK	C30/37	-

Resultatet i Figur 15 visar att en mer detaljerad indelning i olika exponeringsklasser ger en minskning av utsläppen per meter vägg med cirka 16%. Från diagram kan också utläsas att materialåtgången både för betong och armering blir lägre.

Fall B - Indelning i flera exponeringsklasser



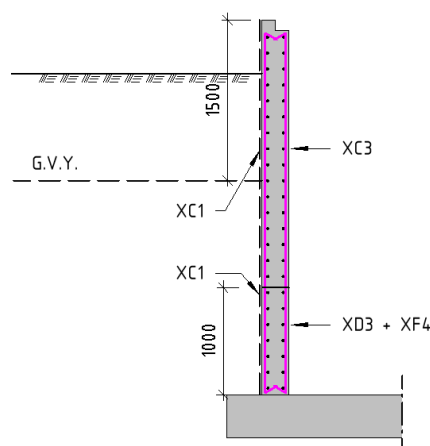
Figur 15. Klimatbelastning i CO₂-ekvivalenter för en källarvägg med detaljerad indelning i olika exponeringsklasser för den studerade referensväggen (markerat i halvton).

3.5.4.3 Fall C - Tätad utsida

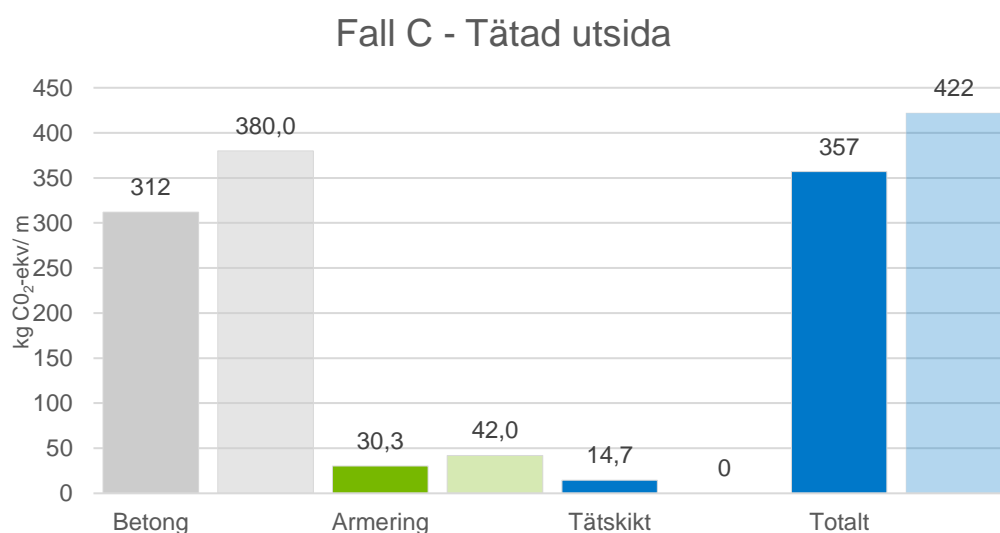
Utifrån resultatet ovan ansågs en intressant vidare studie vara att fortsätta sänka exponeringsklassen för en ytterligare minskad klimatbelastning, men det kräver kompletterande åtgärder. I denna studie tätas utsida med ett tätskikt så att hela väggen kan hänföras till en lägre exponeringsklass, se figur 16. Som i fallet ovan leder den minskade exponeringsklassen till ytterligare minskat tätskikt. I Tabell 9 presenteras definierade förutsättningar för referensfall 3.

Tabell 9. Definierade förutsättningar för fall C med en tätad källaryttervägg.

Fall C - Ytterligare minskad exponeringsklass		
Stenstorlek	32	mm
Slangdiameter	155	mm
Täckskikt utsida	25	mm
Täckskikt insida	55	mm
Väggjocklek:	310	mm
Betongkvalité UK	C40/50	-
Betongkvalité ÖK	C30/37	-



Figur 16: Schematisk skiss över indelning av exponeringsklass.



Figur 17. Klimatbelastning i CO₂-ekvivalenter för en källarvägg med ytterligare minskad exponeringsklass i förhållande till den studerade referensväggen (markerat i halvton).

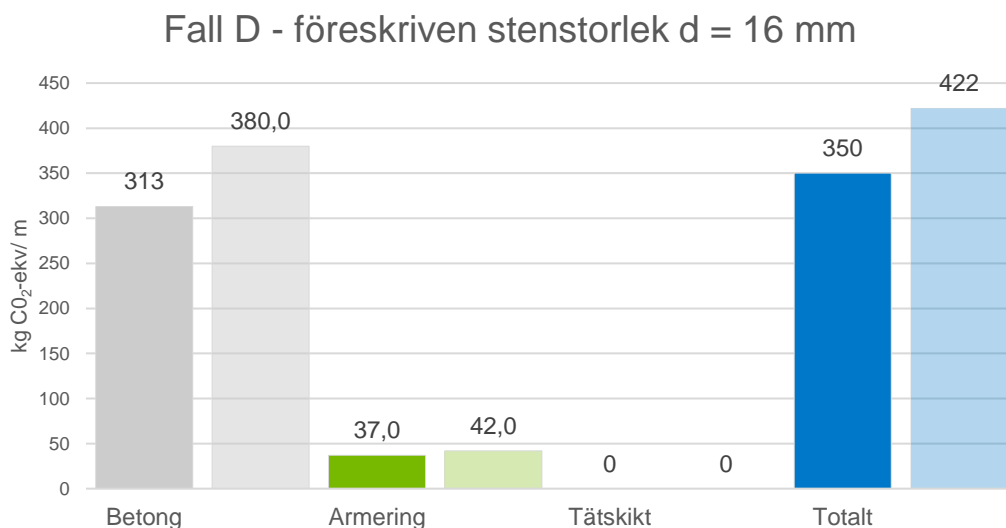
Resultatet visar att ytterligare minskning av betong och armering blir möjlig med studerad åtgärd. Den totala minskningen av CO₂e (cirka 15%) blir dock inte lika stor som för föregående studerade fall. Detta på grund av att tätskiktet bidrar till en ökning av utsläppen. Att tillföra material för att minska ytterligare på exponeringsklasserna behöver således inte innebära en nettominskning av klimatbelastningen.

3.5.4.4 Fall D - Föreskriven stenstorlek

I detta fall studeras referensväggen, med undantag av att stenstorleken i betongen föreskrivs till $d_{\max} = 16$ mm, se Tabell 10. Detta ger möjligheten till att använda en mindre slang vid gjutning och således att minska väggens tjocklek. Resultatet i figur 6 visar att föreskriven stenstorlek minskar klimatbelastningen med cirka 17%, förutsatt att väggens tjocklek justeras efter en minskad slangdiameter. Värt att notera är att mängden armering minskar med cirka 10% trots att sprickkraven inte ändrats. Förklaringen till detta är att minskning av väggens tvärsnitt medför en minskning i den minimiarmering som krävs.

Tabell 10. Definierade förutsättningar för fall D med justerad föreskriven stenstorlek.

Fall D - Föreskriven stenstorlek		
Stenstorlek	16	mm
Slangdiameter	100	mm
Täckskikt utsida	55	mm
Täckskikt insida	55	mm
Vägg tjocklek	280	mm
Betongkvalité	C40/50	-



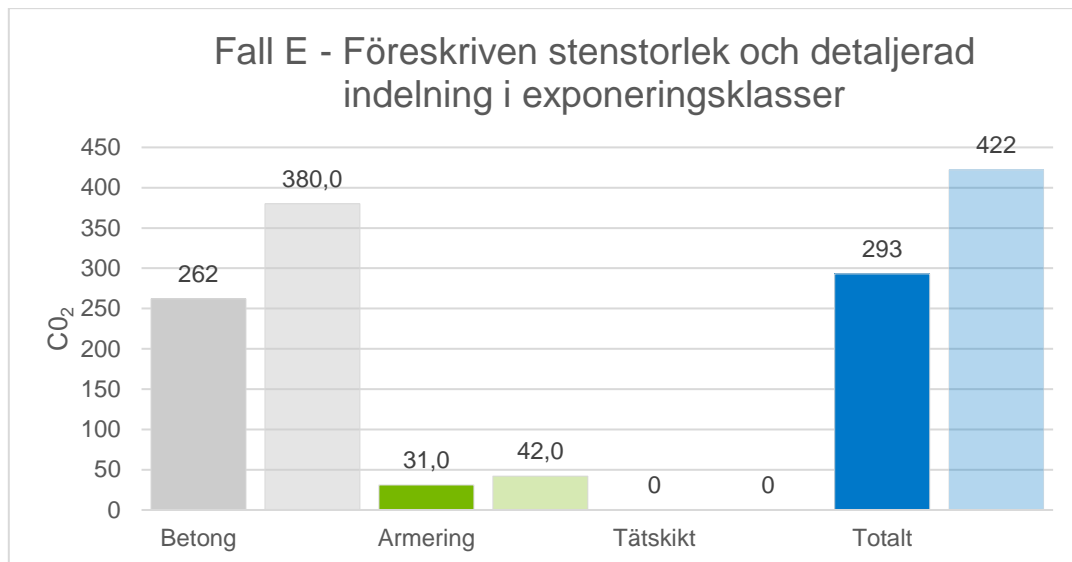
Figur 6. Klimatbelastning i CO₂-ekvivalenter för en källarvägg med ytterligare minskad exponeringsklass i förhållande till den studerade referensväggen (markerat i halvton).

3.5.4.5 Fall E - Föreskriven stenstorlek med detaljerad indelning i flera exponeringsklasser

I fall E studeras en vägg med både föreskriven stenstorlek och detaljerad indelning av exponeringsklasser, se Figur 14.

Tabell 11. Definierade förutsättningar för fall E med föreskriven stenstorlek och en indelning av väggen i flera exponeringsklasser.

Fall E - Föreskriven stenstorlek och detaljerad indelning av exponeringsklass		
Stenstorlek	16	mm
Slangdiameter	100	mm
Täckskikt utsida	35	mm
Täckskikt insida	55	mm
Vägg tjocklek	260	mm
Betongkvalité UK	C40/50	-
Betongkvalité ÖK	C30/37	-



Figur 7. Visar klimatbelastning i CO₂-ekv för en källarvägg med ytterligare minskad exponeringsklass i förhållande till den studerade referensväggen (markerat i halvton).

4 SLUTSATSER

Sammanfattningsvis är det konkreta rådet till entreprenören utifrån materialanalysen att väga in samtliga material i optimeringen av koldioxidutsläpp och att göra en enskild analys för varje materialtyp innan ett beslut tas. Även förhållandevis små materielgrupper som isolering kan ge både kostnads- och råmaterialbesparingar. I optimeringen bör även inverkan från transporter inkluderas då eventuella besparingar under tillverkningskedet kan ersättas av transportutsläpp, som exempelvis för den gröna armeringen. Fler faktorer än inblandning av slagg bör analyseras i valet av betong då även olika hållfasthetsklasser, konstruktionstjocklekar och armeringsmängder bör inkluderas i beslut av betongtyp.

Det krävs en kunskap om vad val har för effekter redan vid ett tidigt skede för att kunna få med sig detta vid en fortsatt projektering då förändringar senare i processen är avsevärt mycket svårare att göra. Detta ställer krav på att det i konceptstadiet för utformning av byggnader finns en förståelse för vad val har för miljöpåverkan.

Vid detaljutformning av konstruktioner har det framkommit att det finns stora klimatbesparingar att göra. En stor del av besparingarna måste göras på bekostnad av produktionsvänlighet och en längre byggtid. Dock bör det fortfarande finnas betydande besparingar som kan göras utan att påföra större besvär för produktion.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Boverket (2019) *Vägledning om LCA för byggnader*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/> [Hämtad 2021-12-08]
- EKS 11 (2019) BFS 2019:1 *Boverkets föreskrifter om ändring i Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*. Boverket.
- Erlandsson, M.; Malmqvist, T.; Francart, N. & Kellner, J. (2018) *Minskad klimatpåverkan från nybyggda flerbostadshus*. Svenska Byggbranschens utvecklingsfond, projekt 1335.
- Favier, A.; De Wolf, C.; Scrivner, K. & Habert, G. (2018) *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry. Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. Zürich: ETH.
- Gustafsson, A. (2019); *Trägrund*. <https://www.bioinnovation.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2018/11/19-11-14-trgrund-teknik-egenskaper-produktion.pdf>
- Larsson, M.; Erlandsson, M.; Malmqvist, T. & Kellner, J. (2016) *Byggandets klimatpåverkan. Livscykelberäkning av klimatpåverkan för ett nyproducerat flerbostadshus med massiv stomme av trä*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Larsson, R. & Andersson, R. (2014) Materialtransporter i byggandet. *Husbyggaren*. Nr 3, ss. 22-24.
- Liljenström, C.; Malmqvist, T.; Erlandsson, M.; Fredén, J.; Adolfsson, I.; Larsson, G. & Brogren, M. (2015) *Byggandets klimatpåverkan - Livscykelberäkning av klimatpåverkan och energianvändning för ett nyproducerat energieffektivt flerbostadshus i betong*. Svenska Byggbranschens utvecklingsfond, projekt 12912.
- Purnell, P. (2013) The Carbon Footprint of Reinforced Concrete. *Advances in Cement Research*. 25(6), ss. 362-368.
- Ruuska, A. & Häkkinen T. (2014). Material Efficiency of Building Construction. *Buildings*. 4, ss. 266-294.
- Siddique, R. & Bennacer, R. (2012) Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*. 69, ss. 29–34.
- Sidenmark, J. & Vlassopoulou, E. (2021); *Inledande studie - Alternativa material för småhusgrunder*. https://energieffektivasmahus.se/wp-content/uploads/2021/06/Besma-inledande-studie-Smahusgrund-av-olika-material_2021-05-05.pdf
- Svensk betong (2017) *Betong och klimat – En rapport om arbetet för klimatneutral betong*. Svensk betong.
- Thomas betong (2021) *Storlek på slang för betongpumpning*. Hämtat från: <https://thomasbetong.se/vart-erbjudande/betongpumpning> (Hämtat: 2021-10-25)

BILAGOR

Bilaga 1 – Beräkningsdel 1

Tabell B:1. Förutsättningar och uppbyggnad för referensprojekten.

Ref.	Byggnad	Grundläggning	Konstr. del	Uppbyggnad
1	Flerbostads- hus	Plattgrundläggning	Grundplatta	<ul style="list-style-type: none"> • 150 mm anläggningsbetong C35/45 XC4 vct 0.4 • #Φ12s150 armering, Celsa Nordisk (centriskt placerad) • 300 mm EPS S80
2	Kontor	Plattgrundläggning med källare	Grundplatta	<ul style="list-style-type: none"> • 400 mm anläggningsbetong C35/45 XD3 vct 0.4 • #Φ20s150 armering, Celsa Nordisk (underkant och överkant) • 50 mm grovbetong
			Källarytter- vägg	<ul style="list-style-type: none"> • 270 mm anläggningsbetong C35/45 XD3+XF4 vct 0.4 • #Φ16s150 armering, Celsa Nordisk (insida och utsida) • 100 mm isodrän
3	Kontor	Plattgrundläggning med källare	Grundplatta	<ul style="list-style-type: none"> • 1000 mm anläggningsbetong C35/45 XD3 (UK)+XC3 (ÖK) vct 0.4 • #Φ16s125 armering, Celsa Nordisk (underkant och överkant) • 50 mm grovbetong
			Källarytter- vägg	<ul style="list-style-type: none"> • 300 mm anläggningsbetong C35/45 XD3+XF3 vct 0.4 • #Φ16s150 armering, Celsa Nordisk, insida • #Φ12s150 armering, Celsa Nordisk, utsida • 100 mm XPS • Tätskikt, Preprufe

B:2. Resultat från analysen

Referensprojekt 1 Flerbostadshus	Koldioxidutsläpp						Kostnad		
	Material [kg CO2-ekv]	Transport, medelvärdet [kg CO2-ekv]	Totalt [kg CO2-ekv]	Skillnad [kg CO2-ekv]	Prisskillnad, material [%]	Prisskillnad, transport [%]	Totalt prisskillnad [%]		
1. Standardvärdet	79	3	82	-	-	-	-		
2. Klimatförbättrad betong	64	3	67	-15	1%	0%	1%		
3. Klimatförbättrad armering	77	4	81	-0,4	0%	44%	4%		
4. Klimatförbättrad isolering	78	3	81	-0,4	0%	3%	-5%		
5. Samtliga åtgärder	62	4	66	-16	-19%	35%	-1%		
Referensprojekt 2 Kontor, grundplatta	Koldioxidutsläpp						Kostnad		
Material [kg CO2-ekv]	Transport, medelvärdet [kg CO2-ekv]	Totalt [kg CO2-ekv]	Skillnad [kg CO2-ekv]	Prisskillnad, material [%]	Prisskillnad, transport [%]	Totalt prisskillnad [%]			
1) Standardvärdet	249	9	258	-	-	-	-		
2. Klimatförbättrad betong	210	9	219	-39	1%	0%	1%		
3. Klimatförbättrad armering	239	15	254	-4	0%	90%	6%		
4) Samtliga åtgärder	220	15	234	-24	7%	90%	11%		
Referensprojekt 2 Kontor, källarytervägg	Koldioxidutsläpp						Kostnad		
Material [kg CO2-ekv]	Transport, medelvärdet [kg CO2-ekv]	Totalt [kg CO2-ekv]	Skillnad [kg CO2-ekv]	Prisskillnad, material [%]	Prisskillnad, transport [%]	Totalt prisskillnad [%]			
1) Standardvärdet	159	4	163	-	-	-	-		
2. Klimatförbättrad betong	133	4	137	-26	1%	0%	1%		
3. Klimatförbättrad armering	153	9	162	-1	0%	174%	6%		
4) Alternativt tätskikt	169	6	175	12	-3%	66%	-1%		
5) Samtliga åtgärder	127	8	135	-28	1%	126%	5%		
Referensprojekt 3 Kontor, grundplatta	Koldioxidutsläpp						Kostnad		
Material [kg CO2-ekv]	Transport, medelvärdet [kg CO2-ekv]	Totalt [kg CO2-ekv]	Skillnad [kg CO2-ekv]	Prisskillnad, material [%]	Prisskillnad, transport [%]	Totalt prisskillnad [%]			
1) Standardvärdet	521	14	535	-	-	-	-		
2. Klimatförbättrad betong	425	14	438	-97	2%	0%	2%		
3. Klimatförbättrad armering	514	18	532	-3	0%	62%	3%		
4) Samtliga åtgärder	418	18	435	-99	2%	62%	3%		
Referensprojekt 3 Kontor, källarytervägg	Koldioxidutsläpp						Kostnad		
Material [kg CO2-ekv]	Transport, medelvärdet [kg CO2-ekv]	Totalt [kg CO2-ekv]	Skillnad [kg CO2-ekv]	Prisskillnad, material [%]	Prisskillnad, transport [%]	Totalt prisskillnad [%]			
1) Standardvärdet	178	4	183	-	-	-	-		
2. Klimatförbättrad betong	142	4	146	-37	1%	0%	1%		
3. Klimatförbättrad armering	174	7	181	-2	2%	65%	6%		
4) Alternativt tätskikt	168	4	172	-10	6%	0%	5%		
5) Samtliga åtgärder	134	7	142	-41	6%	66%	10%		