

Klimatsmart betongbyggande

-Reducerad klimatpåverkan från
betongstommen i Kv. Kungsörnen



Viktor Hellström
Erik Bennermark



Klimatsmart betongbyggande

- Reducerad klimatpåverkan från
betongstommen i Kv. Kungsörnen

Viktor Hellström
Erik Bennermark

Examensarbete

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för Bygg- och miljöteknologi
Lunds Universitet
Box 118
221 00 Lund

© Viktor Hellström & Erik Bennermark

ISRN LUTVDG/TVBH—21/5107—SE(90)

Institutionen för bygg- och miljöteknologi

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 LUND

Titel:

Klimatsmart betongbyggande, reducerad klimatpåverkan från betongstommen i Kv. Kungsörnen

Författare:

Viktor Hellström

Erik Bennermark

Handledare:

Stephen Burke, Tekn. Dr., Adjungerad Universitetslektor, Byggnadsfysik, LTH och Ledande teknisk specialist, NCC

Nilla Olsson, Tekn. Dr., Ledande specialist, NCC

Examinator:

Lars-Erik Harderup, Tekn. Dr., Universitetslektor, Byggnadsfysik, LTH

Nyckelord:

Klimatpåverkan, betong, cement, EPD, klimatdeklaration, flerbostadshus, byggsektorns miljöberäkningsverktyg, koldioxidekvivalent, klimatberäkning.

Abstract

One of the main sustainability goals in Sweden is to reduce the nations greenhouse gas emissions to a net-zero level by 2045. This is a national implementation of the Paris-Agreement. To achieve this goal measures need to be taken in all industrial sectors. The construction and real-estate sectors are responsible for about 22 % of Sweden's yearly territorial greenhouse gas emissions. The cement industry alone accounts for 5 to 7 %. About half of the emissions during a modern apartment-buildings lifecycle come from material and energy-demanding processes during the construction-phase. The other half is generated throughout the operational lifetime of the building.

The purpose of this master's thesis has been to identify and analyze measures taken to minimize the emission of CO_{2,equivalents} from the concrete structure in a specific apartment building, Kv. Kungsörnen in Helsingborg. The different participants in the concrete-part of the project and their ability to affect the emissions of the project have also been analyzed.

Through interviews with people involved in the project, a review of the blueprints and a visit to the construction site an overview of the project was achieved, and the measures taken by the participants were identified. The result on the carbon footprint from the measures taken were put in relation to general cases representing the emissions of a standard apartment building. The environmental impact of the different cases were calculated with "Byggsektorns miljöberäkningsprogram".

The following standard reference cases were investigated and compared to the actual project:

- Concrete-recipes
- Concrete-dimensions
- Amount of reinforcement
- Sound class C
- Reduced productiontime
- Impacts depending on time of the year

A reference scenario was summarized based on the individually studied reference cases. The calculated carbon footprint from this reference scenario corresponds well with generic data of similar modern structures. The results show that the carbon footprint from Kv. Kungsörnen has been reduced by about 40% compared to the reference scenario.

Additionally, a calculation of the carbonatization of the concrete in Kv. Kungsörnen was done and a comparison between carbon footprints from different methods of heating in the production phase were made.

This case study indicates the importance of collaboration between the different actors in an early stage of the construction process. The most important factor identified in the project was the chosen concrete. Primarily it is important to use concrete with optimized

strength and dimensions, this was achieved in the project by separate calculations on each concrete element. When the chosen concrete was discussed with the concrete supplier further changes were made to make it possible to use the climate reduced concrete, without compromising the performance of the concrete in the finished building.

Sammanfattning

Ett av Sveriges hållbarhetsmål är att senast 2045 inte generera några nettoutsläpp av växthusgaser. För att uppnå detta mål krävs kraftiga åtgärder inom alla sektorer. En av dessa är bygg- och fastighetssektorn som 2018 stod för ca 22 % av Sveriges territoriella utsläpp av växthusgaser. Enbart cementindustrin står för ca 5–7 %. Cirka hälften av klimatpåverkan från moderna flerbostadshus uppkommer i produktionskedet med dess ingående material och processer, återstående del genereras i drift- och slutskedet.

Syftet med denna rapport var att kartlägga och analysera vidtagna åtgärder för att minska klimatpåverkan från betongstommen i ett specifikt projekt med flerbostadshus, Kv. Kungsörnen i Helsingborg. Vidare undersöktes de olika involverade aktörerna och deras individuella möjligheter att påverka betongstommens klimatavtryck.

Genom projektspecifika intervjuer, granskning av projekthandlingar samt studiebesök skapades en bild av projektets utformning och de olika aktörernas bidrag. Utifrån detta identifierades genomförda åtgärder som minskade klimatpåverkan från betongstommen. För att beräkna vilken effekt respektive åtgärd skapat separerades åtgärderna i olika fall som jämfördes mot referensscenarion enligt rådande branschstandarder. Dessa jämförande beräkningar gjordes med hjälp av Byggsektorns miljöberäkningsprogram (BM).

Utformningen av det faktiska projektet jämfördes med följande fall baserade på rådande branschstandard:

- Betongrecept
- Betongdimensioner
- Armeringsmängder
- Ljudklass C
- Reducerad produktionstid
- Inverkan av årstid

Baserat på undersökta fall sammanställdes ett referensfall som antas representera hur Kv. Kungsörnen hade byggts utan specifik hänsyn till klimatpåverkan.

Utöver detta gjordes en karbonatiseringsberäkning för projektet för att uppskatta mängden koldioxid som återbinds till betongen under 100 år samt en jämförande beräkning av utsläpp kopplat till uppvärmningsmetoder under betongens uttorkningskede.

Fallstudien visar på vikten av samarbete mellan inblandade aktörer redan i ett tidigt skede av projekteringen för att gemensamt åstadkomma klimatförbättrande åtgärder och undvika att begränsa åtgärder för minskad klimatpåverkan.

Rapporten visar att det viktigaste momentet att utreda i projektet var den föreskrivna betongen. I första skedet är det viktigt att inte använda sig av betong med högre hållfasthetsklass än nödvändigt, detta uppnåddes genom att dimensionera varje byggdel separat efter gällande förutsättningar och laster. Då betongvalet sedan diskuterades med betongleverantören kunde föreskrifterna justeras ytterligare för att tillåta användandet av det alternativet med lägst klimatpåverkan utan att kompromissa med önskade egenskaper i den färdiga konstruktionen. Alla typer av betong kan klimatförbättras oavsett hållfasthet men en betong med högre hållfasthet genererar alltid en högre klimatpåverkan än en betong med lägre.

Även de övriga åtgärderna i projektet ledde till klimatreduceringar men inte i samma omfattning. Resultaten från beräkningarna i fallstudien visar att klimatpåverkan från betongstommen i Kv. Kungsörnen har reducerats med ca 40 % relativt det sammanställda referensfallet.

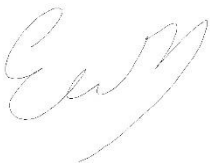
Förord

Vi vill rikta ett stort tack till NCC och LTH som har möjliggjort detta examensarbete. Vi vill också tacka Helsingborg hem och Betongindustri för deras engagemang och hjälp, slutligen vill vi tacka Betcrete för deras support. Vår tid på LTH har gett oss både kunskap och väckt ett intresse för hållbarhet och hur byggbranschen kommer att utvecklas under vår tid i branschen.

Vi vill specifikt tacka Stephen Burke, Nilla Olsson och Ludvig Dahlqvist för deras vägledning under projektets gång samt Johan Eriksson för all hjälp och sitt stora engagemang.

Vi hoppas att denna rapport är ett litet steg i rätt riktning mot ett mer klimatsmart byggande genom att bidra med viss vägledning om viktiga klimatpåverkande faktorer att ta hänsyn till vid bostadsbyggande med betong.

Lund i maj 2020



Erik Bennermark



Viktor Hellström

Innehållsförteckning

Abstract	iii
Sammanfattning	v
Förord	vii
Innehållsförteckning	ix
1 Inledning.....	1
1.1 Förkortningar & begrepp	1
1.2 Bakgrund	1
1.3 Projekt Kungsörnen	2
1.4 Syfte och Mål	5
1.5 Generella avgränsningar	5
2 Teori	7
2.1 Byggbranschens klimatpåverkan	7
2.2 Aktörer i byggsektorn	8
2.2.1 Cementproducent	8
2.2.2 Betongproducent	9
2.2.3 Projektörer	10
2.2.4 Beställare	12
2.2.5 Entreprenör	13
2.3 Klimatberäkningar	15
2.3.1 Samhällskrav	15
2.3.2 EN 15978: Hållbarhet för byggnadsverk, miljöprestanda för byggnader 15	
2.3.3 Beräkning av klimatpåverkan enligt Boverkets förslag	17
2.3.4 Förenklad beräkning av klimatpåverkan från betongstomme	18
2.3.5 Karbonatisering av betong	18
3 Metod.....	21
3.1 Identifiering av åtgärder för minskad klimatpåverkan	21
3.2 Klimatberäkning av betongstomme	21
3.2.1 Studerade fall	21
4 Projektspecifika intervjuer och handlingsstudier.....	23
4.1.1 Upphandling	23
4.1.2 Anbudsskede & Projektering	24
4.1.3 Produktion	25
5 Klimatberäkningar	27
5.1 Fall 1 – Kv. Kungsörnen.....	27
5.2 Fall 2 – Betong enligt branschstandard	29
5.3 Fall 3 – Dimensioner enligt branschstandard	30
5.4 Fall 4 – Armering enligt branschstandard	31
5.5 Fall 5 – Utformning enligt ljudklass C	32
5.6 Fall 6 – Reducerad produktionstid genom användande av betong med lägre vct 33	
5.6.1 Teoretisk beräkning av energibehov för uttorkning av betongen	38
5.7 Fall 7 – Inverkan av årstid	43
5.7.1 Klimatdata Helsingborg.....	43
5.7.2 Uppskattning av otätheter under produktionsskedet.....	44

5.7.3	Gjutningar.....	46
5.7.4	Golvläggning och målningsarbeten.....	47
5.7.5	Murning av tegelfasad.....	49
5.7.6	Beräknad skillnad i klimatpåverkan beroende av byggstart.....	49
5.8	Beräkning av karbonatisering.....	50
5.8.1	Beräkning enligt SS EN-16757.....	50
5.8.2	Kv. Kungsörnen, karbonatisering av betongstommen.....	51
6	Resultatsammanställning.....	55
6.1	Sammanställning av resultat från Fall 1-6b samt karbonatisering.....	55
6.2	Resultat Fall 6.....	57
6.3	Resultat Fall 7.....	58
6.4	Sammanställt referensfall.....	59
7	Diskussion.....	61
7.1	Val av betong.....	61
7.2	Utformning.....	62
7.3	Armering.....	63
7.4	Ljudkrav.....	63
7.5	Produktionstid.....	63
7.5.1	Betongval baserat på produktionstid och uttorkningskrav.....	64
7.5.2	Insatser för uttorkning.....	64
7.6	Inverkan av årstid.....	65
7.7	Karbonatisering.....	66
8	Slutsatser.....	67
9	Framtida studier.....	69
	Referenser.....	71
	Bilaga 1-Intervjufrågor.....	75

1 Inledning

1.1 Förkortningar & begrepp

Tabell 1. Förkortningar och begrepp som används i rapporten.

VHG	Växthusgaser, gaser som bidrar till den globala uppvärmningen [CO ₂ , ekv]
GHG	Green House Gas [CO ₂ , ekv]
GWP _{GHG}	Global Warming Potential
Klimatpåverkan	Utsläpp av växthusgaser [CO ₂ , ekv]
Klimatförbättrad	Reducerad klimatpåverkan i förhållande till rådande standard
VCT	Vatten-Cement-tal
VCT _{ekv}	Ekvivalent Vatten-Cement-tal
EPD	Environmental Product Declaration
LCA	Livscykelanalys
BTA	Bruttoarea
A _{temp}	Uppvärmad area innanför klimatskal, T>10°C
BM	Byggsektorns Miljöberäkningsverktyg
HVO	Hydrerad Vegetabilisk Olja
RF	Relativ Fuktighet
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CCS	Carbon Capture and Storage

1.2 Bakgrund

Den globala uppvärmningen utgör ett stort hot mot det moderna samhället. För att möta hotet undertecknades år 2015 Parisavtalet av världens länder. Detta avtal förbinder avtalsparterna att tillsammans minska utsläppen av växthusgaser till en nivå som innebär att jordens medeltemperatur ej ökar mer än 2°C jämfört med för-industriell nivå. Olika åtgärder för att nå detta mål har analyserats av IPCC. IPCC är FN:s klimatpanel som bildades 1988 för att samla och sprida vetenskapligt grundad kunskap om klimatförändringarna. Studierna visar att de globala utsläppen måste halveras till år 2030 jämfört med 1990 och vara nära noll år 2050 (IPCC, 2018).

Utifrån detta mål har regioner och länder utarbetat individuella handlingsplaner och mål. Sverige har som följd av Parisavtalet satt följande mål:

” Senast år 2045 ska Sverige inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, för att därefter uppnå negativa utsläpp. För att nå detta får kompletterande åtgärder tillgodoräknas. Utsläppen från verksamheter inom svenskt territorium ska vara minst 85 procent lägre än utsläppen år 1990.” (Boverket, 2018, s 30)

Utifrån detta övergripande mål har en mängd branschspecifika mål utarbetats. Bygg & fastighetsbranschen utgör en signifikant del av de globala koldioxidutsläppen och är en viktig del av de verksamheter som berörs i det ovanstående målet.

Tidigare var den större delen av utsläppen kopplade till uppvärmning och drift av befintliga byggnader, ofta genom fossila energikällor så som olja. Efter oljekrisen år 1973 uppmärksammades behovet av att minimera energibehovet för byggnader samt minska beroendet av uppvärmning genom olja. Sedan dess har det skett en påtaglig utveckling i frågor rörande byggnaders energieffektivitet, de senaste två decennierna ofta genom krav på EU-nivå. Minskningen av koldioxidutsläpp kopplat till uppvärmning och drift innebär att en allt större andel av byggnaders koldioxidavtryck utgörs av de byggnadsmaterial som används samt tillverkningen av dessa. Tillverkning av cement, som används i betong och andra cementbaserade produkter utgör i dagsläget en påtaglig del av byggsektorns utsläpp av koldioxid (Habert *et al.*, 2020).

Jordens befolkning beräknas öka från 7 till 10 miljarder fram till 2050 och ökningen väntas mestadels ske i städer i Asien och Afrika. Utöver befolkningsökningen fortsätter urbaniseringen världen över. Detta väntas leda till en ökad användning av cement och betong när dessa städer och dess infrastruktur ska utvidgas för att rymma så många fler. Åtgärder för minskad klimatpåverkan kopplat till betongkonstruktioner kan alltså ge stora positiva konsekvenser världen över. (Departemen of Economic and Social Affairs United Nation, 2018).

Som följd av denna utveckling har efterfrågan på så kallat ”klimatsmart” byggande, det vill säga byggande med fokus på reduktion av klimatpåverkan, ökat kraftigt och ett exempel på detta är projekt Kv. Kungsörnen i Helsingborg.

1.3 Projekt Kungsörnen

På uppdrag av Helsingborgshem bygger NCC Kv. Kungsörnen i centrala Helsingborg. Kvarteret består av 67 lägenheter samt lokaler fördelade på fyra huskroppar. Två av dessa är åtta våningar höga, se Figur 1, och resterande är tvåvåningshus, se Figur 2. Färdigställandet är planerat under vintern 2021/22. Samtliga hus uppförs med målsättning att minimera klimatpåverkan (Helsingborgshem, 2021). Upphandlingsformen är totalentreprenad och NCC ansvarar alltså för både projektering och produktion (NCC, 2021).

Klimatsmart betongbyggande



Figur 1. Visionsbild av Höghusen i Kv. Kungsörnen (Karin Petterssons Arkitektbyrå AB)



Figur 2. Visionsbild av låghusen i Kv. Kungsörnen (Karin Petterssons arkitektbyrå AB)

1.4 Syfte och Mål

Syftet med projektet är att kartlägga och analysera vidtagna åtgärder i projekt Kv. Kungörnen som gjorts för att minska klimatpåverkan kopplat till produktionen av betongstommen. Klimatpåverkan definieras i denna rapport som utsläpp av koldioxidekvivalenter i kg [CO_{2,ekv}]. Åtgärderna ska sammanställas så att deras påverkan kan jämföras och analyseras.

Klimatpåverkan från produktionsfasen ska beräknas för projektet och jämföras med olika fall baserat på skillnaderna mellan de vidtagna åtgärderna i projektet och rådande branschstandarder. Även en sammanställd beräkning ska genomföras där de olika fallen slås samman till ett referensfall som speglar hur projektet antas ha genomförts utan specifik hänsyn till klimatpåverkan.

1.5 Generella avgränsningar

- Rapporten fokuserar på produktionsskedet enligt modul A1-A5.1 i SS-EN 15978 (Ics, 2014) och tar inte hänsyn till drift eller rivningsskedet utöver karbonatisering av betongen som beräknas separat.
- Hänsyn tas endast till byggmaterialen betong, armering och material som ersätter betong som följd av att betongdimensionerna minskats i projektet.
- Ingen hänsyn tas till ekonomiska aspekter.
- Ingående data från NCC och Betongindustri har i vissa fall inte tagits med i rapporten på grund av sekretess. Detta har inte påverkat rapportens genomförande eller slutsatser.

2 Teori

2.1 Byggbranschens klimatpåverkan

Sveriges territoriella utsläpp var 2018 52,1 miljoner ton koldioxidekvivalenter (Naturvårdsverket, 2019). Bygg och fastighetssektorn beräknades stå för 22 % av dessa utsläpp, vilket motsvarar 11,8 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Totalt, inklusive utsläpp kopplat till import, beräknades utsläppen från bygg och fastighetssektorn till 17,7 miljoner ton koldioxidekvivalenter 2018 (Boverket, 2018).

Klimatpåverkan för byggnader kan mätas i GWP_{GHG} som är ett mått på utsläppt mängd $kg\ CO_2, ekv.$ Denna mängd delas ofta upp per kg byggmaterial eller kvadratmeter byggnad för att få jämförbara värden. Alla gaser som identifierats som bidragande till växthuseffekten har en GWP -faktor som gör att dess påverkan kan omvandlas till koldioxidekvivalenter, dvs. vilken potentiell påverkan utsläpp av gasen har i förhållande till utsläpp av samma mängd koldioxid. (Boverket, 2018).

I äldre byggnader var utsläppen kopplat till driftskedet så pass stora att utsläppen i samband med byggnationen i princip ansågs försumbara. I moderna byggnader har så pass omfattande åtgärder vidtagits gällande klimatskal, installationer och energikällor för uppvärmning att utsläpp under byggtiden numera i regel motsvarar ca 50 % av byggnadens totala utsläpp under dess beräknade livstid (Liljenström *et al.*, 2015).

Klimatpåverkan kopplat till byggprocessen respektive driftskedet ligger på ca 300–500 $kg\ CO_2, ekv / m^2_{Atemp}$ vardera för ett flerbostadshus med betongstomme byggt enligt gällande BBR-krav baserat på en analysperiod på 50 år. Analyseras en längre period, exempelvis 100 år, blir utsläppen kopplat till driften större medan bidraget från byggprocessen förblir oförändrat. Dock tillkommer utsläpp kopplat till underhåll och renovering. (Liljenström *et al.*, 2015, s 48).

Av utsläppen kopplat till byggande av flerbostadshus med betongstomme visar flera studier att normalt ca hälften kommer från själva stommen, därav ca 35 % från betongen och cirka 15 % från armeringen (Liljenström *et al.*, 2015; Häfliger *et al.*, 2017; Hoxha *et al.*, 2017)

I en rapport som genomfördes i ett samarbete mellan Sveriges byggindustrier, IVL, KTH samt flera av Sveriges större byggbolag gjordes en jämförelse av klimatpåverkan från olika typer av byggsystem för projektet ”Blå jungfrun”. Ett av dessa alternativ var en platsgjuten stomme med kvarsittande form, vilket var så huset faktiskt byggdes. I detta alternativ beräknades betong och armering utgöra 45 respektive 6 % av klimatpåverkan från byggskedet. Den kvarsittande formen av cementbundna skivor står för ytterligare 20 % av klimatpåverkan. Dessa tre material beräknas generera 235 $kg\ CO_2, ekv / m^2_{Atemp}$. Om den kvarsittande formen exkluderas blir detta värde 169 $kg\ CO_2, ekv / m^2_{Atemp}$. Alternativet ovan är beräknat med en betong representativ för rådande branschstandard, exakt vilken var ej angivet. I ett referensfall beräknades klimatpåverkan med en klimatförbättrad betong innehållande 47 % slagg.

Detta genererade 202 kg CO_{2, ekv}/m²_{Atemp} respektive 136 kg CO_{2, ekv}/m²_{Atemp} med eller utan den kvarsittande formen (Erlandsson *et al.*, 2018).

Det är till stor del cementen i betongen som ger upphov till stora utsläpp, vid tillverkning av cement bränns kalksten vid höga temperaturer och koldioxid bildas som restprodukt (Devi, Lakshmi and Alakanandana, 2018).

2.2 Aktörer i byggsektorn

2.2.1 Cementproducent

Cementtillverkning är orsak till ca 5% av Europas totala utsläpp av koldioxid. Cement har flera nödvändiga användningsområden inom byggsektorn och används till exempel i betong, olika typer av bruk, puts, avjämningsmassor och fix (FAVIER *et al.*, 2018, s 15).

2.2.1.1 Koldioxidutsläpp kopplat till uppvärmning av klinkerugnar

Första steget i tillverkning av cement är kalcinering av kalksten och lera. Kalcineringen sker vid en temperatur av ca 1450°C. För att uppnå denna temperatur krävs mycket energi. Produkten från denna process kallas klinker. Klinkern blandas med gips och eventuellt andra tillsatsmaterial så som kalksten, flygaska eller masugnsslagg.

I dagens cementproduktion kommer 30–40 procent av koldioxidutsläppen från uppvärmningen av dessa klinkerugnar. Uppvärmningsprocessen kan ske i torra samt våta förhållanden, där den först nämnda är mest energieffektiv och i dagens Europa den dominerande tekniken. Äldre klinkerugnar där kalksten och lera upphettas under våta förhållanden har i stor utsträckning redan blivit utbytta till mer energieffektiva torra klinkerugnar (ECRA, 2017, s6).

Moderna klinkerugnar är väldigt flexibla gällande vilken energikälla som kan användas (Habert *et al.*, 2020, s6). Energikällor till klinkerugnar kan bland annat utgöras av biomassa, kol och koks. På senare tid har användandet av biomassa ökat, då det är ett förnybart alternativ. Då dagens klinkerugnar är tekniskt avancerade och har en hög effektivitet uppskattas att det finns utrymme för en maximal ytterligare förbättring i energieffektiviteten på runt 10 % till 2050 (ECRA, 2017, s 20).

2.2.1.2 Koldioxidutsläpp kopplat till kalcinering

Kalksten innehåller olika kalciumföreningar. Under upphettning i klinkerugnar frigörs olika föreningar. Då kalciumkarbonat (CaCO₃) hettas upp bryts denna ned till kalciumoxid (CaO) och koldioxid (CO₂). Denna frigjorda koldioxid utgör 60–70 % av utsläppen från tillverkningen av cement. Dessa koldioxidutsläpp kommer alltså från den kemiska reaktion ur vilken klinkern skapas, och är således nödvändig för tillverkningen av cementbaserade material. Det finns stor vinning i att minska eller ta hand om dessa utsläpp av koldioxid, vilket anses nödvändigt för att klara målet om en maximal global medeltemperaturökning på 2°C (IEA, 2018).

Ett sätt att minska mängden utsläppt koldioxid per mängd producerad cement är att ersätta en del av klinkern med tillsatsmaterial. Exempel på dessa tillsatsmaterial är finmald kalksten, flygaska och masugnsslagg. Flygaska och masugnsslagg är restprodukter från förbränning av kol respektive förädling av järnmalm.

Cement delas upp i fem huvudgrupper med flera undergrupper enligt gällande standard, SS-EN 197-1. Standarden reglerar vad respektive cementgrupp får innehålla för olika kombinationer och mängder tillsatsmaterial (Ics, 2011).

En stor del av den totala mängden tillverkad cement i Europa består av cement där en del av klinkern har ersatts av tillsatsmaterial. Den genomsnittliga klinkerfaktorn, dvs mängd klinker/mängd tillverkad cement, är i Europa 0.73. Denna faktor behöver fortsatt minskas för att reducera de totala koldioxidutsläppen från cementtillverkning. Ett problem som blir allt mer påtagligt är brist på tillsatsmaterial så som flygaska och masugnsslagg på grund av den minskande kolkraftsindustrin och den pågående klimatreducerande omställningen inom stålindustrin. Till följd av detta pågår forskning för att ta fram nya hållbara tillsatsmaterial. (FAVIER *et al.*, 2018, s26).

Carbon capture storage (CCS)

En annan metod för att minska koldioxidutsläppen till atmosfären från calcineringen av kalksten är att fånga in den frigjorda koldioxiden med koldioxidfångare. Denna teknik kallas Carbon capture and storage (CCS) och är mycket aktuell och omdebatterad. Tekniken används ej kommersiellt i dag då den än så länge inte är tillräckligt utvecklad för att implementeras på stor skala och investeringskostnaderna är mycket stora, ofta överstigande den dubbla kostnaden för en ny cementfabrik (FAVIER *et al.*, 2018, s 46).

Detta är dock något som håller på att förändras och ett CCS-projekt genomförs i Brevik, Norge, drivet av Heidelberg Cement och Norcem. Detta är det första projektet på området i industriell skala och planeras omfatta permanent lagring av 400 000 ton CO₂ årligen vilket motsvarar en reduktion på 50% av cementfabrikens klimatpåverkan. Planerad igångsättning är 2024 (Heidelbergcement, 2020). CCS är något som många anser vara en nödvändig del för att uppnå klimatmålen som satts upp inom byggsektorn.

2.2.2 Betongproducent

I Europa används ca 75 % av all cement till betong, armerad såväl som oarmerad, resten används i olika typer av bruk, puts, avjämningsmassor och fix. I de mer utvecklade delarna av världen utförs i princip allt betongbyggande antingen med platsgjutna konstruktioner där betongen blandas på fabrik och transporteras till arbetsplatsen, alternativt uppförs byggnaden med prefabricerade betongelement tillverkade på fabrik. I dessa delar av världen är fördelningen mellan prefabricerad betong och platsbyggda konstruktioner ca 50/50 %. I U-länder blandas fortfarande mycket betong på arbetsplatserna vilket gör att noggrannheten vid betongblandningen blir betydligt sämre och mer cement och vatten än nödvändigt ofta används (Habert *et al.*, 2020, s 6).

2.2.2.1 Noggrannhet vid betongblandning

Vid blandning i fabrik kan recept följas noggrant och onödigt materialslöseri till stor del undvikas. Österrikiska studier har dock visat att det ofta används mer cement, ca 20 %, än vad recepten föreskriver även i fabriksblandad betong. Detta antas bero på att betongleverantörer vill ha en säkerhetsmarginal för att försäkra sig om att verkligen uppnå ställda krav. Ökad noggrannhet vid blandning/vägning av material anses därför kunna minska cementanvändningen i betongen med upp till 20 % enligt studien (Passer, Deutsch and Scherz, 2018).

2.2.2.2 Kornfördelning

Cementen är betongens bindemedel och fyller ut tomrummet mellan stenmaterialet. Om en betongproducent har tillgång till välsorterat stenmaterial i alla önskade dimensioner kan en jämn kornfördelning i betongen uppnås och tomrummet som måste fyllas kan då minimeras, därmed kan även cementmängden i receptet minskas. Problemet är att betongfabrikerna ofta saknar tillgång till tillräckligt välsorterat material och även tillräckligt noggrann utrustning då efterfrågan för optimering av kornfördelning tidigare varit mycket mindre. Genom att optimera stenmaterialets storleksfördelning beräknas cementmängden kunna minskas med ca 10% (FAVIER *et al.*, 2018, s 35).

2.2.2.3 Tillsatsmedel

Genom tillsatsmedel är det möjligt att kemiskt påverka betongens egenskaper. Exempelvis är det möjligt att reducera behovet av vatten, utan att påverka betongens arbetbarhet nämnvärt. Mängden cement kan också minskas med tillsättning av väl avvägda tillsatsmedel. Teknisk utveckling av dessa tillsatsmedel förväntas kunna reducera klimatpåverkan från betongen med 10-20 % (Cembureau, 2013, s 48-49).

2.2.3 Projektörer

Inom byggbranschen finns stora möjligheter till klimatförbättringar genom att optimera användandet av betong i byggnader. Med optimera menas i detta fall att använda mindre betong utan att kompromissa med den färdiga produktens funktion och kvalitet, dvs. att bygga lika mycket och lika bra fast med minskad klimatpåverkan.

Det är vanligt förekommande att projektörer föreskriver endast en eller få olika betongklasser till en hel konstruktion baserat på kraven för den/de mest belastade delarna av konstruktionen. Betong som ska bära stora laster kräver en stor andel cement och betong exponerad mot utomhusklimat kräver lägre vct jämfört med betong som ska befinna sig i inomhusmiljö under byggnadens drifttid. Genom att istället föreskriva betong anpassat till varje byggdels ändamål kan således klimatpåverkan reduceras utan att byggnadens funktion påverkas. Detta kräver ett välfungerande system för kommunikation mellan projektör, entreprenör och betongleverantör så att det blir enkelt att säkerställa att rätt betongkvalitet används på rätt ställe. Sådana system finns tillgängliga och blir allt smidigare i och med den fortsatta digitaliseringen (Favier, Scrivener and Habert, 2019, s 7).

Anledningen till att det ofta föreskrivs betong med onödigt bra egenskaper är dels att förenkla för produktionen, dels för att vara på den säkra sidan gällande betongens

egenskaper. En ytterligare, allt vanligare, orsak är att betong med låg vct torkar fortare än en betong med högre vct. Detta beror på att det finns mer cement som binder vatten kemiskt under härdningen och därmed blir det mindre vatten kvar som måste torka ut. För att hålla nere byggtiden väljs således en betong som i övrigt är onödigt högpresterande. Byggtiden bestäms ofta utifrån beställarens krav och de begränsar därmed starkt projektörernas valmöjligheter gällande betongtyp för byggdelar med uttorkningskrav (Burke, 2021).

Nästa stora besparingsmöjlighet under projekteringen rör de föreskrivna mängderna och utnyttjandet av betongen. Förutom att inte använda ”bättre” betong än vad syftet kräver kan betong sparas genom att undvika att använda mer än nödvändigt. Idag används ofta upp till 20% mer betong än vad som egentligen krävs för att uppnå erforderlig hållfasthet. Denna överanvändning beror, likt användningen av låg-vct betong, på att konstruktörerna vill ligga på säkra sidan gällande bärighet men även på att byggnormer och standardmått på bjälklag och väggar används slentrianmässigt. Genom att aktivt dimensionera alla betongelement efter rådande krav kan alltså ca 20% av den använda betongen sparas utan att resultatet påverkas. Då betongkonstruktioner i en byggnad optimeras minskas den totala vikten och därmed belastningen på grunden som i sin tur kan minskas i dimension (Favier, Scrivener and Habert, 2019, s 9).

De normer och standarddimensioner som finns syftar till att förenkla produktionen och vid dimensionsändringar bör produktionskunnig expertis efterfrågas så att lösningarna inte drabbar utförandet i för hög utsträckning. Standarddimensioner för betongbjälklag och bärande innerväggar i flerbostadshus är 250 mm respektive 200 mm. Dessa dimensioner ger gott utrymme för installationsdragningar i bjälklagen och gör att ljudklass B uppnås utan vidare anpassningar. (Eriksson, 2021).

En granskning och uppdatering av gällande standarder för cement- och betongrecept tros kunna ge ytterligare utrymme för besparingar (FAVIER *et al.*, 2018, s37-38).

2.2.3.1 Prefabricerade betongelement

Inom den prefabricerade betongindustrin finns exempel på betydligt större betongbesparingar än 20%, Figur 3 nedan är ett exempel på ett bjälklag där optimerad geometrisk utformning av betongelementet möjliggjort besparingar på mer än 70% av betongmängden av ett motsvarande traditionellt massivt bjälklag (Block et al, 2016).

Klimatsmart betongbyggande



Figur 3. Exempel på optimerad utformning av prefabricerat betongbjälklag. Copyright ETH Zurich / Block Research Group, photograph by Nick Krouwel.

Idag delar prefabricerad och platsgjuten betong jämnt på marknaden (FAVIER *et al.*, 2018, s 32). Med de stora möjligheterna att spara in på betongmängder kopplade till modern prefabricering under mycket kontrollerade former spås prefabricering framgent vinna större marknadsandelar (Favier, Scrivener and Habert, 2019, s 5).

Dagens prefabricerade betongelement gjuts dock ofta med ett lågt vct för att minimera produktions- och lagerhållningstid i fabrik. På grund av detta ger prefab-element idag ofta upphov till större klimatpåverkan än dess platsgjutna alternativ (Eriksson, 2021).

2.2.4 Beställare

Beställare av bygg-och infrastrukturprojekt har ett stort ansvar i utformningen av upphandlingar. Ramen för en upphandling skapas av beställaren, således finns det goda möjligheter att påverka hur stort klimatavtryck byggnationen i slutändan orsakar.

Beställaren kan exempelvis definiera vilken typ av stomme som ska användas, vilket i hög utsträckning kan påverka det totala klimatavtrycket. Även de funktionskrav som ställs i förfrågningsunderlaget gör skillnad i klimatpåverkan. Krav på isolering och täthet ger stora skillnader i energibehov under drifttiden samt klimatpåverkan från tillverkningen av materialen. Ljudkraven är en viktig faktor för klimatpåverkan då ett högre ljudkrav innebär att mer material krävs (Ravemark, 2021).

Klimatsmart betongbyggande

Det finns till exempel standarddimensioner på betongelement baserat på ljudkrav, se Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Standarddimensioner för lägenhetsskiljande byggdelar av betong (Svensk Betong, 2018).

Byggdel	Ljudklass B [mm]	Ljudklass C [mm]
Bjälklag	240	200
Lägenhetsskiljande väggar	200	180

Beställaren är den part som i en anbudsförfrågan har möjlighet att ställa krav på start- och slutdatum för ett projekt. Detta påverkar ofta hur stort klimatavtryck projektet får i slutändan. Med en pressad tidplan tenderar koldioxidutsläpp och energianvändning att öka. I betongbyggnader har denna ökning ofta att göra med användning av en betongtyp med betydligt lägre vct än vad som är nödvändigt ur hållfasthets- och exponeringssynpunkt, detta görs enbart för att påskynda uttorkningen. Ofta används även mycket energi för att torka ut betongstommen så att ytskikt, främst tätskikt, ska kunna monteras inom ramen för tidplanen (Burke, 2021).

Högre krav från beställare gällande klimatavtryck befaras i dagsläget av många entreprenörer resultera i högre byggkostnader. Detta kopplas främst till nya och obeprövade tekniker. Risker i produktionen kompenseras generellt med stora kostnadspåslag för att täcka eventuella problem. Längre produktionstider resulterar vanligen i senarelagda hyresintäkter (hyresfastigheter) och högre kostnader för byggnadskreditiv.

2.2.5 Entreprenör

Ansvar som vilar hos entreprenören i frågor om klimatpåverkan varierar stort beroende på vilken upphandlingsform som är aktuell. I totalentreprenad har entreprenören ett större ansvar, exempelvis vid materialval och i upphandling samt styrning av projektörer i utformningen av projektet. Vid utförandentreprenad är det beställaren som tar fram underlag som mer eller mindre specificerar utformning och materialval. Detta lämnar således mindre utrymme för entreprenören att reducera klimatpåverkan. Det kan också vara så att beställaren redan i anbudsförfrågan ställt krav på entreprenören angående klimatpåverkan.

Möjligheten för entreprenören att påverka koldioxidutsläpp och klimatpåverkan skiljer sig från projekt till projekt och påverkas av upphandlingsformen. Det lämnas varierande möjligheter för entreprenören att ställa krav på exempelvis sorteringsgrad, mängd avfall på byggarbetsplatserna, metod för uttorkning av byggfukt, uppvärmning samt transporter till och inom arbetsplatsen. I projekt där den bärande strukturen utgörs av betong har entreprenören ett ansvar för mängden betong och armering som blir till spill, samt att föreskriven betong används på rätt plats i rätt mängd.

2.3 Klimatberäkningar

2.3.1 Samhällskrav

Trots mycket publicitet och diskussioner finns det i dagsläget inga krav på att klimatpåverkan från byggnader ska redovisas. Detta är dock på väg att förändras, med utgångspunkt i Parisavtalet har Boverket fått i uppdrag av regeringen att ta fram förhållningsregler för byggsektorn gällande klimatpåverkan från nybyggnation. Reglerna kommer att börja gälla från och med 2022 (Regeringen, 2021).

Boverket har sammanställt en rapport, ”*Klimatdeklaration av byggnader*” (2018), där de ger förslag på hur klimatdeklarationer i Sverige bör utformas och implementeras. Metodiken grundar sig på standarden SS-EN 15978 (se kap 2.3.2) och enheten som föreslås för beräkning av klimatpåverkan är GWP_{GHG} , dvs koldioxidequivivalenter i kg/m^2 . Enligt förslaget bör arean anges som byggnads bruttoarea (BTA).

Syftet med kraven är i första hand att belysa klimatfrågan, göra byggsektorn medveten om dess påverkan och undersöka vilka möjligheter till förbättring som finns tillgängliga. Till en början görs kraven därför inte så omfattande och är avgränsade till att fokusera enbart på stomme, klimatskärm och innerväggar. Dessa tre byggdelar utgör dock en stor del av den totala klimatpåverkan från byggnaden, studier visar på så mycket som 80–90% av alla utsläpp kopplat till byggmaterialen. Kravet innefattar endast redovisning av klimatpåverkan, krav på hur stor klimatpåverkan som tillåts planeras att införas senare. (Boverket, 2018, s 12-13).

På sikt är det tänkt att kraven ska göras mer omfattande och så småningom innefatta en fullständig livscykelanalys för i princip alla nya byggnader. Anledningen till att kraven inte sätts tuffare från början är att de resurser och data som krävs för fullständiga livscykelanalyser i stort sett saknas i branschen idag (Boverket, 2018).

Den största uppskattade kostnaden relaterat till införandet av kraven är arbetstimmarna som krävs vid implementeringen. Den största utmaningen anses vara att få fram och analysera data för byggprodukternas klimatpåverkan. Ett förslag för att minska arbetsbördan och kostnaden för byggsektorn är att staten ska tillhandahålla ett register med granskade klimatdata. Tidsåtgången väntas också minska i takt med att branschen lär sig hantera klimatdeklarationer (Boverket, 2018).

2.3.2 EN 15978: Hållbarhet för byggnadsverk, miljöprestanda för byggnader

I standarden SS-EN 15978 (Ics, 2014) beskrivs riktlinjer för hur en fullständig LCA av en byggnad ska utföras. I denna standard delas en byggnads klimatavtryck upp i stadierna nedan.

Klimatsmart betongbyggande

A1-A3: Produktskede – Innefattar utvinnandet av råmaterial, transport till fabrik och förädling av råmaterial. Regler för hur dess påverkan ska beräknas finns definierat i SS-EN 15804 (Ics, 2019).

A4-A5: Byggskede – Innefattar transporter av material, allmänna hjälpmedel och avfall med mera till och från byggarbetsplatsen. Här ingår också uppvärmning, el, vatten, transport av material inom arbetsplatsen samt energi och vatten till drift av lager och bodetablering på plats.

B1-B7: Brukarskede - Här ingår data från användandet, underhåll, drift, reparationer, energianvändning samt vattenförbrukning under byggnadens beräknade livslängd.

C1-C4: Slutskede: - Innefattar demontering, transport och avfallshantering.

D: Övrig information – Här kan eventuellt återbruk, återvinning eller utsläpp vid avfallshantering tas med i beräkningen.

I SS-EN 15978 (Ics, 2014) redovisas vilka påverkanskällor som ska inkluderas i de olika skedena, det beskrivs även vilken typ av data som skall användas och hur den ska prioriteras.

I standarden redovisas även en beräkningsmodell för klimatpåverkan:

$$GWP_i = a_{1,i} \times GWP_{a_{1,i}} + a_{2,i} \times GWP_{a_{2,i}} + a_{3,i} \times GWP_{a_{3,i}} + \dots + a_{N,i} \times GWP_{a_{N,i}} \quad (1)$$

Där:

$$i = [A1 - A3, A4, A5, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, C1, C2, C3, C4, D]$$

$a_{N,i}$ = den kvantitet (n) som används eller förbrukas i aktuellt skede (i).

$$GWP_{a_{N,i}} = \frac{\text{klimatpåverkan}}{\text{enhet i vilken kvantiteten } (n) \text{ har beräknats}} \quad (2)$$

Där:

$$GWP_i = \text{Klimatpåverkan från ett skede}$$

Byggnadens totala klimatpåverkan erhålls genom att summera de olika skedenas GWP.

2.3.3 Beräkning av klimatpåverkan enligt Boverkets förslag

I boverkets förslag om lagkrav 2022, vilket inte är slutgiltigt, rekommenderas att följande bygghandlingar omfattas i klimatdeklarationer:

- Klimatskärm
- Bärande konstruktionsdelar
- Icke bärande innerväggar

Material till markarbeten, installationer (ventilation, vatten, avlopp, el), invändiga yttskikt, fast inredning samt hissar med mera föreslås ej ingå i detta första krav (Boverket, 2018).

Följande övriga avgränsningar och förslag presenteras gällande de olika modulerna i standarden SS-EN 15978.

2.3.3.1 A1-A3

Det finns i dag ingen nationell databas innehållande den data som behövs för att beräkna klimatpåverkan i produktskedet. Boverket har föreslagit för regeringen att en sådan bör tas fram. I ett första skede rekommenderas att generiska data ska användas i de fall en EPD som är kvalitetsgranskad av tredje part ej finns tillgänglig. Syftet med att använda ett gemensamt system är att öka transparens och jämförbarhet i data.

2.3.3.2 A4

I det första kravet på klimatdeklaration föreslår boverket att transporter av byggprodukter till byggarbetsplatsen ska ingå. Detta gäller de material som behövs till de ingående bygghandlingarna i modul A1-A3.

Boverket föreslår att transport av de tre största delmaterialen ingående i de obligatoriska bygghandlingarna i modul A1-A3 ska beräknas med specifika data. I det slutliga förslaget kommer det att framgå om det är viktmässig eller volymmässig storlek som är avgörande. Specifika data innefattar transportavstånd, transportslag och bränslen.

Övrig transport av material ingående i A1-A3 kan i detta första krav på klimatdeklaration beräknas med hjälp av generiska data. Denna data föreslås ingå i den nationella databas boverket har föreslagit för regeringen att ta fram.

2.3.3.3 A5

Här föreslås att följande ska vara obligatoriskt:

- produktion och transport (till byggarbetsplatsen) av det material som blir till spill
- alla energikrävande processer kopplade till uppförandet av bygghandlingarna

För att underlätta beräkningen av mängd spill som behöver transporteras föreslår boverket att schablon-påslag av spill också inkluderas i den föreslagna nationella

databasen. Den slutliga beräkningen bör dock baseras på verkliga uppmätta spillmängder, detta för att öka drivkraften att minska mängden spillmaterial.

Utsläpp kopplade till byggarbetsplatsens energikrävande processer bör beräknas med hjälp av generiska data för bränslen, el och fjärrvärme. Denna data föreslås inkluderas i den nationella databasen. Verkliga värden på förbrukning av olika bränslen, el och fjärrvärme ska kunna användas om dessa finns tillgängliga. Detta för ett ökat incitament att minimera energianvändning och/eller välja energislag med låg klimatpåverkan (Boverket, 2018).

2.3.4 Förenklad beräkning av klimatpåverkan från betongstomme

Då det inte finns några idag gällande krav har olika, mer eller mindre omfattande, beräkningsmetoder utvecklats för att beräkna och belysa klimatpåverkan från olika delar av byggprocessen.

Ett exempel på en enklare beräkningsmetod enbart fokuserad på betong är presenterad i rapporten ”*Energianvändning vid klimathållning och avfuktning under byggproduktion-förstudie*” (Karlsson *et al.*, 2019). Rapporten tar endast hänsyn till utsläpp från betongen enligt Svenskbetong och uttorkningstiderna är beräknade med programmet TorkaS.

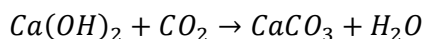
I rapporten beräknas att det för en byggnad med en betongstomme innehållande 1200 m³ betong kan sparas mellan 50–80 ton CO_{2,ekv}, vilket motsvarar ca 15% av de totala utsläppen, genom att välja en betong med vct 0.5 istället för 0.4. Detta baseras på att produktionstiden är ett år för fallet med vct 0.4 och två år för vct 0.5.

Spannet på 50–80 ton CO₂ i resultatet beror på vilken energikälla som används för klimathållning i byggnaden under uttorkningsskedet. Om direktverkande el används för uppvärmning ger det upphov till större utsläpp än om pellets används, skillnaden beräknas i koldioxidekvivalenter för respektive energislag.

Beräkningarna visar att det är bättre att använda vct 0.5 betong och direktverkande el (nordisk elmix) än att använda vct 0.4 betong och pellets, trots den 1 år längre produktionstiden (Karlsson *et al.*, 2019, s 47-48).

2.3.5 Karbonatisering av betong

I kalcineringen (se kap 2.2.1) frigörs stora mängder koldioxid som restprodukt då kalciumkarbonat omvandlas till kalciumoxid. Under en betongkonstruktions livstid kommer kalciumoxiden i betongen åter att binda koldioxid till sig och återgå till kalciumkarbonat enligt den kemiska reaktionen som kallas karbonatisering (Wadsö, 2017):



Hur lång tid karbonatiseringen tar beror på flera faktorer:

- cementhalt
- tillsatsmaterial
- temperatur
- relativ luftfuktighet
- koldioxid tillgängligt i omgivningen
- hur exponerad betongen är mot sin omgivning

När karbonatiseringsdjupet i en betongkonstruktion passerat täcksiktet och trängt in till armeringen kommer den att börja rosta om den exponeras för tillräckliga mängder fukt eller salt. Då armering rostar utvidgas den vilket kan medföra att betongen spricker och förlorar hållfasthet. Livslängden för betongkonstruktioner i exponerade miljöer är således beroende av karbonatiseringsförloppet. För betong exponerad mot inomhusmiljö i byggnader där människor vistas långvarigt, så som bostäder och kontor, leder karbonatisering under normala förhållanden sällan till några risker kopplat till betongens bärighet.

Rivningsmassor av betong tar även dem upp koldioxid, i vilken mängd är beroende av hur massorna lagras. Optimeras denna lagringsprocess beräknas det totala upptaget från all betong i Sverige kunna ökas till nära det dubbla. Genom att beräkna upptaget av koldioxid ges en uppfattning av vilken reduktion detta medför vid en klimatberäkning innehållande modul B1, i vilken karbonatisering ska bokföras enligt EN 15978 (se kap 2.3.2). Så mycket som 15-20% av den totala klimatpåverkan från cementtillverkningen tas idag upp av befintliga betongkonstruktioner (Cementa, 2018). Träprodukter kan ses som referens i sammanhanget. Gällande träprodukter tas hänsyn till att trä binder koldioxid under tillväxten och detta upptag kvittas sedan normalt mot koldioxidutsläppen som kommer vid slutgiltig förbränning av trämaterial (Kurkinen *et al.*, 2017, s 19-20)

SS-EN 16757 är en standard för beräkning av mängd upptagen koldioxid genom karbonatisering (Ics, 2017). Koldioxid upptagen genom karbonatisering behandlas under Modul B1 i SS-EN 15978 (Ics, 2014).

3 Metod

3.1 Identifiering av åtgärder för minskad klimatpåverkan

Genom intervjuer med nyckelaktörer i projektet samt analys av underlaget har de specifika åtgärder som vidtagits för att minska klimatpåverkan kartlagts och analyserats. Följande aktörer och deras respektive åtgärder har analyserats:

- Projekteringsledare
- Platschef
- Tekniska specialister
- Betongleverantör
- Beställare

3.2 Klimatberäkning av betongstomme

Klimatpåverkan från betongstommen beräknades med hjälp av Byggsektorns Miljöberäkningsverktyg, i rapporten benämnt BM. Klimatpåverkan beräknades dels i GWP_{GHG} per A_{temp} , i GWP_{GHG} per BTA och som totalt utsläpp av koldioxidekvivalenter kopplat till produktionsskedet enligt A1-A5.1 i EN15978 (Ics, 2014).

Utöver klimatpåverkan från produktionsskedet har den upptagna mängden koldioxid på grund av karbonatisering av betongen under 100 års tid beräknats enligt SS-EN 16757 (Ics, 2017).

3.2.1 Studerade fall

Olika fall beräknades så att de vidtagna åtgärderna i Kv. Kungsörnen kunde separeras och analyseras var för sig. Följande fall har studerats:

- Fall 1: Kv. Kungsörnen
- Fall 2: Betong enligt branschstandard
- Fall 3: Dimensioner enligt branschstandard
- Fall 4: Armering enligt branschstandard
- Fall 5: Utformning enligt ljudklass C
- Fall 6: Reducerad produktionstid
- Fall 7: Inverkan av årstid

4 Projektspecifika intervjuer och handlingsstudier

I följande kapitel är inhämtad information från genomförda intervjuer och handlingsstudier sammanställda för de olika skedena i projektprocessen.

4.1.1 Upphandling

Helsingborgshem gick 2019 ut med ett offentligt förfrågningsunderlag där inlämnade anbud för första gången skulle bedömas på pris och klimatpåverkan. Priset utgjorde 80% av bedömningsunderlaget och klimatpåverkan 20%. Beslutet att börja ta hänsyn till klimatpåverkan i anbudsprocessen gjordes för att Helsingborgshem aktivt vill påverka omställningen till ett hållbart samhällsbyggande (Ravemark, 2021).

Klimatpåverkan definierades som utsläpp av koldioxidekvivalenter i enlighet med Boverkets rapport ”Klimatdeklaration av byggnader” (2018). För att ett anbud skulle godkännas krävdes att klimatberäkningen var gjord i Byggsektorns Miljöberäkningsverktyg och följa en begränsad del av metoden enligt EN 15978 (Ics, 2014). Beräkningarna avgränsades av Helsingborgshem till att endast innefatta stomme, husunderbyggnad, fasader och yttertak. Stomkomplettering, installationer med mera skulle således ej räknas med. BM valdes som föreskrivet beräkningsprogram då det ansågs vara ett bra verktyg som kunde täcka in alla de begärda delarna av klimatberäkningarna samt för att det är ett gratisprogram som således alla har tillgång till. Detta är ett krav eftersom Helsingborgshems anbudsprocess lyder under lagen om offentlig upphandling (Ravemark, 2021).

I det ursprungliga förfrågningsunderlaget angavs att modul A1-A5 enligt EN 15978 (se kap 2.3.2) skulle tas med i beräkningen, detta begränsades sedan ytterligare till att endast innefatta A1-A5.1. Detta innebär att energianvändning och transporter inom byggarbetsplatsen inte inkluderas (Helsingborgshem, 2019b)

För EPD:er som används i beräkningarna krävdes att de blivit verifierade av oberoende tredje part och att de redovisades i anbudet (Helsingborgshem, 2019a).

I underlaget var inget speciellt byggsystem eller stomme föreskriven utan det lämnades fritt för entreprenörerna att bestämma själva så länge den färdiga byggnadens egenskaper nådde upp till övriga krav gällande bärighet, ljudklass, brandklass mm. Detta gjordes för att inte begränsa innovationsförmågan för entreprenörerna (Ravemark, 2021)

Tid för senaste byggstart regleras i underlaget men inte datum för färdigställande. Slutdatum skulle sättas i överenskommelse med entreprenör vid kontraktsskrivning. Detta kom att ändras till att vinnande entreprenör endast blev skyldig att meddela slutdatumet sex månader i förväg, slutdatumet var alltså oreglerat vid kontraktsskrivning (Helsingborgshem, 2019a, 2019b). Även detta gjordes för att ge så mycket utrymme som möjligt för entreprenören att utforma klimatsmarta lösningar. Helsingborgshem lägger ut sina hyreslägenheter på marknaden ca 4 månader före inflyttningsdatum och är därmed inte beroende av någon längre framförhållning än de 6 månaderna som krävs enligt kontraktet. Att byggtiden genom beslutet att inte ställa något krav på slutdatum

riskerar att dra ut på tiden ansågs inte som någon större risk då räntorna i dagsläget är låga och det därmed är relativt billigt att låna pengar. Dessutom togs hänsyn till att entreprenörerna själva har ekonomiska incitament att färdigställa sina byggen så fort som möjligt (Ravemark, 2021)

4.1.2 Anbudsskede & Projektering

Då beställaren i förfrågningsunderlaget inte ställde krav på val av byggsystem eller tid för färdigställande hade projektörerna fria händer att utforma byggnaden på så vis att klimatpåverkan kunde minimeras, så länge kostnaden hölls nere (Eriksson, 2021; Stigenäs, 2021). Detta utgjorde en grundförutsättning för arbetet med reduktionen av klimatpåverkan och påverkade framförallt valet av betong som valdes med hänsyn till detta istället för uttorkning, vilket är vanligt i traditionell projektering (Carlswärd, 2021)

Att ta hänsyn till klimatpåverkan vid anbudsskrivande var något nytt för många inblandade. Anbudsprojekteringen började med att olika stomalternativ togs fram och deras klimatpåverkan beräknades grovt för att ställas mot varandra. Detta resulterade i att en platsgjuten betongstomme valdes då det uppskattades ge en låg kostnad och en likvärdig klimatpåverkan som om husen byggts med trästomme och en lägre klimatpåverkan jämfört med en prefabricerad betongstomme. Anbudet blev det, av alla inlämnade anbud, med såväl lägst klimatpåverkan som totalkostnad (Eriksson, 2021).

Olika stomval och deras klimatpåverkan analyserades även i Brf. Viva som är en omtalad fallstudie. I studien beräknades och jämfördes olika stomalternativs klimatpåverkan över en byggnads hela livslängd. Resultaten från projektet påvisade inga signifikanta skillnader i klimatpåverkan baserad på om stommen utformats med platsgjuten betong, prefabricerad betongstomme eller trästomme (KL-element) (Kurkinen *et al.*, 2017).

Då NCC väl vunnit upphandlingen började projekteringen och det undersöktes vad som kunde göras för att minimera klimatpåverkan från betongstommen.

Följande möjliga åtgärder identifierades:

- Optimerad betong

I projektering togs extra hänsyn till hållfasthet och alla byggdelar dimensionerades separat för att undvika användandet av onödigt hållfast betong. Detta beror på att mängden bindemedel ökar med högre hållfasthetsklass. Alla klimatförbättringar som görs med betongen står i relation till klimatpåverkan för den valda hållfasthetsklassen (Olsson, 2021).

Betongindustri kopplades in tidigt i projekteringen och gavs möjlighet att påverka kravställningen på betongen. Detta medförde att kraven optimerades så att inte onödigt höga exponeringsklasser och vct-krav skrevs in i handlingarna. Den största delen av betongen i byggnaden kommer under byggnadens livstid att vara exponerad mot innemiljö och tillhör därmed exponeringsklass XC1 alternativt X0. I det första utkastet av K:0an, vilket är ett dokument innehållande allmänna anvisningar för konstruktionen, var det inskrivet att denna betong skulle ha en vct på max 0,55.

Detta korrigerades för att ge utrymme att använda Betongindustris klimatförbättrade betong då utrymme för högre vct och större andel tillsatsmaterial medges för XC1 i betongstandarden SS-137003 (Ics, 2012). Hade inte denna korrigering gjorts tidigt i samråd med betongleverantören hade möjligheten att använda Betongindustris klimatförbättrade betong varit betydligt mer begränsad (Carlsvärd, 2021).

- Optimera dimensioner

Under projekteringen strävades det efter att minimera mängden armering och betong. Armeringen optimerades av konstruktören genom flera beräkningar av byggdelar vars armeringsmängd i ett standardprojekt hade valts utifrån liknande byggdelar med högre lastpåverkan, alltså överdimensionerats. Tjocklek på väggar och bjälklag i betong valdes redan i anbudsskede. Det valdes en mellanbjälklagstjocklek på 200 mm samt lägenhetsskiljande väggar av 150 mm betong. Att ytterligare minska dimensionerna ansågs svårt med hänsyn till utrymme för installationer samt ljudkrav. (Stigenäs, 2021).

Då stomkomplettering ej skulle tas hänsyn till i beräkningen av klimatpåverkan kunde en del materialposter sorteras under stomkomplettering istället för stomme och därmed inte ingå i klimatberäkningen för anbudet. Detta justerades dock sedan för att optimera byggnaden och dess klimatpåverkan som helhet (Dahlgvist, 2021). I förfrågningsunderlaget för Helsingborgshems nästa projekt med samma profil ”Pålsjö äng”, som även det vanns av NCC, justerades beräkningskravet till att innefatta även stomkomplettering (Eriksson, 2021).

- Betongtransporter

Betongen kommer från Betongindustris närmast belägna fabrik, 10 kilometer ifrån arbetsplatsen. Detta är en relativt kort transportsträcka, den generiska sträckan i BM är 35 kilometer. Betongindustri jobbar med att byta ut drivmedlet för sina betongbilar från diesel till HVO men detta har ännu inte gjorts på fabriken i Helsingborg, chaufförerna har dock blivit informerade om att det finns möjlighet att tanka HVO och var det finns tillgängligt. På fabriken i Billeberga och Staffanstorp finns en HVO-tank på plats vilket gjort att bilarna där helt drivs på HVO istället för diesel (Örwall Lovén, 2021).

4.1.3 Produktion

I produktionen har ansträngningar gjorts för att minimera betongspillet vid gjutningar. Genom noggrann beräkning av mängderna undviks stora restmängder. Av det spill som ändå uppkom vid gjutningar gjöts betongblock som exempelvis kan användas som tung avspärning i senare projekt alternativt säljas vidare. Resultatet blev alltså att spillet som uppkom belastade projektets klimatpåverkan men ändå kom till användning (Eriksson, 2021)

Under produktionen har egenskaperna för den klimatförbättrade betongen utvärderats. I Kv. Kungsörnen är erfarenheterna överlag goda. Betongen har härdat som planerat och formar har kunnat rivas på samma vis som om standardbetong använts. Då det varit mycket varmt sommartid har betongen dock visat sig härda mycket fort vilket gett

upphov till problem under gjutning, detta har gått att lösa på plats med extra vibreringsinsatser (Eriksson, 2021).

De flesta gjutningarna har gjorts med relativt mildt klimat men de sista gjutningarna gjordes i januari och februari 2021 då det stundtals var under 10 minusgrader under gjutning. Att gjuta i kallt väder kräver betydligt mer åtgärder än när det är varmt oavsett vilken betong som används och erfarenheterna från Helsingborg visar inte på att den klimatförbättrade betongen skulle ha signifikant sämre vinteregenskaper än annan betong (Eriksson, 2021).

Följande vinteråtgärder vidtogs i Kungsörnen:

- När temperaturen låg runt 0°C gjöts elvärmekabel in i betongen.
- När det var minusgrader under hela dygnet drogs värmekabeln tätare. Dessutom täcktes betongen med en tunn isolerande matta.
- Då det var som absolut kallast, ca -12°C, gjöts sista valvet. I detta enskilda fall användes utöver värmekabel och isoleringsmatta även fläktar på våningen under för att värma upp betongen.

Dessa åtgärder hade vidtagits även om en mer ”standardbetong” hade använts och är därför inte kopplade till valet av betong i det specifika fallet (Eriksson, 2021).

Erfarenheter från andra projekt påvisar dock andra vinteregenskaper för klimatförbättrad betong jämfört med motsvarande standardbetong. Detta har även visats i testresultat som visar att betong med dessa höga halter av masugnsslag har lägre hållfasthets- och värmeutveckling vid låga temperaturer än betong med högre andel cementklinker. I andra projekt har detta medfört att mer omfattande vinteråtgärder har krävts (Carlswärd, 2021). Den långsammare värme- och hållfasthetsutvecklingen beror på den mindre mängden cement som härdar, desto mer cement desto fortare går härdningsförloppet. Härdningsförloppet är dessutom beroende av temperatur, högre temperatur ger snabbare härdningsförlopp. Är det då både kallt och betongen innehåller lite cement så går härdningen och därmed värme- och hållfasthetsutvecklingen betydligt långsammare än om en betong med mer cement härdar i varma omgivande temperaturer (Wadsö, 2017)

Den klimatförbättrade betongens uttorkningsegenskaper har ännu inte utvärderats i projektet då mätningar av betongens relativa fuktighet inte påbörjats. Betongindustris egna tester visar dock att betongen torkar ut lika bra eller bättre än motsvarande standardbetong (Carlswärd, 2021). När den forcerade uttorkningen ska påbörjas planeras det göras med uppvärmning från pelletseldning på plats med en uppskattad effekt på ca 110 kW per höghus. Genom att värma upp med eldning av pellets minskas utsläppen jämfört med om uppvärmningen skett med direktverkande el, fjärrvärme eller diesel. Detta är något som har gjorts i flera tidigare projekt med goda resultat (Eriksson, 2021).

5 Klimatberäkningar

Beräkningarna gjordes för att erhålla klimatpåverkan per bruttoarea, per A_{temp} och procentuell skillnad relativt Kv. Kungsörnen (Fall1).

För att kunna justera mängderna betong i de olika fallen har en mängdavtagning från ritningarna gjorts för alla byggdelar exklusive grund (under bottenplattor) (Eriksson, 2020; Hammadi 2020).

5.1 Fall 1 – Kv. Kungsörnen

Beräkningen av Fall 1 speglar klimatpåverkan från de avgränsade delarna i det utförda projektet. De byggdelar som tagits med i beräkningen är all betong och armering (exklusive pålarna) samt de stomkompletteringar som gjorts för att klara ljudklass B.

Betongen och armeringen är hämtad från beställda mängder i projektet. För betongen har EPD:er för de använda recepten lagts in i BM. För armeringen och övriga byggmaterial har generiska data enligt IVL:s databas i BM använts.

Mängdavtagningen användes för att uppskatta vilken betong som använts var i konstruktionen då detta inte fanns bokfört. I Figur 4 visas ett urklipp ur BM över inlagda betongmängder, dess EPD:er och motsvarande generiska data.

Status	ID	Benämning	Byggdela	Inköpt mängd	Inläst enhet
	3459	NCC-BIO-2 (SF2)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	28,400000	m ³
	125	Husbyggnadsbetong (C30/37, vct 0.58)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	7,000000	m ³
	3460	NCC-BIO-3 (SF2)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	7,000000	m ³
	472	Anläggningsbetong (vct 0.40, C35/45)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	1,000000	m ³
	3461	REBI	20 - Husunderbyggnad sammansatta	1,000000	m ³
	472	Anläggningsbetong (vct 0.40, C35/45)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	22,400000	m ³
	3462	REBI(SF2)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	22,400000	m ³
	472	Anläggningsbetong (vct 0.40, C35/45)	20 - Husunderbyggnad sammansatta	25,700000	m ³
	3463	FROSTBI	20 - Husunderbyggnad sammansatta	25,700000	m ³
	477	Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	31 - Väggar	15,500000	m ³
	3418	KUNGSÖRNEN BIO-2 VÄGGBI B	31 - Väggar	15,500000	m ³
	477	Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	34 - Bjälklag/balkar	7,600000	m ³
	3429	NCC-BIO-3	34 - Rällkän/balkar	7,600000	m ³

Figur 4. Urklipp från BM över inlagda betongmängder i Fall 1, dess EPD:er samt generiska data

De stomkompletterande skikten är dels ett övergolv på alla mellanbjälklag, dels en påbyggnadsvägg på alla lägenhetsskiljande väggar förutom toalettväggar. Mängderna material kopplade till dessa skikt är hämtade från bygghandlingarna från arkitekten, se Figur 5 nedan (Eriksson, T, 2020).

Klimatsmart betongbyggande

BYGGSSEKTORNS MILJÖBERÄKNINGSVERKTYG
Version 1.0

Projekt: Kungsörnen - Examensarbete

Projektinformation: Byggsedet A1-A3 transp. A4, spill A5.1 | Byggarbetsplatsen AS.2-AS.5

Status	ID	Benämning	Bygghet	Inköpt mängd	Inläst enhet
	30	Spånskiva (VL LCR)	62 - Undergolv	52.600000	m3
	55	Gipsskivor, kartonggipsskivor ospecificerat (VL LCR)	63 - Innervägg	2171.800000	m2
	67	Stenull (VL RR)	62 - Undergolv	148.100000	m3
	67	Stenull (VL RR)	63 - Innervägg	48.900000	m3
	86	Ståltregar (VL LCR)	63 - Innervägg	1107.407000	kg
	86	Ståltregar (VL LCR)	63 - Innervägg	294.950000	kg

Figur 5. Redovisning av de stomkompletterande skikt som erfordrades för att uppnå ljudklass B.

Med alla mängder och klimatpåverkan för de olika byggmaterialen inklusive spill och transporter beräknas en klimatpåverkan för Kv. Kungsörnen enligt Fall 1 med ovanstående avgränsningar. Resultaten är sammanställda i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Resultat från klimatberäkning av Fall 1.

Fall	Kg CO _{2,ekv} /BTA	Kg CO _{2,ekv} /A _{Temp}
Fall 1	86	105

5.2 Fall 2 – Betong enligt branschstandard

Detta fall speglar klimatpåverkan kopplat till betongstommen om Kv. Kungsörnen hade utförts med betongrecept enligt branschstandard. Dess klimatpåverkan hämtades ur IVL:s databas med generiska data baserat på samma hållfasthetsklass för respektive post, se urklipp i Figur 6 nedan. Mängderna är oförändrade från Fall 1.

Projektinformation						Mappning		
	Inköpt mängd	Inläst enhet	Omräkningsfaktor	Spillandel (%)	Kostnad (SEK)	Resurs	Enhet	Std-spill, %
	137.500000	m3	2247.100	5.00		BIO-1	kg	5
NER	196.200000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	kg	5
	196.200000	m3	2306.000	5.00		BIO 3	kg	5
	7.600000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	kg	5
	7.600000	m3	2232.500	5.00		NCC-BIO-3	kg	5
	2.700000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	kg	5
	2.700000	m3	2256.200	5.00		NONAME	kg	5
	778.000000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.60, C28/35)	kg	5
	778.000000	m3	2306.000	5.00		BIO 3	kg	5
	51.900000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.55, C32/40)	kg	5
	51.900000	m3	2216.600	5.00		KUNGSÖRNEN BIO-1 VÄGGBI C	kg	5
	15.200000	m3	2350.000	5.00		Husbyggnadsbetong (vct 0.55, C32/40)	kg	5
	15.200000	m3	2240.400	5.00		NCC-BIO-1	kg	5

Figur 6. Urklipp från BM där skillnad i klimatpåverkan tydliggörs för inlagd EPD och dess motsvarande generiska data

Beräknad klimatpåverkan från alla byggmaterial inklusive spill och transporter för Fall 2 summeras i Tabell 4 nedan:

Tabell 4. Resultat från klimatberäkning av Fall 2.








Fall	Kg CO ₂ , ekv/BTA	Kg CO ₂ , ekv/A _{Temp}	Differans relativt Fall 1 [%]
Fall 2	122	150	+43

5.3 Fall 3 – Dimensioner enligt branschstandard

I Fall 3 beräknades vilken klimatpåverkan Kv. Kungsörnen skulle gett upphov till om standarddimensioner för bjälklag och bärande innerväggar hade använts. Standarden för dessa är 250 mm för bjälklag och 200 mm för lägenhetsskiljande väggar (Eriksson, 2021; Stigenäs, 2021)

I beräkningen har samma betong som i Fall 1 använts och endast dimensionerna för nämnda delar ändrats. I detta fall har dock de kompletterande ljudskikten från Fall 1 tagits bort då dessa skikts enda syfte är att uppnå ljudklass B, vilket görs av själva betongstommen om standarddimensioner används (Svensk Betong, 2018).

För de byggdelar med reducerade dimensioner har arean för respektive byggdel multiplicerats med påbyggnadstjockleken, 50 mm, och sedan lagts till i BM som en extra post med samma betong som används för respektive byggdel i Fall 1, se Figur 7 nedan.

477	Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35)	34 - Bjälklag/balkar	 	215,800000	m3
3428	BIO 3 - 5 cm pågjutning	34 - Bjälklag/balkar	 	215,800000	m3
477	Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35)	31 - Väggar	 	90,300000	m3
3406	KUNGSÖRNEN BIO-3 VÄGGBI B - 5 cm pågjutning	31 - Väggar	 	90,300000	m3

Figur 7. Adderade betongmängder för pågjutning enligt standardmängder

Beräknad klimatpåverkan från alla byggmaterial inklusive spill och transporter för Fall 3 summeras i Tabell 5 nedan:

Tabell 5. Resultat från klimatberäkning av Fall 3.

Fall	Kg CO ₂ , ekv/BTA	Kg CO ₂ , ekv/A _{Temp}	Differens relativt Fall 1 [%]
Fall 3	85	104	-1

5.4 Fall 4 – Armering enligt branschstandard

I Fall 4 beräknades klimatpåverkan på samma underlag som i Fall 1 men med tillagda mängder armering motsvarande vad som har sparats in i Kv. Kungsörnen. Detta gjordes för att beräkna vilken effekt denna besparingsåtgärd har gett.

Alla armeringsnät beställdes med specialmått cc 200x400 mm, närmast tillgängliga mått i standardutförande är cc 200x200. I innerväggarna högre upp i höghusen användes dessutom mindre armering än i de nedre våningarna.

Den totala reduktionen beräknades som skillnaden i armeringsåtgång multiplicerat med volymen innervägg för berörda våningsplan samt mängden insparad armering i armeringsnäten. Med tillägg av den generiska spillfaktorn för armering i BM på 10% resulterar detta i en total ökning på ca 6 % armeringsstål relativt Fall 1.

Beräknad klimatpåverkan från alla byggmaterial inklusive spill och transporter för Fall 4 summeras i Tabell 6 nedan:

Tabell 6. Resultat från klimatberäkning av Fall 4 med pålagda armeringsmängder.



Fall	Kg CO _{2, ekv} /BTA	Kg CO _{2, ekv} /A _{Temp}	Differans relativt Fall 1 [%]
Fall 4	86	106	1

5.5 Fall 5 – Utformning enligt ljudklass C

I Fall 5 beräknades klimatpåverkan baserat på att mellanbjälklag och lägenhetsskiljande väggar utformats för att endast uppnå ljudklass C istället för B som i övriga fall.

Föreskrivna dimensioner i enlighet med ljudklass C för bjälklag och lägenhetsskiljande är 200 mm respektive 180 mm (Svensk Betong, 2018). Betongmängderna i mellanbjälklagen förändras alltså ej men de lägenhetsskiljande innerväggarna är tjockare än Fall 1. Samtliga ljuddämpande skikt tas bort. Betongrecept och armeringsmängder är de samma som i Fall 1.

Arean för de påverkade innerväggarna har multiplicerats med påbyggnadstjockleken, 30 mm, och sedan lagts till i BM som en extra post med samma betong som används för respektive byggdel i Fall 1, se Figur 8 nedan.

477	Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35) PÅGJUTNING 3CM	31 - Väggar		50,140000	m3
3406	KUNGSÖRNEN BIO-3 VÄGGBI B PÅGJUTNING 3CM	31 - Väggar		50,140000	m3

Figur 8. Adderade betongmängder för pågjutning enligt ljudklass C.

Beräknad klimatpåverkan från alla byggmaterial inklusive spill och transporter för Fall 5 summeras i Tabell 7 nedan:

Tabell 7. Resultat från klimatberäkning av Fall 5.

Fall	Kg CO ₂ , ekv/BTA	Kg CO ₂ , ekv/A _{Temp}	Differens relativt Fall 1 [%]
Fall 5	80	98	-7

5.6 Fall 6 – Reducerad produktionstid genom användande av betong med lägre vct

Fall 6 speglar klimatpåverkan från projektet under förutsättning att betongen som används väljs för att få en kortare byggtid istället för att minska klimatpåverkan. I rapporten "Klimatförbättrad betong" redovisas förslag på betong som torkar fort och därmed ger kortare produktionstider. Två olika betongrecept är rekommenderade baserat på om uttorkningskravet för tätskiktapplicering/ytskikt golv är 85 eller 90% RF, se Figur 9 nedan (Svensk Betong, 2021).

	Exponeringsklass	Branschreferens			Klimatförbättrad steg 1		Klimatförbättrad steg 2		Klimatförbättrad steg 3	
		vct	cement	kg CO ₂ /m ³	max kg CO ₂ /m ³	förbättr jfr referens %	max kg CO ₂ /m ³	förbättr jfr referens %	max kg CO ₂ /m ³	förbättr jfr referens %
1. Hus invändigt										
Delar med uttorkningskrav 85% RH. T.ex. vid beläggning med plastmatta eller i vissa fall parkett.	X0; XC1	0,35	500 kg CEM II**	365	330	10	*	*	*	*
Delar med uttorkningskrav 90% RH. T.ex. bjälklag.	X0; XC1	0,45	420 kg CEM II**	305	275	10	*	*	*	*

Figur 9. Branschreferens från Svensk Betong över betongrecept (Svensk Betong, 2021).

I projektet är kravet 85% i badrum och 90% för övriga golvytor. Det är dock samma betong som använts i alla mellanbjälklag oavsett uttorkningskrav (Eriksson, 2021). BIO-3 betongen som använts i Kv. Kungsörnen tillhör kategorin klimatförbättrad steg 3 som i Svensk betongs rapport ej ansågs möjlig att använda i sammanhanget (Svensk Betong, 2021).

I BM beräknades klimatpåverkan då betongen i bjälklag och lägenhetsskiljande innerväggar bytts ut mot den generiska resurs som bäst stämde överens med svensk betongs branschreferenser. De lägenhetsskiljande väggarna togs med för att badrummen är placerade mot dessa och således också är berörda av kravet på 85 % RF.

För fallet snabb uttorkning till 90% RF, Fall 6a, valdes generiska data för husbyggnadsbetong, vct 0,45, hållfasthetsklass C40/50. Se Figur 10 nedan.

Klimatsmart betongbyggande

Projekt: Kungsörnen -Fall 4: reducerad tidplan (90% RF)						Mapping		
Inköpt mängd	Inläst enhet	Omräkningsfaktor	Spillandel (%)	Kostnad (SEK)	Resurs	Enhet	Std-spill, %	
530,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35)	kg		5
530,000000	m3	2214.100	5,00		KUNGSÖRNEN BIO-3 VÄGGBI B	kg		5
14,600000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35)	kg		5
14,600000	m3	2178.100	5,00		NCC-VÄGG-B	kg		5
390000,000000	kg	1.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,60, C28/35)	kg		5
390000,000000	kg	1.000	5,00		BIO-3	kg		5
52,600000	m3	630.000	5,00		Spånskiva (IVL LCR)	kg		5
148,100000	m3	155.000	5,00		Stenull (IVL RR)	kg		5
48,900000	m3	30.000	5,00		Stenull (IVL RR)	kg		5
1107,407000	kg	1.000	10,00		Stålręklar (IVL LCR)	kg		10
294,950000	kg	1.000	10,00		Stålręklar (IVL LCR)	kg		10
778,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,45, C40/50)	kg		5
155,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,45, C40/50)	kg		5

Figur 10. Urklipp ur BM med betong enligt rekommendation för snabb uttorkning till 90% (Svensk Betong, 2021). De två sista raderna representerar den valda betongen för uttorkning till 90 %.

I fallet för snabb uttorkning till 85%, Fall 6b, valdes en Husbyggnadsbetong, vct 0,37, hållfasthetsklass C50/60, se urklipp i Figur 11 nedan.

Projekt: Kungsörnen -Fall 4: reducerad tidplan (85% RF)						Mapping		
Inköpt mängd	Inläst enhet	Omräkningsfaktor	Spillandel (%)	Kostnad (SEK)	Resurs	Enhet	Std-spill, %	
51,900000	m3	2216.600	5,00		KUNGSÖRNEN BIO-1 VÄGGBI C	kg		5
15,200000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,55, C32/40)	kg		5
15,200000	m3	2240.400	5,00		NCC-BIO-1	kg		5
137,500000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,55, C32/40)	kg		5
137,500000	m3	2247.100	5,00		BIO-1	kg		5
143,200000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,55, C32/40)	kg		5
143,200000	m3	2206.600	5,00		BIO-1	kg		5
139,500000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,55, C32/40)	kg		5
139,500000	m3	2350.000	5,00		BIO-3	kg		5
21,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,40, C45/55)	kg		5
21,000000	m3	2273.300	5,00		NCC-2	kg		5
778,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,37, C50/60)	kg		5
155,000000	m3	2350.000	5,00		Husbyggnadsbetong (vct 0,37, C50/60)	kg		5

Figur 11. Urklipp ur BM med betong enligt rekommendation för snabb uttorkning till 85% RF (Svensk Betong, 2021). De två sista raderna representerar den valda betongen för uttorkning till 85 % RF.

Som redovisas i Tabell 8 nedan så ger användandet av BIO-3 (C28/35) en beräknad relativ minskning av klimatpåverkan på drygt hälften av utsläppen jämfört med om snabbtorkande betong använts i de byggdelar som berörs av uttorkningskrav. Denna stora skillnad i klimatpåverkan beror på en kombination av lägre vct samt högre hållfasthetsklass.

Klimatsmart betongbyggande

Tabell 8. Ökning av klimatpåverkan relativt BIO-3 (C28/35) baserad på mängden betong använd i mellanbjälklag och lägenhetsskiljande innerväggar i de olika fallen.

Betongtyp	Ökning av klimatpåverkan relativt BIO-3 (C28/35) per m ³ betong
Snabbtorkande till 90% RF, vct _{ekv} 0,45, C40/50(6a)	+129%
Snabbtorkande till 85% RF, vct _{ekv} 0,37, C50/60 (6b)	+145%

Genom att använda en mer snabbtorkande betong, dvs. en betong med lägre vct, minskas torktiden och behovet av uttorkningsinsatser så som uppvärmning och avfuktning. Uttorkningsinsatser leder till ökad energianvändning och med det ökad klimatpåverkan. Dessa åtgärders klimatpåverkan i relation till betongens påverkan analyseras vidare nedan.

Då uttorkningsinsatser ännu inte påbörjats i projektet gjordes följande antaganden för att beräkna de medföljande utsläppen. I fallet med snabbtorkande betong antogs 10 veckors, dvs. 2,5 månader, uppvärmning. För projektet Kv. Kungsörnen antogs uttorkningstiden dubbleras till 5 månader med samma insatta effekt på grund av användandet av den klimatförbättrade betongen. Den planerade effekten på insatt uppvärmning under uttorkningstiden är ca 220 kW baserat på tidigare erfarenheter i andra projekt (Eriksson, 2021).

Beroende på hur lång uttorkningstiden är, 2,5 respektive 5 månader i de undersökta fallen, ges en summa tillförd effekt i kilowattimmar. Se Tabell 9 nedan.

Tabell 9. Tillförd uppvärmningsenergi för undersökta fall.

Fall	Tillförd uppvärmningsenergi [kWh]
2,5 månaders torkklimat	396 000
5 månaders torkklimat	792 000

I kap 5.6.1 görs en teoretisk beräkning av det energibehov som krävs för att upprätthålla tillräckligt torkklimat på 18°C i byggnaderna. Detta görs som en kompletterade beräkning till den planerade energianvändningen i projektet.

I Kv. Kungsörnen kommer två pelletsbrännare på arbetsplatsen att användas för att täcka uppvärmningsbehovet, detta är ett aktivt val för att minska klimatpåverkan i projektet, se Figur 12 nedan.



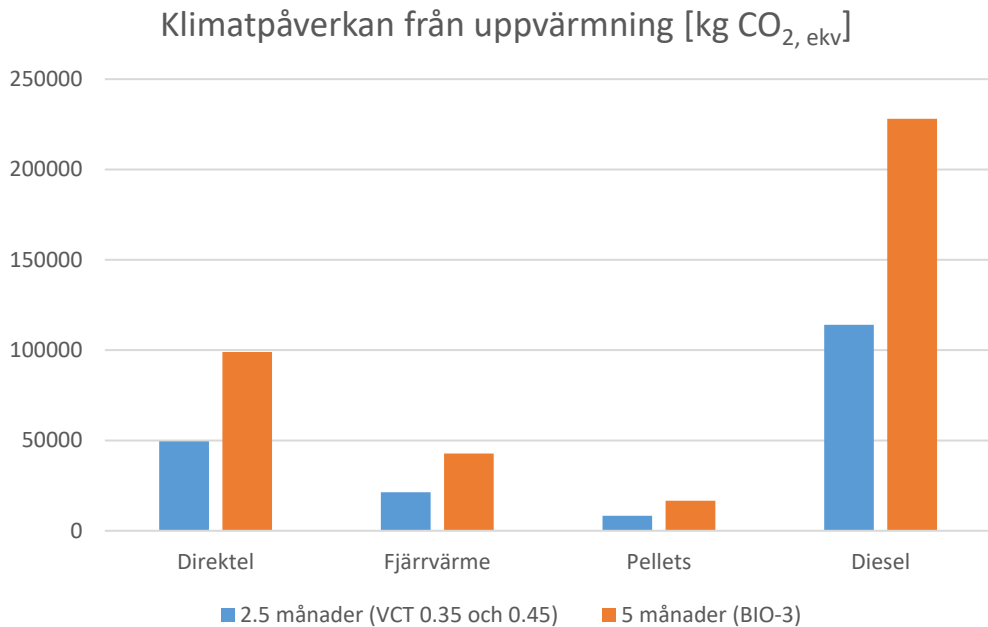
Figur 12. En av pelletsanläggningarna som användes i Kv. Kungsörnen.

I övriga projekt är det vanligt att direktverkande el eller fjärrvärme används. I vissa fall används även diesel fortfarande. Dessa olika energikällor ger upphov till olika stor klimatpåverkan. Resultaten av val av energikälla har analyserats och presenteras i Tabell 10 nedan.

Tabell 10. Klimatpåverkan för olika energislag

Energislag	Klimatpåverkan [kg CO _{2,ekv} /kWh]	Källa
Direktverkande el (nordisk elmix)	0,125	(Martinsson <i>et al.</i> , 2012)
Fjärrvärme	0,054	(Öresundskraft, 2021)
Pellets	0,021	(Energihandbok, 2021)
Diesel	0,288	(Energihandbok, 2021)

Baserat på klimatpåverkan för respektive energislag (Tabell 10) och tillförd uppvärmningsenergi (Tabell 9) beräknades klimatpåverkan från torkinsatserna i de olika fallen, se Figur 13 nedan.



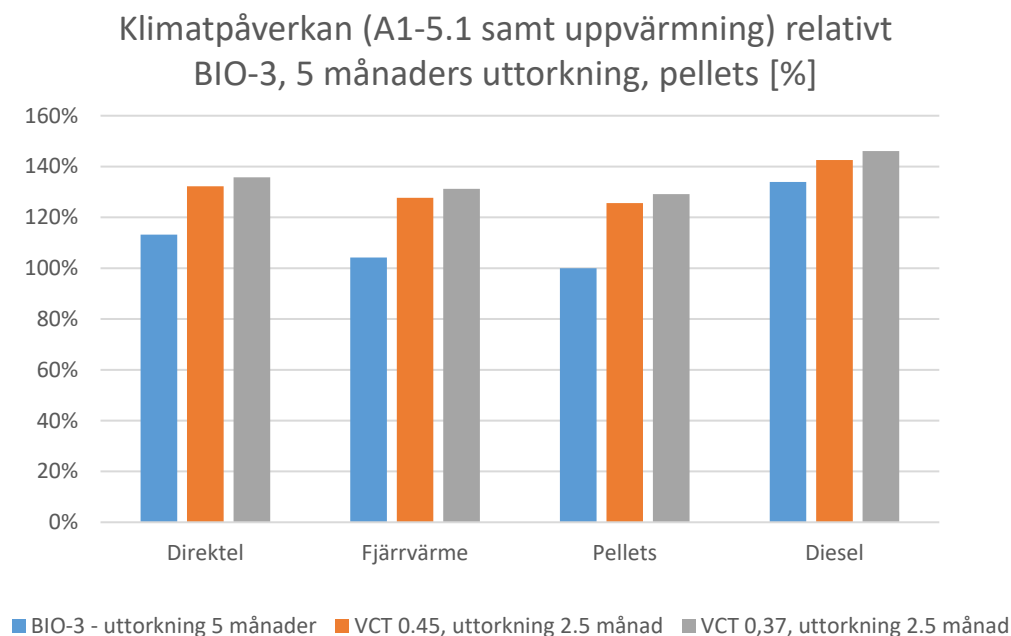
Figur 13. Klimatpåverkan endast från uppvärmning i de undersökta fallen.

För att beräkna total klimatpåverkan summerades utsläppen från uppvärmningen med klimatpåverkan från byggmaterialen inklusive transporter för varje fall. Klimatpåverkan från byggmaterialen presenteras i Tabell 11 nedan. Skillnaden i klimatpåverkan enbart från de olika betongkvaliteterna i bjälklag och innerväggar, dvs. de poster som ändras för att minska uttorkningstiden, är presenterade separat i Tabell 8.

Tabell 11. Klimatpåverkan endast från stommen i undersökta fall.

Betongtyp	Ökning av klimatpåverkan relativt Fall 1 [%]
BIO-3 (C28/35)	-
VCT 0.45, C40/50 (6a)	28 %
VCT 0.37, C50/60 (6b)	31 %

Den totala klimatpåverkan (A1-5.1 samt uppvärmning) i undersökta fall presenteras i Figur 13 nedan.



Figur 13. Klimatpåverkan i de undersökta fallen beroende på betongtyp i byggdelar med uttorkningskrav och energislag för uppvärmning, relativt BIO-3 (C28/35) betong och uppvärmning med pellets i 5 månader.

Enligt resultaten presenterade ovan framgår det att det gör stor skillnad vilket energislag som används för uttorkningen. Används diesel istället för pellets så genereras en 14 gånger större klimatpåverkan för uppvärmningen. Beräkningarna visar dock att utsläppen som genereras av byggmaterialen är betydligt större än de från uppvärmningsinsatserna, oavsett använt energislag.

Klimatpåverkan beräknas bli mindre om BIO-3 används trots att hela byggnaden sedan torkas ut med direktverkande el under dubbel så lång tid som om någon av de snabbtorkande betongtyperna används och torkas ut med pellets under hälften så lång tid.

5.6.1 Teoretisk beräkning av energibehov för uttorkning av betongen

För att teoretiskt beräkna uppvärmningsenergin som krävs för att upprätthålla avsett torkklimat måste värmeförlusterna genom klimatskalet samt avdunstningsenergin för överskottsvattnet i betongen beräknas. Överskottsvattnet innefattar allt vatten i betongen som inte binds i betongen under härdningen, detta vatten är endast med i receptet för att få rätt egenskaper under gjutning.

Beräkningen grundar sig på en sammanslagning av alla de fyra separata byggnaderna och en samlad torkinsats för hela projektet. I projektet görs hela torkinsatsen på en gång då den påbörjas efter all gjutning är genomförd, i de andra referensfallen baserade på snabbtorkande betong hade torkåtgärderna antagligen delats upp våningsvis men slutsumman av tillförd energi antas bli likvärdig.

Exempel - Värmeförluster genom klimatskalet

Värmeförlusterna för projektet beräknas med indata från den befintliga energiberäkningsrapporten (Dahlqvist, 2020). Ett viktat medelvärde för alla husen har använts för den genomsnittliga värmeegenomgångskoefficienten, U_m . Omslutande area (A_{om}) och uppvärmd area (A_{temp}) är summerade för de fyra byggnaderna. Följande data från rapporten har använts, se Tabell 12 nedan.

Tabell 12. Indata från energiberäkningsrapport för Kungsörnen i färdigt skick (Dahlqvist, 2020).

U_m	0,331 W/m ² K (inklusive köldbryggor)
q_{50}	0,4 l/s*m ²
A_{om}	Enligt handling
A_{Temp}	Enligt handling

Beräkningsmetoden som användes följer gällande standard SS-EN 13789 (Ics, 2008) Följande generella indata har också använts vid beräkningarna, se Tabell 13 nedan.

Tabell 13. Generella indata och definitioner för energiberäkningar.

$\rho_{luft\ 20^{\circ}C}$	1,2 kg/m ³ (FEBY, 2018)
c_{luft} (specifik värmekap.)	1000 W/kg°C (FEBY, 2018)
e (vindskyddskoefficient)	0,07 (FEBY, 2018)
$q_{läck}$	Luftflöde läckage [l/s]
d	Relativ drifttid ventilation [%]
v	Verkningsgrad återvinning [%]
q_{vent}	Luftflöde styrd ventilation [l/s]
H_T	Värmeflödeskoefficient [W/°C]
VFT	Värmeförlusttal [W/m ² _{Atemp}]

$$H_T = U_m * A_{omsl} + \rho * c * q_{läck} + \rho * c * d * q_{vent} * (100 - v) [W/°C] \quad (3)$$

$$q_{läck} = q_{50} * A_{omsl} * e \quad (4)$$

$$VFT = H_T * \frac{\Delta T}{A_{temp}} [W/m^2_{Atemp}] \quad (5)$$

Beräkningar enligt ovan gav följande resultat:

$$q_{\text{läck,Kungsörnen}} = 179 \text{ l/s} \quad (4)$$

$$H_{T,Kungsörnen} = 2336 \text{ W/}^\circ\text{C} \quad (3)$$

I ovan beräkning har ventilationen satts till noll då ventilationssystemet under uttorkningen av betongen antas ej vara färdigställd. Hur tätt huset är och hur mycket som vädras under uttorkningstiden är något som måste uppskattas. Att huset skulle vara lika tätt som efter färdigställande, alltså enligt data i energiberäkningsrapporten, antas som det bästa möjliga fallet. Det verkliga scenariot under produktionstiden är betydligt otätare (Burke, 2021).

För att beräkna energibehovet behöver hänsyn tas till rådande utomhustemperaturer under uttorkningstiden samt vilken temperatur som ska upprätthållas inomhus. Torkklimatet i byggnaderna antas vara 18°C. Normaltemperaturer, medelvärden för Helsingborg baserat på mätningar 1991-2020, har hämtas från SMHI:s väderstatistik, se Tabell 14 nedan (SMHI, 2021).

Tabell 14. Temperaturstatistik för Helsingborg 1991-2020 (SMHI, 2021)

Månad	Medeltemperatur [°C]
Januari	0,9
Februari	0,9
Mars	3,0
April	7,5
Maj	11,9
Juni	15,2
Juli	17,6
Augusti	17,4
September	13,8
Oktober	9,1
November	5,1
December	2,3
Normalårstemperatur	8,7

De tre undersökta fallen baserades på samma datum för första mellanbjälklagsgjutning, dvs. den 1:a september. Då det enligt planen skulle vara torrt nog efter åtta månader antogs torkinsatserna sättas igång den 1:a december och pågå i fem månader (Landgren, 2020). För de alternativa fallen med samma datum för torkstart antogs uttorkningen alltså vara klar 2,5 månader tidigare än i den ursprungliga tidplanen.

Energibehovet per månad för alla byggnaderna beräknades med ekvation 5 enligt SS-EN ISO 13789:2007 (Ics, 2008) med insättning av mängder och areor för alla fyra

Klimatsmart betongbyggande

byggnaderna samt normaltemperaturer för respektive aktuell månad enligt Tabell 15 nedan.

Tabell 15. Uppvärmningsbehov för alla byggnader per månad.

Månad	Uppvärmningsbehov [kWh]
December	27 286
Januari	29 719
Februari	29 719
Mars	26 069
April	18 249
Totalt	131 043

Avdunstningsenergi - exempelberäkning

Då det saknas data för att beräkna mängden byggfukt i de undersökta betongerna gjordes en exempel-beräkning baserad på sorptionskurvor för betong med vct 0,55 och 0,65 med portlandscement. Dessa hämtades ur fukthandboken och är baserade på mätningar efter 9 månaders härdning (Harderup, Arfvidsson and Samuelsson, 2017). Värdena i denna beräkning är alltså inte representativa för fallet men visar en möjlig metod för beräkning av avdunstningsenergi under uttorkningskedet.

I desorptionskurvorna kan fukthalt vid 95, 90 och 85 % relativ fuktighet utläsas. Differensen mellan dessa antogs motsvara den mängd vatten per kubikmeter betong som måste torkas ut för att den undersökta betongen ska komma ner till den nivå som krävs enligt uttorkningskraven. Desorptionskurvorna gäller för betong efter 9 månaders härdning. För nygjuten betong binds en del vatten kemiskt.

Tabell 16. Avlästa mängder byggfukt för betong med portlandcement efter 9 månaders härdning.

Betongtyp	Byggfukt att torka ut från 95% till 90% RF [kg/m ³]	Byggfukt att torka ut från 95% till 85% RF [kg/m ³]
Vct 0,55	68–60=8	68–55=13
Vct 0,65	48–41=7	48–37=11

Volymen betong som ska torkas ut baserades på använda mängder betong i projektet exklusive grunden. I detta beräkningsexempel antogs denna volym innehålla byggfukt enligt tabell 16 ovan. All betong, exklusive grunden, togs med i beräkningen då det antogs omöjligt att genomföra en riktad uttorkning endast mot bjälklag och innerväggar, som är de delar som måste torkas ut i projektet. De totala mängderna vatten som ska torkas ut i respektive exempel summerades som volymen betong multiplicerat med mängden byggfukt per kubikmeter betong.

Mängden energi som behöver tillsättas för att förångas detta vatten ges utav att mängden vatten multiplicerat med dess ångbildningsenergi, 2455 kJ/kg, baserat på antaget uttorkningsklimat (18°C). Det beräknade energibehovet presenteras i Tabell 17 nedan.

Klimatsmart betongbyggande

Tabell 17. Summering av krävd tillförd energi för uttorkning av byggfukt i undersökta fall. Omvandlingen från MJ till kWh görs genom att dividera med antalet sekunder på en timme.

Betongtyp	Total mängd byggfukt [kg] (85% RF)	Ångbildningsenergi [MJ]	Tillförd energi [kWh]
Vct 0,55	28 119	69 032	19 176
Vct 0,65	23 793	58 412	16 226

Beräknat energibehov för uttorkningen av betongen

För fallen med snabbtorkande betong måste energi tillföras motsvarande avdunstningsenergin för byggfukten samt uppvärmningsbehovet från första december till mitten på mars. För fallet med BIO-3 betong måste avdunstningsenergin och uppvärmningsbehovet för hela perioden december till slutet på april summeras. Då data saknas för beräkning av byggfukt i de aktuella fallen så kunde denna summering inte göras i rapporten.

Om säkra siffror funnits för de olika betongtypernas faktiska uttorkningsegenskaper samt husets täthet under uttorkningstiden antas en beräkning enligt metod ovan kunna användas för att beräkna minimal tillförd energi under uttorkningsskedet.

I denna rapport användes istället planerad tillförd effekt då detta är de faktiskt gällande siffrorna i projektet. I Fall 7 (kap 5.7.2) gjordes en djupare analys av otätheterna för uppskattning av årstidsinverkan på uppvärmningsbehovet.

5.7 Fall 7 – Inverkan av årstid

Väderförhållanden har stor inverkan på byggproduktion i stort och för vissa moment i synnerhet. I detta fall undersöktes påverkan på de moment i projekt Kungsörnen som är mest berörda av vädret och framförallt temperaturen. Dessa moment antogs vara gjutningar, golvläggning, invändig målning och murning av tegelfasaden. Markarbeten undersöktes inte i detta fall då det sällan är så kallt i Skåne att tjäle orsakar större problem.

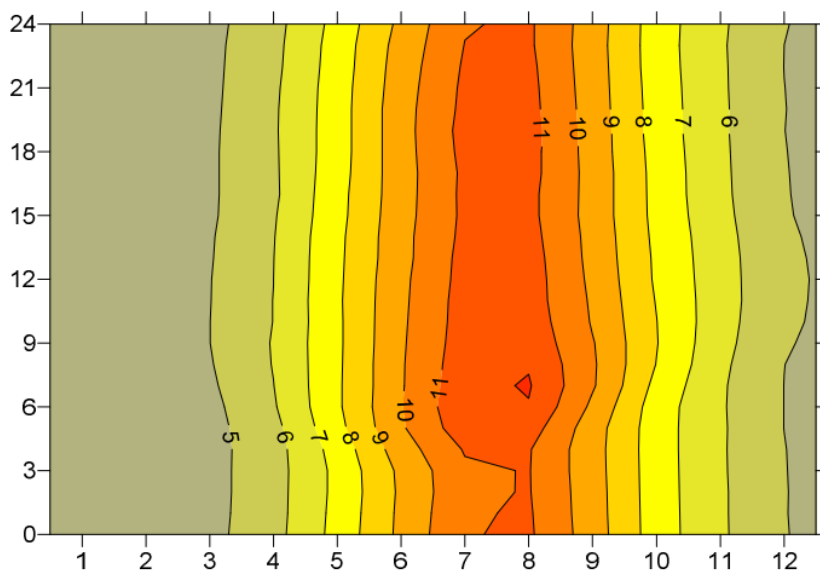
I detta fall studerades endast projektets två höghus, Kungsörnen (Hus 1) och Knoppen (Hus 2). De undersökta arbetsmomenten och de planerade tiderna redovisas i Tabell 18 nedan.

Tabell 18 - Studerade arbetsmoment och deras respektive start- och sluttider.

Arbetsmoment	Start	Slut
Gjutning väggar/bjälklag	Juni 2020	Februari 2021
Murning	November 2020	Juli 2021
Golvläggning och målning	April 2021	December 2021

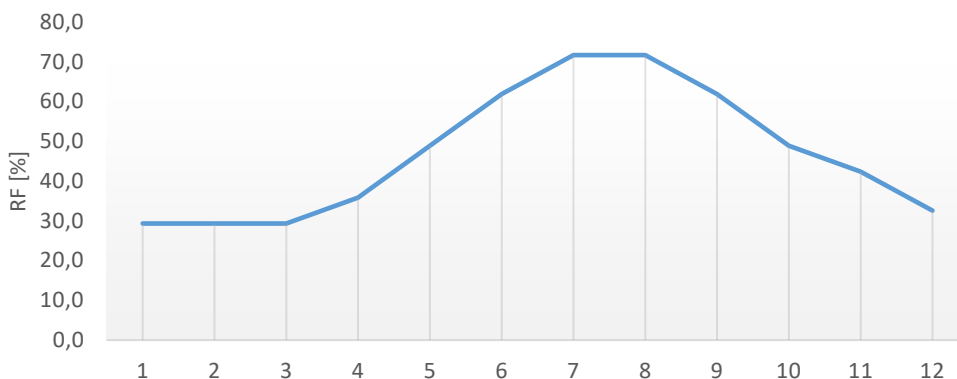
5.7.1 Klimatdata Helsingborg

För att beräkna energibehovets variation över året måste aktuella klimatdata vara kända. Denna data är sammanställd i Figur 14, Figur 15 samt Tabell 19.



Figur 14. Genomsnittlig ånghalt (v) i utomhusluft för Helsingborg 1996–2012 [g/m^3]. Dygnsvariation Y-axel, månadsvariation X-axel (Wern, 2013).

Den relativa fuktighetens årsvariation inomhus
(18°C)



Figur 15. Den relativa fuktighetens genomsnittliga variation över året inomhus i Helsingborg baserat på SMHI:s klimatdata och en innetemperatur på 18°C. Hänsyn har inte tagits till fuktillskott från exempelvis betong eller andra källor. 1 representerar januari osv.

Tabell 19. Genomsnittlig månadsvariation av temperatur, ånghalt och relativfuktighet utomhus för Helsingborg samt beräknade värden för inomhusklimatet i Kv. Kungsörnen baserat på konstant inomhustemperatur på 18°C.

Månad	Veckor 2021	v [g/m ³]	T _{ute} [°C]	V _{s,ute} [g/m ³]	RF _{ute} [%]	T _{inne} [°C]	V _{s,inne} [g/m ³]	RF _{inne} [%]
Januari	v1-4	4,5	0,9	5,16	87,2	18	15,36	29,3
Februari	v5-8	4,5	0,9	5,16	87,2	18	15,36	29,3
Mars	v9-13	4,5	3	5,95	75,6	18	15,36	29,3
April	v13-17	5,5	7,5	8,01	68,7	18	15,36	35,8
Maj	v18-21	7,5	11,9	10,6	70,8	18	15,36	48,8
Juni	v22-26	9,5	15,2	12,99	73,1	18	15,36	61,8
Juli	v26-30	11	17,6	15	73,3	18	15,36	71,6
Augusti	v31-35	11	17,4	14,82	74,2	18	15,36	71,6
September	v35-39	9,5	13,8	11,92	79,7	18	15,36	61,8
Oktober	v39-43	7,5	9,1	8,88	84,5	18	15,36	48,8
November	v44-48	6,5	5,1	6,85	94,9	18	15,36	42,3
December	v48-52	5	2,3	5,68	88,0	18	15,36	32,6

5.7.2 Uppskattning av otätheter under produktionsskedet

För att beräkna energibehovets variation över året baserad på tillförd uppvärmningsenergi behövde ett luftläckage uppskattas. Planerade värden på tillförd uppvärmningseffekt finns endast för de vintermånader då uppvärmning kommer

Klimatsmart betongbyggande

användas i Kv. Kungsörnen, dessa värden är alltså inte representativa för uppvärmningsbehovet under resterande del av året.

En intern analys på NCC har gjorts för att optimera energianvändande under produktionskedet. Grova siffror uppskattades då för otätheter i fallen odrevade, drevade och fogade fönster och dörrar i fasader (Flodberg Munck, Maljanovski, 2020). I en lufttäthetsprovning av en skola uppmättes ungefärliga värden på hur stort luftläckaget var under byggskedet. Vid mätningstillfället var byggnadens ytterväggar och tak färdigställda, fönster drevade och fogade och fasadöppningar var tätade med provisoriska plywooddörrar eller permanenta partier som drevats men inte fogats. 50 Pa tryckskillnad gick inte att uppnå under mättillfället, läckageflödet extrapolerades därför för att representera 50 Pa tryckskillnad (Bengtsson, 2021).

De uppskattade respektive uppmätta och extrapolerade värdena för läckage vid 50Pa tryckdifferens är sammanställda i Tabell 20 nedan.

Tabell 20. Uppskattat (odrevat, drevat, fogat) respektive uppmätt/extrapolerat (skola) läckage beroende på otätheter vid fönster och dörrar.

Fall	q_{50} [l/s*m ²]
Odrevat	30
Drevat	15
Skola (under produktion)	1,15
Fogat	0,4

Då effektbehovet beräknades enligt ekvation 3-5 med läckage enligt Tabell 20 och klimatdata enligt kapitel 5.7.1, erhöles följande resultat för december till april, se Tabell 21 nedan.

Tabell 21. Beräknat effektbehov beroende på otätheter och månad.

Månad	Odrevat [kW]	Drevat [kW]	Fogat [kW]	Skola [kW]
December	287	160	37	48
Januari	312	174	40	52
Februari	312	174	40	52
Mars	274	153	35	46
April	192	107	25	32

Det uppskattade läckaget i det fogade fallet är detsamma som det antagna värdet i energiberäkningsrapporten och ger därför samma effektbehov (Dahlqvist, 2021). De beräknade effekterna för de odrevade och drevade fallen är i samma storleksordning som den planerade tillförda effekten för Kv. Kungsörnen som är 220 kW under samma period (Eriksson, 2021).

Med insättning av den planerade tillförda effekten beräknades ett teoretiskt läckage med omskrivning av ekvation 5:

$$q_{50} = \frac{\frac{\text{Tillförd effekt}}{\Delta T} - U_m * A_{om}}{\rho * c * A_{om} * e} = 20 \frac{l}{s * m^2} \text{ (vid } 50Pa) \quad (6)$$

Detta läckage antogs vara den uppskattning som ligger närmast verkligheten för Kv. Kungsörnen och användes därför i beräkning av värmeförluster i detta fall. Mätningarna från skolan antyder dock att det finns mycket energi, och med det utsläpp, att spara genom att täta och optimera tidpunkt och utformning av uppvärmningen.

5.7.3 Gjutningar

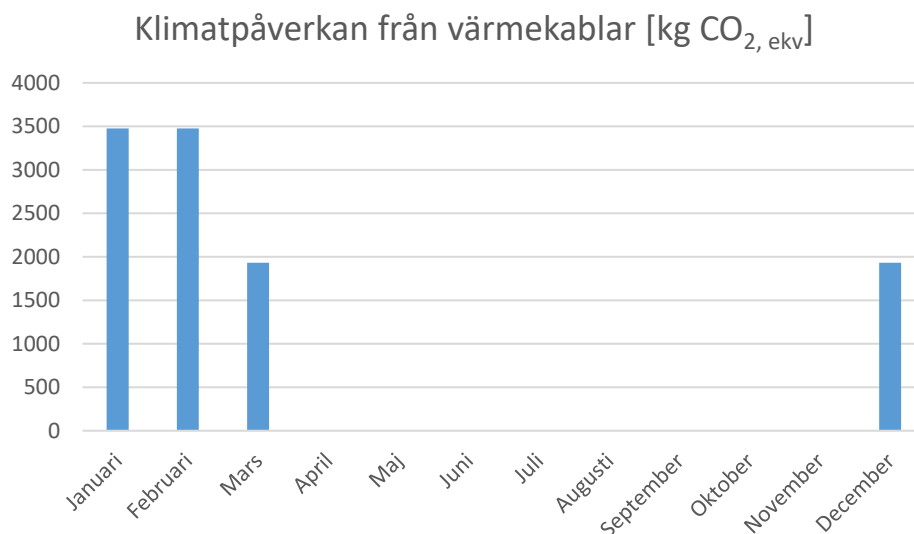
Gjuts det när temperaturen är över 5°C behövs under normala omständigheter inga åtgärder för att försäkra sig om att betongen härdras som den ska. När temperaturen ligger runt 0°C har det i projektet gjutits in värmekablar i betongen. När det varit minusgrader någon gång under dygnet har cc-avståndet minskats på värmekablarna och en tunn isoleringsmatta har lagts på betongen efter gjutning. Vid sista valvgjutningen i höghusen var det ca -10°C och då sattes även värmefläktar in på våningen under (Eriksson, 2021). De extra åtgärder som har vidtagits vid kallt väder ger upphov till en klimatpåverkan som inte hade uppkommit om alla gjutningar förlagts under den varma delen av året.

Ett vanligt förekommande komplement under vintergjutningar är att använda förvärmad betong, det vill säga att betongen blandas med varmt vatten på fabrik och sedan eventuellt värms även under transport. Detta ansågs inte nödvändigt i projektet (Fredriksson, 2021). Det är även vanligt att använda en betong med högre andel cement alternativt använda tillsatsmedel för att på så vis öka betongens egen värmeutveckling, detta ger dock upphov till större klimatpåverkan (Olsson, 2021).

Åtgärderna som vidtagits i projektet är enligt platschefen oförändrade gentemot om en ”standardbetong” med mer cement hade använts. Detta har fungerat väl i projektet trots att studier inom ämnet visar att en klimatförbättrad betong med mindre cement bör behöva större åtgärder för att härda i kallt klimat än motsvarande ”standardbetong” (se kapitel 4.1.3). Detta är något som bör beaktas vid användande av klimatförbättrad betong under vintertid. I detta kapitel är beräkningarna baserade på de vidtagna åtgärderna i projektet och tar därmed inte hänsyn till några extra åtgärder beroende av betongvalet, då så inte var fallet i detta specifika projekt.

För att räkna fram vilket energibehov som tillkommer vid användandet av värmekablar summerades den area betong som totalt gjuts under 6 månader. Denna area delades sedan med den planerade produktionstiden för att ta fram en genomsnittlig gjuten area per månad. Värmekabeln antogs vara igång i tre dygn efter gjutning vilket innebär att ett genomsnitt på 3/30=10 % av den gjutna betongen under en månad är konstant uppvärmd.

Med känd effekt från värmekablarna, centrumavstånd vid olika temperaturer samt klimatpåverkan för direktverkande nordisk elmix beräknades klimatpåverkan per månad vilket presenteras i figur 16 nedan.



Figur 16. Klimatpåverkan från användandet av värmekablar under härdning i Kv. Kungsörnen, baserad på användning av nordisk elmix.

5.7.4 Golvläggning och målningsarbeten

Innan golv och tätskikt läggs på betongen måste betongen ha torkat ut till den RF som föreskrivits för de aktuella golven/tätskikten. I Kungsörnen är uttorkningskravet för tätskikten i badrum 85 % RF medan kravet för övriga golvsikt, främst parkett, är 90%.

Läggs golven i början av sommaren behövs ingen eller väldigt små åtgärder vidtas för att klara uttorkningen under våren då det är varmt och utomhusluften är relativt torr. I detta, för golvläggningen, optimala fall behövs oftast bara begränsad uppvärmning och tillräcklig ventilation åstadkommas för att betongen ska torka ut under kravnivån. I detta fall behöver ingen eller lite energi tillföras för uttorkningen och därmed uppkommer ingen extra klimatpåverkan från uttorkningen.

Läggs golven istället under slutet av sommaren har det varit varmt under uttorkningsperioden men även fuktigt då ånghalten i luften ökar under sommaren. I dessa fall krävs ofta avfuktning åtgärder tillsätts för att uttorkningen ska fungera som önskat. Avfuktare kräver energi som i sin tur ger upphov till en klimatpåverkan.

I de fall då golvläggning görs under tidig vår eller vinter har det ofta varit för kallt, och därmed fuktigt, för att uttorkning ska ske i tillräcklig grad. Därför krävs ofta uppvärmningsåtgärder under dessa perioder för att få ner RF inomhus till acceptabla uttorkningsnivåer. Då ånghalten i utomhusluften är låg vintertid krävs däremot oftast

Klimatsmart betongbyggande

inga avfuktare tillsätts. Även uppvärmning kräver energi som ger upphov till klimatpåverkan (se kap 5.6).

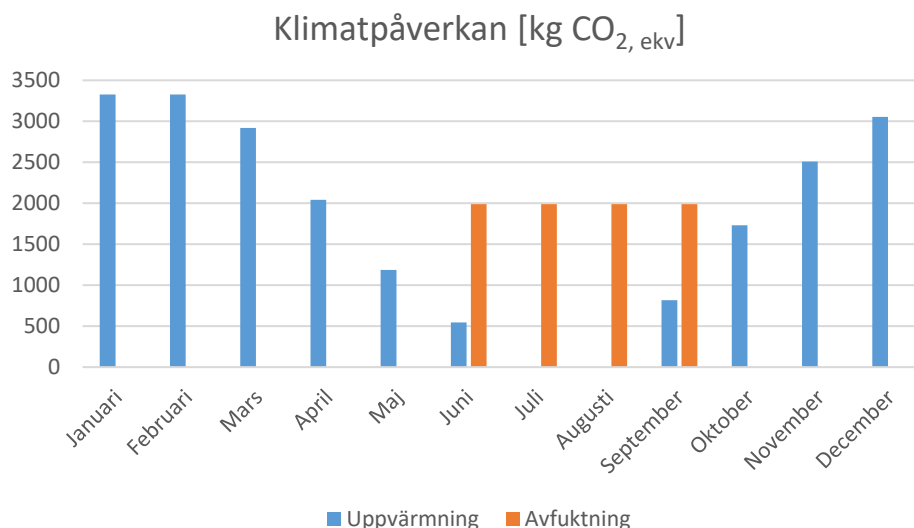
Baserat på klimatdata enligt kap 5.7.1 och beräkning enligt standarden SS-EN 13789 med otätheten (q_{50}) $20 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ och inga ventilationsförluster ges energibehov och klimatpåverkan för uppvärmning med pellets. Klimatpåverkan för pellets är $0,021 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ (Martinsson *et al.*, 2012).

Under juli och augusti är uppvärmningsbehovet för att hålla 18°C inomhus väldigt litet och antas täckas av solvärme och interna laster. Den tunga stommen kan lagra värme under dagen och avge den till inomhusluften under natten.

Avfuktning antas endast behövas då RF inomhus överstiger 60 %, dvs endast under sommarmånaderna då ingen uppvärmning krävs. Effektbehovet för avfuktningen beräknas som en avfuktare per lägenhet med en effekt på 330W. Klimatpåverkan för avfuktningens energibehov är $0,125\text{kg CO}_2/\text{kWh}$ baserat på användning av nordisk elmix (Martinsson *et al.*, 2012).

Då målning pågår ska temperaturen ligga runt $16\text{--}18^\circ\text{C}$ för att färgen ska torka som önskat. Är det kallare torkar färgen inte tillräckligt fort och är det mycket varmare riskerar färgen att spricka på grund av för snabb uttorkning. Under vinterhalvåret krävs alltså uppvärmningsåtgärder även för målningsarbeten. Då detta ofta sker i samband med golvläggning kan vanligen samma uppvärmningsmetod och effekt användas som för uttorkningen av betongen.

Beräknad månatlig klimatpåverkan för uppvärmning (pellets) och avfuktning (direktverkande el) kopplat till uttorkning är sammanställt i figur 17 nedan.



Figur 17. Beräknad månatlig klimatpåverkan för uttorkningsinsatser. Klimatpåverkan från uppvärmning är baserad på pelletseldning och avfuktningen är baserad på nordisk elmix.

5.7.5 Murning av tegelfasad

Murbruk är temperaturkänsligt precis som betong då båda materialen innehåller cement som ska härda för att uppnå funktionellt slutresultat. Så länge utomhustemperaturen är över 0°C under hela dygnet räcker det med iblandning av frost-skyddsmedel i murbruket. Då det finns risk för minusgrader krävs mycket stora uppvärmningsåtgärder för att upprätthålla tillräckligt hög temperatur i bruket under murning och härdning. Detta är något som i största möjliga mån undviks då det kostar mycket pengar och dessutom ger en hög klimatpåverkan. I Kv. Kungsörnen påbörjades murningen i september och pausades då det blev för kallt. Murningsarbetet återupptogs då det blivit varmare igen.

Om det tvunget måste muras under kallt väder bör dubbel plastinklädnad av ställning kring fasad utföras och en effekt på uppskattningsvis 280 kW tillförs för ett projekt i kv. Kungsörnens storlek. Uppvärmningen kommer i dessa fall vanligtvis från förbränning av diesel då tillräcklig kapacitet ofta saknas i den inkopplade byggströmmen (Eriksson, 2021).

Ett månatligt utsläpp från klimathållning enligt beskrivningen ovan beräknades som:

$$280kW * 31d * 24h * 0,288kg \frac{CO_2}{kWh} = 60 \text{ ton } CO_2/\text{månad}$$

Detta motsvarar ca 10 % av det totala utsläppet från all betong i projektet enligt Fall 1.

Med användning av isolerande plastskikt och förbränning av trämaterial kan utsläpp och kostnader minskas men effektbehovet och arbetsbelastningen kopplat till klimathållningen blir ändå mycket stor (Eriksson, 2021).

5.7.6 Beräknad skillnad i klimatpåverkan beroende av byggstart

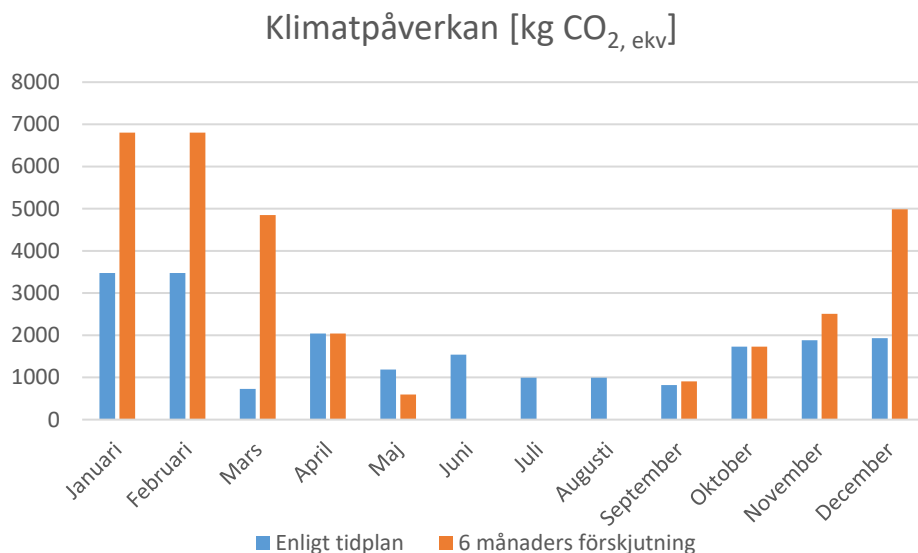
För att belysa de olika momentens klimatpåverkan beroende av tid på året för utförande beräknades klimatpåverkan för projektet enligt tidplanen (Fall 7a) samt för ett fiktivt fall då byggstart för projektet förskjutits 6 månader i tiden (Fall 7b). Murningen, som har störst påverkan under vinterarbeten, behandlas separat i kap 5.7.5.

Tabell 22. Start och sluttider för undersökta moment enligt tidplan (7a) och i fallet med 6 månaders tidsförskjutning (7b)

Arbetsmoment	Fall 7a		Fall 7b	
	Start	Slut	Start	Slut
Gjutning väggar/bjälklag	V22	V5	V48	V31
Murning	V45	V24	V19	V50
Golvläggning/Målning	V13	V47	V39	V21

Klimatsmart betongbyggande

För varje delfall (7a & 7b) beräknades klimatpåverkan för gällande månader i respektive fall. Givna värden för en månad används för alla ingående veckor i månaden, värden för de veckor som ligger i månadsskiften viktades mellan berörda månader. Då avfuktning och uppvärmning sker parallellt i juni och september beräknades effektbehovet för avfuktarna baserat på en avfuktare á 330W i hälften av alla lägenheter, dvs 33 st. I Figur 18 nedan är klimatpåverkan för de undersökta åtgärderna sammanställda och summerade.



Figur 18. Summerad klimatpåverkan från vinteråtgärder beroende av utförandeperiod. Klimatpåverkan från uppvärmning beräknad med pellets och avfuktning samt värmekablar i betongen med nordisk elmix.

5.8 Beräkning av karbonatisering

5.8.1 Beräkning enligt SS EN-16757

Metoden för beräkning av karbonatisering, SS-EN 16757, är komplex och kräver detaljerade indata gällande den använda betongen och klimatet den ska befinna sig i. Ska total mängd upptagen koldioxid beräknas för en byggnad bör varje byggdel med olika förutsättningar räknas separat för att sedan summeras.

Det första steget i metoden är att beräkna det teoretiskt maximala CO₂-upptaget per kg betong (U_{icc}). Detta görs genom att först räkna ut värdet om ett CEM I-cement med 95% klinkerhalt använts och sedan räkna ut hur stor del av detta som kan karbonatisera beroende på vilka bindemedel som använts i det verkliga fallet. Då säkra data för hur andra bindemedel än klinker binder koldioxid saknas bör enligt standarden en konservativ beräkning göras där hänsyn främst tas till klinkern. Upptaget av andra bindemedel adderas med en korrigeringsfaktor.

Hur stort det teoretiskt maximala upptaget ($U_{\text{icc},i}$) blir beräknas enligt ekvation 7 och 8 nedan och baseras på två faktorer;

- Hur stor procentandel kalciumoxid som finns i cementet (w), detta sätts normalt till 65% enligt standarden.
- Hur stor procentandel klinker som cementet innehåller ($C\%$)

$$U_{tcc (CEM I)} = w * C\% * \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (7)$$

$$U_{tcci} = U_{tcc (CEM I)} * \frac{C_i}{C_{(CEM I)}} \quad (8)$$

När det teoretiska upptaget är känt kan upptaget per kvadratmeter beräknas enligt ekvation 9 nedan.

Hänsyn måste tas till vilket klimat betongen kommer att befinna sig i under livscykeln. Temperatur, luftfuktighet och hur betongen är täckt gör stor skillnad på karboniseringshastigheten (k) och hur stor andel av det karboniserade skiktet som faktiskt reagerar (D_c). Hur detta påverkar är framtaget genom empiriska studier.

Tiden (t) under vilken karboniseringen sker under rådande förhållande spelar också roll för upptaget, här måste tiden bestämmas utefter vad som ska undersökas. Begränsar sig analysen till en konstruktions livstid så är det lämpligt att använda den som tid för karbonisering.

Cementhalten (C), dvs kg cement per kubikmeter betong, spelar också en stor roll.

$$\frac{CO_{2upptag}}{m^2} = k * K_k * \left(\frac{\sqrt{t}}{1000} \right) * U_{tcc} * C * D_c \quad (9)$$

När den upptagna mängden för en byggdel i ett visst klimat är beräknat per kvadratmeter kan värdet slutligen multipliceras med den totala arean för byggdelen för att få mängd koldioxid i kg. Görs detta för alla ingående byggdelar i en undersökt byggnad erhålls en siffra för det totala upptaget under den analyserade perioden.

5.8.2 Kv. Kungsörnen, karbonisering av betongstommen

Ytorna för de ingående byggdelarna tilldelades en grad av karbonisering samt en karboniseringshastighet enligt tabell BB.1 i SS-EN 16757, (cylinderhållfasthet 25–35 MPa), beroende på vilken miljö och exponering respektive yta utsätts för.

Samma andel portlandklinker har antagits för samtliga delar i beräkningen. Denna andel har valts för vägg & bjälklagsbetongen BIO-3 (C28/35), då detta är den största posten betong.

Bottensulor och betongpålar har inte tagits med i beräkningarna. Dessa delar utgör en liten del av den totala mängden betong i byggnaden och är i kontakt med jorden vilket resulterar i en långsam karbonatiseringsprocess.

Ovansida av varje mellanbjälklag bekläs med parkett eller laminat samt tätskikt och kakel i badrum. Ingen karbonatisering har räknats med från dessa ytor i enlighet med SS-EN 16757 (Ics, 2017). Standarden reglerar inte hur ljudisolerande skikt ska hanteras. De lägenhetsskiljande väggar som bekläs med 45 mm isolering samt 2 lager gips antas ej bidra till karbonatiseringen under byggnadens livstid.

Betongindustri har tagit fram en EPD som tar hänsyn till karbonatisering från ytor som dessa och förenklar beräkningen betydligt. EPD:en grundar sig på samma standard som är beskriven ovan. Denna EPD var ej publicerad och godkänd då detta kapitel genomfördes och hänsyn togs därför inte till denna i nedanstående beräkningar.

Den totala mängden upptagen CO_2 i betongstommen beräknas enligt nedan.

$$U_{tcc(CEM I)} = w * C_{\%,(CEM I)} * \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} = 0,65 * 0,95 * \frac{44}{56} = 0,485 \quad (7)$$

$$U_{tcc(CEM II/A-LL)} = U_{tcc(CEM I)} * \frac{C_{\%,(CEM II/A-LL)}}{C_{\%,(CEM I)}} = 0,485 * \frac{0,8}{0,95} = 0,41 \quad (8)$$

$$CO_2 = \left(\sum k_i * D_{c,i} * A_i \right) * \left(\frac{\sqrt{t}}{1000} \right) * U_{tcc_i} * C_c * K_k \quad (10)$$

Klimatsmart betongbyggande

Tabell 23. Ingående faktorer i karbonatiseringsberäkning enligt SS-EN 16757.

Faktor	Beskrivning	Värde	Enhet
k_i	Respektive areas karbonatiseringshastighet	Varierande	$\frac{mm}{\sqrt{\text{år}}}$
K_k	Korrektionsfaktor för tillsatsmaterial	1,25	
$D_{c,i}$	Respektive areas grad av karbonatisering	Varierande	%
A_i	Respektive area	Varierande	m^2
t	Dimensionerande livslängd för stommen	100	år
$C_{\%,(CEM I)}$	Andel cementklinker av bindemedel i CEM I	95	%
$C_{\%,(CEM II/A-LL)}$	Andel cementklinker av bindemedel i CEM II/A-LL	80	%
w	Andel kalciumoxid i cementklinker	65	%
$U_{tcc(CEM I)}$	Teoretisk maximala upptaget av CO ₂ i CEM I	0,485	$\frac{kg}{kg}$
$U_{tcc(CEM II/A-LL)}$	Teoretisk maximala upptaget av CO ₂ i CEM II/A-LL	0,41	$\frac{kg}{kg}$
$C_{C,(CEM II/A-LL)}$	Massa cementklinker per kubik betong	Enligt Betongindustri	$\frac{kg}{m^3}$

Med data ovan resulterar beräkningen med ekvation 10 i ett upptag på motsvarande 4,7 % av utsläppet från Kv. Kungsörnen enligt Fall 1 under 100 år.

6 Resultatsammanställning

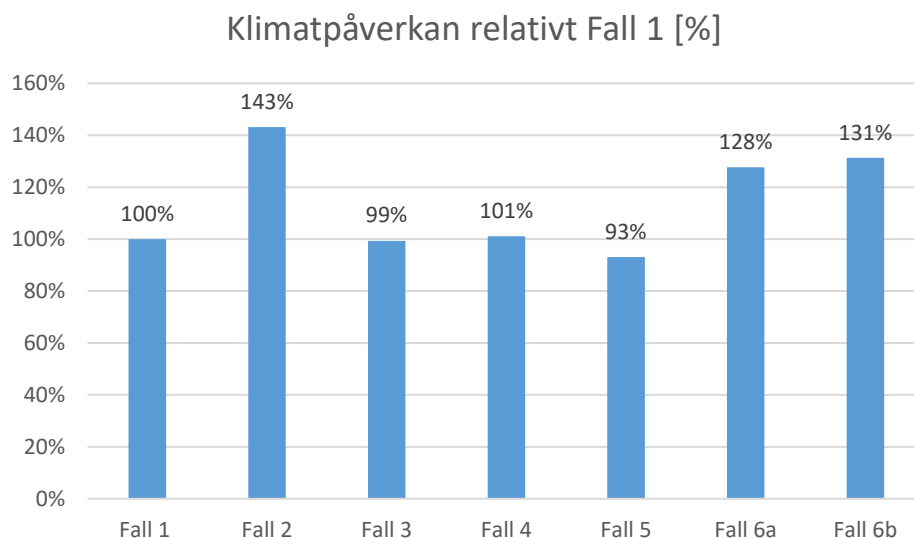
6.1 Sammanställning av resultat från Fall 1-6b samt karbonatisering

I Tabell 24 är Fall 1-6b kortsiktigt beskrivna, varje fall är ingående beskrivet under respektive kapitel.

Tabell 24. Översiktlig beskrivning av Fall 1-6b

Fall 1	Kv. Kungsörnen	Kapitel 5.1
Fall 2	Betongrecept enligt branschstandard	Kapitel 5.2
Fall 3	Dimensioner enligt branschstandard	Kapitel 5.3
Fall 4	Armering enligt branschstandard	Kapitel 5.4
Fall 5	Utformning enligt ljudklass C	Kapitel 5.5
Fall 6a	Reducerad produktionstid, vct 0.45	Kapitel 5.6
Fall 6b	Reducerad produktionstid, vct 0.37	Kapitel 5.6

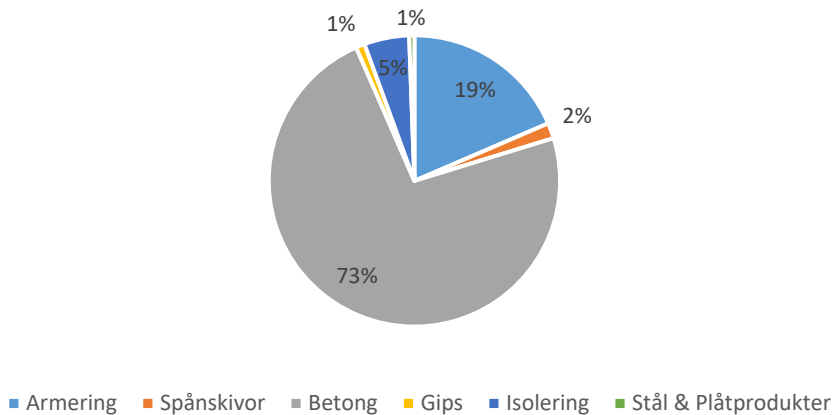
I Figur 19 nedan är resultaten gällande klimatpåverkan från byggmaterial och transporter för Fall 1-6b sammanställda. Resultaten för utsläpp kopplat till uttorkningsåtgärder för betongstommen är separat behandlat i kapitel 6.2.



Figur 19. Total beräknad klimatpåverkan från stommen i Fall 1-6b (modul A1- A5.1).

I Figur 20 nedan redovisas klimatpåverkan från undersökta byggmaterial i Fall 1 separat.

Fördelning av klimatpåverkan per undersökt byggdel



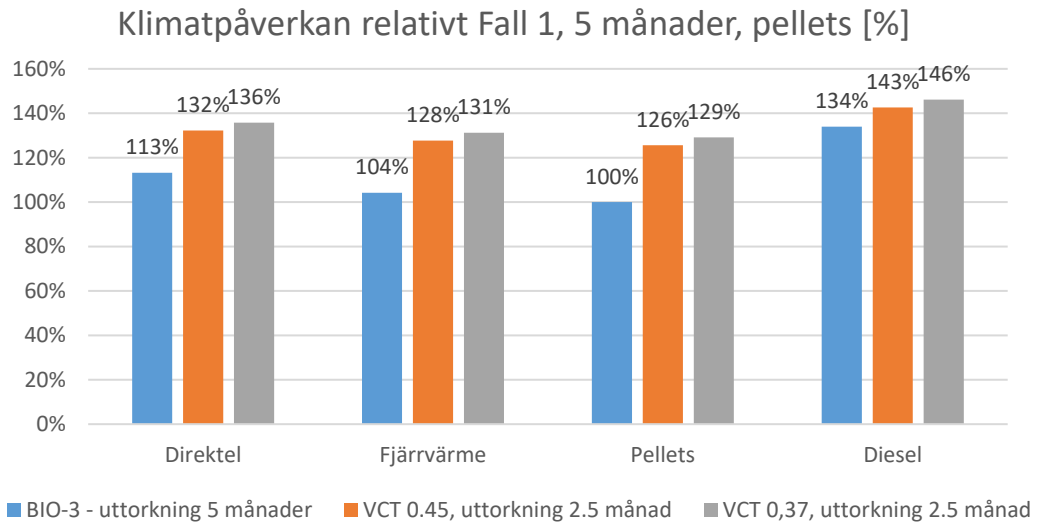
Figur 20. Klimatpåverkan från undersökta byggmaterial i Fall 1 (modul A1-A3, A4, A5.1).

Karbonatisering

Karboniseringsberäkningen för Fall 1 visar att ca 5% av klimatpåverkan från stommen (se kap 5.1) kommer att tas upp av betongen under de kommande 100 åren, under förutsättning att huset står kvar i samma skick och med samma typer av ytskikt som vid färdigställandet.

6.2 Resultat Fall 6

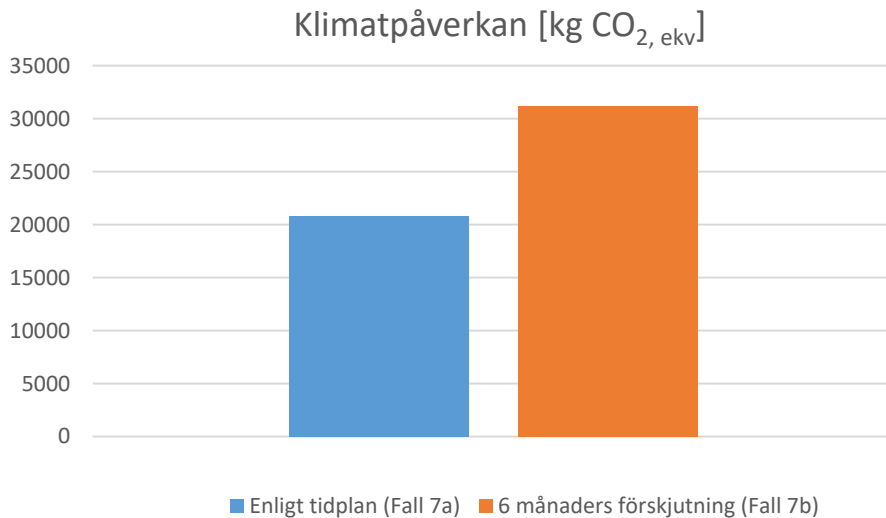
I Figur 21 nedan presenteras erhållna resultat från beräkningar beroende på använd betong i delar med uttorkningskrav samt tid för uttorkning enligt kapitel 5.6.



Figur 21. Sammanställning Fall 6 relativt Fall 1 med uppvärmning med pellets.

6.3 Resultat Fall 7

I Figur 22 nedan presenteras beräknad klimatpåverkan baserat på tidplanen (Fall 7a) och det 6 månaders förskjutna delfallet (Fall 7b).



Figur 22. Summering av beräknad klimatpåverkan från väderberoende åtgärder med produktionstidplan enligt genomförandet av Kv. Kungsörmen (Fall 7a), respektive 6 månader förskjuten produktionstidplan (Fall 7b).

En förskjutning på 6 månader (Fall 7b) beräknades leda till en ökad klimatpåverkan från vinteråtgärder på ca 50% ökat murningsarbeten. Om murningsarbeten utförs vintertid och fasaden värms upp med dieselvärmare genererar detta en klimatpåverkan per månad som är ca dubbelt så stor som resterande undersökta åtgärder tillsammans under hela byggtiden i det sämre fallet (7b).

6.4 Sammanställt referensfall

För att kunna jämföra Kv. Kungsörnsens klimatpåverkan i undersökta aspekter sammanställdes ett referensfall baserat på de vidtagna åtgärderna i ovan nämnda fall. Referensfallet baserades på följande:

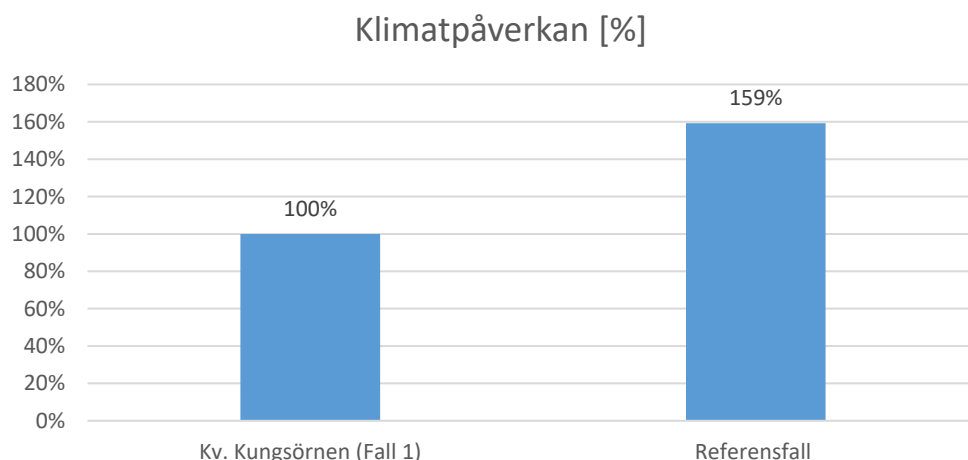
- Standardbetong enligt Fall 2 används i alla konstruktionsdelar som ej påverkas av uttorkningskrav.
- För de betongelement som påverkas av uttorkningskrav används betong enligt Fall 6b.
- Standarddimensioner på betongelementen enligt Fall 3.
- Armeringsmängderna beräknas enligt Fall 4

Till detta tillkommer klimatpåverkan från uttorkningsprocessen enligt Fall 6 (Figur 13). För Fall 1 beräknades klimatpåverkan från 5 månaders uppvärmning med Pellets och för referensfallet beräknades motsvarande klimatpåverkan baserat på 2,5 månaders uppvärmning med fjärrvärme. Beräkning av klimatpåverkan för ovan beskrivet referensfall samt Fall 1 gav resultat enligt Tabell 25 nedan:

Tabell 25. Sammanställning av klimatpåverkan för Kv. Kungsörnen (Fall 1) samt sammanställt referensfall baserat på undersökta fall.

Fall	Modul A1-A5.1 [KgCO _{2,ekv} / m ² _{Atemp}]	Uttorkning [KgCO _{2,ekv} / m ² _{Atemp}]	Summa [KgCO _{2, ekv} / m ² _{Atemp}]
Fall 1	105	3	108
Referensfall	168	4	172

En relativ jämförelse av resultaten är presenterad i Figur 23 nedan.



Figur 23. Relativ jämförelse av klimatpåverkan för Kv. Kungsörnen (Fall 1) samt sammanställt referensfall baserat på undersökta fall.

7 Diskussion

Rapporten grundar sig på en fallstudie av projekt Kv. Kungsörnen och dess aktörer. Resultaten och slutsatserna är baserade på litteraturstudier, det som gjorts och använts i projektet, generiska data från IVL:s databas samt uppskattningar och antaganden som gjorts i samråd med aktörerna i projektet och handledarna för rapporten. De undersökta åtgärdernas inverkan på projektets klimatpåverkan beror på projektets utformning och hade kunnat ge annorlunda resultat i projekt med andra förutsättningar och aktörer. Vi anser dock att resultaten speglar potentialen som finns för klimatförbättringar inom betongbyggandet och belyser storleksordningen på olika åtgärders potential. Insikterna från Kv. Kungsörnen har redan resulterat i utvecklade åtgärder i Helsingborgshems nästa projekt och vi hoppas denna rapport kan bidra till fortsatta förbättringar.

I kapitel 6.4 sammanställs den beräknade effekten av de vidtagna åtgärderna i Kv. Kungsörnen. Utan dessa åtgärder beräknas betongstommen ha genererat en klimatpåverkan om $172 \text{ kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{m}^2_{\text{Atemp}}$. Detta överensstämmer väl mot de referensvärden som finns för klimatpåverkan från flerbostadshus med betongstomme, se Kapitel 2.1. I fallstudien ”Blå jungfrun” beräknades klimatpåverkan från betong och armering (Modul A1-A5) till $169 \text{ kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{m}^2_{\text{Atemp}}$ med användning av standardbetong utan hänsyn till den kvarsittande formen av cementbundna skivor.

De vidtagna åtgärderna i Kv. Kungsörnen resulterade i en klimatreduktion på ca 40% från referensvärdet ($172 \text{ kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{m}^2_{\text{Atemp}}$). Den beräknade klimatpåverkan för Kv. Kungsörnen, modul A1-A5.1 samt energi för uttorkningsinsatser, är $108 \text{ kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{m}^2_{\text{Atemp}}$. Detta kan jämföras med det alternativ för ”Blå jungfrun” där en klimatförbättrad betong användes. Detta alternativ beräknades generera $136 \text{ kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{m}^2_{\text{Atemp}}$ (modul A1-A5).

I följande diskussionskapitel analyseras de vidtagna åtgärderna och aspekterna i projektet utifrån de resultat som tagits fram i rapporten.

7.1 Val av betong

Att alla byggdelar dimensionerades medvetet för att inte använda onödigt höga hållfasthetsklasser samt att betongleverantören kopplades in i ett tidigt skede möjliggjorde att en klimatförbättrad betong kunde användas i Kv. Kungsörnen. Från början var det föreskrivet en exponeringsklass och ett vct som inte gjorde det möjligt att använda BIO-3 betong. Detta belyser vikten av samarbete mellan olika nyckelaktörer redan i ett tidigt skede för att minska klimatpåverkan. Beräkningarna visar att om betong enligt branschstandard hade använts så hade det generat en 43% större klimatpåverkan än hur det blev i projektet (Fall 1). Detta indikerar hur stor del av stommens klimatpåverkan som kommer från betongen.

Majoriteten av betongen som användes i Kv. Kungsörnen anses vara mycket klimatoptimerad relativt rådande branschstandard. I SS-EN 137003 (Tabell 8b) redovisas vilka bindemedelssammansättningar som är accepterade i olika exponeringsklasser. Ur denna utläses att minimiandelen cementklinker av den totala

mängden bindemedel i exponeringsklass X0 och XC1 ska vara lika med eller större än 30 respektive 35 %. Betongen som har använts i Kv. Kungsörnen ligger någorlunda nära dessa värden och lämnar därför ett begränsat utrymme att klimatoptimera ytterligare med gällande standard. Hur väl en betong med endast 30 % cementklinker presterar i praktiken är inget som har analyserats i denna rapport.

Att Helsingborgshem inte föreskrev en viss utformning av stommen i anbudsförfrågan möjliggjorde att denna kunde optimeras med hänsyn till klimatpåverkan genom att välja en helt platsgjuten stomme. Vanligt förekommande alternativ så som plattbärlag, skalväggar eller HD/F lämnar i dagsläget mindre möjlighet att påverka vilken betong som används i fabrikena.

I Kv. Kungsörnen arbetades det aktivt med att minimera mängden spill. Enligt platschefen blev ca 1 % av den beställda betongen inte utnyttjad på arbetsplatsen. Detta kan jämföras med den generiska mängden spill i BM på 5 %. En åtgärd för att utnyttja spillmängderna var att gjuta stora klossar i betong som sedan såldes vidare för att användas som tung avspärrning och diverse andra användningsområden.

Utöver åtgärder enligt ovan krävs andra typer av åtgärder i tidigare skeden av betong och cementprocessen, dessa åtgärder kan byggbranschens aktörer endast påverka genom att ställa högre krav på sina leverantörer. För att klara klimatmålen anses cementindustrins utsläpp från kalcineringsprocessen behöva tas om hand genom CCS-teknologi. Denna mycket kostsamma omställning kräver stora investering från cementindustrin vilket inte anses genomförbart utan statliga stöd. Övriga utsläpp från cement och betongindustrin så som uppvärmning av klinkerugnar och transporter anses vara möjliga att reducera genom renare energikällor.

7.2 Utformning

I projektet gjordes ansträngningar för att minska dimensionerna på betongelementen. Såväl bjälklag som väggar gjordes medvetet tunnare än rådande normer. Det gällande ljudkravet på klass B gjorde dock att de slimmade betongelementen fick kompletteras med ljuddämpande skikt för att uppnå kravet. En jämförelse mellan resultaten för Fall 1 och Fall 3 visar att detta resulterar i en något högre total klimatpåverkan (0,7%) än om standarddimensioner med BIO-3 (C28/35) betong använts istället.

Även i projektet gjordes denna iakttagelse och det resulterade i att det ljuddämpande golvsiktet sedermera byttes ut mot en pågjutning av klimatförbättrat flytspackel. Detta var möjligt genom kontinuerlig och öppen kommunikation mellan entreprenör och beställare efter överenskommelse om att fokus skulle ligga på att minimera den totala klimatpåverkan oavsett vilken byggdel det rörde sig om. Detta ledde även till att stomkomplettering togs med i anbudsprövningen för beställarens nästa projekt, som även den vanns av NCC med samma organisation.

Då klimatpåverkan är en ny faktor att ta hänsyn till i förfrågningsunderlag så finns det inga tydliga direktiv för hur kraven/incitamenten för att reducera klimatpåverkan ska

utformas. Det är därför viktigt att ha en så pass transparent anbudsprocess som möjligt och försöka undvika kryphål där klimatpåverkan kan ”gömmas undan”.

Studier, framförallt inom prefabricerad betong, visar på möjligheter till betydligt större reduktionsmöjligheter kopplat till utformningen av betongelement (kap 2.2.3). Då dessa prefabricerade element inte undersökts i samband med klimatförbättrad betong har detta inte studerats närmare i rapporten. För massiva betongelement ansågs ytterligare optimeringsmöjligheter begränsade av utrymme för installationer och ljudkrav.

7.3 Armering

Armeringen utgör 19% av den beräknade klimatpåverkan i Fall 1 då mängderna är medvetet reducerade. I Fall 4 beräknades hur mycket utsläpp som sparats genom reduceringen som gjorts och trots att så mycket som ansågs rimligt gjorts för att minska mängderna så resulterade det endast i en minskning på 1,1% av stommens klimatpåverkan. Resultaten indikerar att armering har en stor klimatpåverkan men att det är svårt att reducera denna markant genom optimerad utformning. Detta antyder att det är väl så viktigt att undvika spill på arbetsplatsen som att försöka optimera mängderna i själva stommen. Den generiska siffran för armeringspill enligt BM är 10% vilket alltså är 10 gånger större än den beräknat insparade mängden i själva konstruktionen.

Parallellt med betong och cementsektorernas arbete med att minska sin klimatpåverkan pågår arbete med samma mål inom stålindustrin. Inom Sverige spås klimatpåverkan från stålindustrin kunna minskas kraftigt i framtiden Detta har inte undersökts i rapporten men utgör också en viktig del av Sveriges omställning till en hållbar framtid. Omställningen inom stålindustrin kommer att påverka betongbranschen då tillgången på masugnsslagg, som är en restprodukt från stålindustrin, kommer att minska.

7.4 Ljudkrav

Såväl litteraturstudien som själva beräkningarna i rapporten visar att valet av ljudkrav spelar en stor roll för klimatpåverkan. Både tjocka betongelement och ljuddämpande stomkompletteringar, som inte fyller andra funktioner än just ljuddämpande, genererar stora utsläpp. En jämförelse mellan Fall 1 (ljudklass B) och Fall 5 (ljudklass C) visar en minskning på 6,9% av stommens klimatpåverkan.

Att verkligen tänka igenom vilka funktionskrav som ställs i förfrågningsunderlaget kan alltså ge markant skillnad på en byggnads klimatpåverkan. Det är därför viktigt att inte ställa ljudkrav och andra funktionskrav rutinmässigt utan istället se till byggnadens och slutanvändarens specifika behov.

7.5 Produktionstid

Vid uppförande av byggnader med betongstomme utgör tiden för uttorkningen av betongen en väsentlig del av den totala produktionstiden. Hur stor del beror på vilken betong som används, vilka kritiska fuktnivåer de valda materialen som ska appliceras på betongen har och hur uttorkningen sköts.

7.5.1 Betongval baserat på produktionstid och uttorkningskrav

Huruvida den klimatförbättrade betongen som använts torkar snabbare eller långsammare än motsvarande standardbetong är i dagsläget oklart. Exakt beräkning av uttorkningsförloppen är komplicerat och beror av flera faktorer som är svåra att kvantifiera med tillräcklig noggrannhet. De faktorerna med störst påverkan är väderförhållande vid gjutning och stomdrift, uttorkningsklimat och uttorkningsegenskaper hos betongen. Framförallt för moderna betongrecept så som BIO-3 är uttorkningsegenskaperna inte tillräckligt fastställda för att kunna göra trovärdiga beräkningar. Detta beror i grunden på den stora andelen tillsatsmaterial vars påverkan på betongens uttorkningsegenskaper inte analyseras tillräckligt men även på grund av att olika aktörer i branschen har olika åsikter i frågan (Olsson, 2021).

Något det däremot råder konsensus om och som utnyttjas frekvent i byggbranschen är att betong med lägre vct torkar snabbare än betong med högre vct. Detta leder till att betong med mer cement än vad som i övrigt krävs för ändamålet används enbart för att korta byggtiden. I Fall 6a och 6b beräknas den ökade klimatpåverkan som generas om rekommenderad betong för snabb uttorkning används istället för BIO-3 (C28/35) betong i de element som omfattas av uttorkningskrav. Beräkningarna visar en ökning av klimatpåverkan på 129 respektive 145% från dessa element beroende på gällande uttorkningskrav, då detta endast berör de byggdelar belagda med uttorkningskrav blir den procentuella ökningen dock betydligt mindre utslaget på hela stommens klimatpåverkan i de undersökta fallen. Dessa siffror visar tydligt sambandet mellan tidspress i projekt och klimatpåverkan. Då tiden inte är avgörande, som i Kv. Kungsörnen, kan betong väljas med avseende på klimatpåverkan och färdiga egenskaper istället för uttorkning.

Fall 6a baseras på ett uttorkningskrav på 90% RF (vanligt för parkettgolv) medan 6b baseras på uttorkningskravet 85% RF, vilket är det som gäller för tätskikten i våtrummen i Kv. Kungsörnen. Det finns tätskikt för badrum som har uttorkningskrav 90% och genom medvetna val av tätskikt och uttorkningskrav kan alltså såväl tid som cement sparas i byggprojekt. Det kan antas att utrymme finns för att utveckla tätskikt och golvsystem som klarar än högre RF.

7.5.2 Insatser för uttorkning

För att torka ut betongen krävs att betongen försätts i ett relativt torrt och varmt klimat. Hur snabbt och med vilka metoder detta åstadkoms inverkar på produktionsskedets klimatpåverkan. Intervjuer med de inkopplade aktörerna (Kap 4), de studerade analyserna om otätheter under produktion (Kap 5.7.2) samt beräkningarna som gjorts i rapporten (Kap 5.6–5.7) visar att det är av stor vikt att ha en genomtänkt plan för uttorkningsprocessen.

Genom att täta byggnaden så mycket som möjligt innan uppvärmning påbörjas minskas värmeförlusterna drastiskt. Effektbehovet för uppvärmning uppskattas exempelvis halveras efter drevning kring öppningar i fasaderna och bli ca 8 gånger så litet efter alla öppningar fogats som i odrevat tillstånd. Att mäta och uppskatta läckage i ej färdigställda

byggnader är dock svårt då otätheterna är stora och varierande under produktionen. Mätningar som genomförts för ett projekt av liknande utformning och i ett skede som antas likna det rådande vid uppvärmningen av Kv. Kungsörnen visar på ett relativt lågt läckage som ger upphov till ett effektbehov betydligt lägre än det planerat tillförda, motsvarande ca en fjärdedel (Kap 5.7.2). Detta antyder att otäthetsmätningar inför uppvärmningsstart kan ge stora besparingar.

Förutom att undersöka byggnadens effektbehov för uppvärmning har även de vanligaste uppvärmningsmetoderna studerats. Vilket energislag som använts för uppvärmning påverkar hur mycket utsläpp som genereras, används pellets ges en klimatpåverkan som är ca hälften så stor som om lokal fjärrvärme i Helsingborg används och ca 6 gånger mindre än om direktverkande el av nordisk elmix används (Tabell 10).

Beräkningarna i kapitel 5.6 visar dock att valet av betong spelar en betydligt större roll än uppvärmningsmetoden. Klimatpåverkan beräknas bli mindre om den klimatförbättrade betongen används trots att hela byggnaden sedan torkas ut med el under dubbel så lång tid som om någon av snabbtorkande betongtyperna används och torkas ut med pellets under hälften så lång tid.

7.6 Inverkan av årstid

Skillnaden i klimatpåverkan från de åtgärder som analyserats i kapitel 5.7 är i storleksordningen 1–2 % av stommens utsläpp i Kv. Kungsörnen (Fall 1). I dessa åtgärder ingår uppvärmning av bygget för uttorkning och målning samt specifika åtgärder kopplat till vintergjutningar. Uppvärmning av fasad vid murning under vintern har ej räknats med då det anses vara vanligast att detta arbetsmoment planeras så att det går att utföra utan uppvärmningsinsatser.

Vid projekt med en produktionstid som sträcker sig över ett år eller mer anses det finnas potential att minska klimatpåverkan genom att optimera under vilka månader gjutningar, golvläggning och murning sker. Dock tenderar genomförandet av ett av dessa moment infalla under en ogynnsam tid på året om ett annat moment planeras utföras under en gynnsam tidsperiod och vice versa. Ofta finns begränsad möjlighet att planera arbetsmoment i produktion utefter gynnsam tid på året. Detta verkar i regel snarare styras av mål hos beställare, kapacitet hos entreprenör eller bestämmelser från kommuner.

Om start-och slutdatum är satt av beställaren så att murning eller putsning under vintermånaderna är oundvikligt så kan den posten utgöra en stor del av hela projektets klimatpåverkan. För att få en uppfattning om vilken storleksordning gjordes en mycket grov beräkning som uppskattade klimatpåverkan från 4 dieselvärmare á 70 kW som är igång under en månad. Dessa orsakar då ungefär 10 % av hela stommens utsläpp av koldioxidekvivalenter i Kv. Kungsörnen (Fall 1) per månad. Detta bör i allra högsta grad undvikas, om inte för klimatpåverkan så för projektets ekonomi.

7.7 Karbonatisering

Den standard som gäller idag är mest fokuserad på betong med stor andel cement och lite tillsatsmaterial. Då mycket har hänt inom betongindustrin och höga halter av tillsatsmaterial blir allt vanligare, speciellt i klimatoptimerad betong, anses denna standard behöva uppdateras med träffsäkrare faktorer.

Metoden för beräkning och redovisning av karbonatisering håller på att utvecklas och som följd av detta presenterade Betongindustri en tredjepartsgranskad EPD för betong med hänsyn tagen till karbonatisering i mars 2021. Då karbonatisering beror på miljön betongen kommer befinna sig i under driftskedet baserades EPD:erna på två standard fall med antingen en eller två exponerade ytor mot inomhusklimat. Dessa EPD:er gör det enklare att på ett trovärdigt vis hantera karbonatisering i klimatdeklarationer och sorteras under modul B1 (driftskede) enligt SS-EN 15978. Vid beräkningar av karbonatisering för hela byggnader bör hänsyn tas till alla elements placering och exponering mot omgivande klimat, endast de framtagna standardfallen anses därför inte tillräckliga för att göra en fullständig karboniseringsberäkning.

8 Slutsatser

Från resultaten framgår det att de vidtagna åtgärderna har gett stor effekt. Resultaten från beräkningarna visar att klimatpåverkan från betongstommen i Kv. Kungsörnen hade ökat med ca 60 % om projektet byggts enligt det sammanställda referensfallet (kap 6.4) jämfört med hur det faktiskt utfördes (Fall 1). Resultaten visar tydligt att valet av betong står för den största klimatpåverkan kopplat till betongstommen. Övriga åtgärder ger mindre påverkan då omfattningen av dessa begränsas av bärighetskrav, ljudkrav samt utrymme för installationer.

Fallstudien och främst intervjuerna med de inblandade aktörerna, visar entydigt på vikten av samarbete redan i tidigt projekteringsskede då ramarna för ett projekt sätts. Sätts dessa ramar, framförallt gällande föreskrivna betongtyper, dimensioner och funktionskrav, utan hänsyn till klimatpåverkan så blir möjligheterna för klimatförbättringar ytterst begränsade.

Beställare i byggbranschen har stora möjligheter att reducera klimatpåverkan från sina projekt genom att införa incitament för entreprenören. Det är de ansvariga projektörerna som måste förvalta dessa möjligheter så gott som möjligt med genomtänkta lösningar. Slutligen är det entreprenören som ansvarar för att genomföra projektet i enlighet med de tänkta klimatbesparande åtgärderna samt i största möjliga mån undvika spill på arbetsplatsen. Denna rapport visar att det finns stora fördelar med att engagera de produktionsansvariga tidigt i processen för att optimera utförandet och säkerställa dess genomförbarhet i praktiken. Projekt Kv. Kungsörnen visar att det är fullt möjligt att bygga relativt billiga byggnader i betong med betydligt lägre klimatpåverkan än branschstandard utan att kompromissa på kvalitén i resultatet.

Nedan har rekommenderade åtgärder för de undersökta aktörerna sammanställts i en lathund uppdelat på en totalentreprenads olika skeden. Dessa rekommendationer är baserade på lärdomarna från denna rapport.

Klimatsmart betongbyggande

LATHUND FÖR KLIMATSMART BETONGBYGGANDE VID TOALENTREPRENAD					
	Beställare	Entreprenör			Betongleverantör
		Klimatspecialist	Projektörer	Produktionsansvarig	
Framtagande av förfrågningsunderlag	<p>Analysera funktionskrav grundligt, t.ex vilket ljudkrav är nödvändigt.</p> <p>Lämna utrymme för entreprenör att utforma lösningar, undvik detaljstyrning.</p> <p>Undvik krav på korta produktionstider.</p> <p>Ta hänsyn till klimatpåverkan i anbudsprövning</p> <p>Utred eventuellt vite/bonus för klimatpåverkan överstigande/understigande den avtalade.</p> <p>Skapa tydliga regler för vad som skall ingå/inte ingå i klimatberäkningen.</p>				
Anbudsskede	<p>Håll öppen och transparent dialog med anbudsgivarna för att undvika otydligheter.</p> <p>Var öppen för att revidera underlag om luckor i kravställningen uppdragas.</p>	<p>Gör grova klimatberäkningar på olika alternativ. Det är inte alltid självklart vilken lösning som har lägst klimatpåverkan.</p> <p>Var uppmärksam på alla materials klimatpåverkan.</p> <p>Begär in EPD:er för tänkta material.</p> <p>Undvik generisk data.</p> <p>Samarbeta med projektörer.</p>	<p>Var öppna för olika alternativa lösningar.</p> <p>Samarbeta med klimatspecialist.</p> <p>Engagera tillänkta leverantörer tidigt och rådfråga om lämpliga lösningar.</p>	<p>Delta aktivt i utformningen av anbudet.</p> <p>Tänk igenom utförandeflöppet och produktionstider.</p> <p>Uppmärksamma begränsningar beroende av genomförbarhet.</p>	<p>Var tydlig med vilka begränsningar som exponeringsklass, hållfasthetsklass och vct innebär för valet av betong.</p> <p>Uppmärksamma entreprenör om betongvalets inverkan på uttorkningstider och hållfasthetstillväxt.</p>
Projekteringskede	<p>Bibehåll öppen och transparent dialog med projektörer.</p> <p>Var öppen för förändringar som minskar klimatpåverkan som identifieras under projekteringskedet.</p> <p>Följ upp klimatpåverkan baserat på framtagna handlingar relativt anbud</p>	<p>Granska handlingar kritiskt och väga ifrågasätta lösningar, dimensioner och mängder med hänsyn till klimatpåverkan.</p> <p>Beräkna klimatpåverkan baserat på framtagna handlingar relativt anbud.</p>	<p>Optimera utformning av ingående byggdelar, undvik användandet av standarddimensioner mm.</p> <p>Välj ytskikt som klarar hög relativ fuktighet vid applicering (≥ 90 RF).</p> <p>Ta hjälp av klimatspecialist, produktionsansvarig och leverantörer.</p> <p>Utforma en genomtänkt huvudtidplan och uttorkningsstrategi. Ta hänsyn till tidpunkt på året för gjutning, uttorkning och ev. murning samt val av energislag.</p>	<p>Delta aktivt i projektering.</p> <p>Granska handlingar kritiskt och ifrågasätt lösningar, dimensioner, mängder och genomförbarhet.</p>	<p>Var behjälplig vid frågor gällande utformning och användning av betongen.</p> <p>Bistå eventuellt med uttorkningsberäkningar.</p>
Byggskede	<p>Håll regelbunden kontakt med entreprenör.</p> <p>Var öppen för förändringar som minskar klimatpåverkan identifierade under byggskedet.</p> <p>Följ upp klimatpåverkan baserat på inköpta mängder i förhållande till angivelser i kontraktet.</p>	<p>Håll regelbunden kontakt och stötta produktionen i frågor rörande klimatpåverkan så som uttorkningsinsatser med mera.</p> <p>Beräkna klimatpåverkan baserat på inköpta mängder och utförda moment.</p>	<p>Håll regelbunden kontakt och stötta produktionen.</p>	<p>Minimera mängd spillmaterial.</p> <p>Dra nytta av erfarenhet från såväl tjänstemän som yrkesarbetare.</p> <p>Optimera uttorkningsinsatser genom tätning av klimatskal.</p>	<p>Fastställ vem som får ändra betongrecept i produktionen och stötta vid frågor.</p> <p>Kontrollera att betongrecept följs noggrant.</p> <p>Förse klimatspecialist med levererade mängder och tillhörande EPD:er.</p>

Figur 24. Lathund för klimatsmart betongbyggande vid totalentreprenad.

9 Framtida studier

Följande områden har berörts i rapporten men inte utträtts eller analyserats utförligt. Dessa frågor anser vi vara viktiga att lyfta i framtida studier för att möjliggöra bättre och trovärdigare klimatberäkningar.

- Uttorkningsegenskaper för betong med hög andel tillsatsmaterial

Att beräkna uttorkningstider är generellt komplicerat och beror på många faktorer men är möjligt att genomföra med goda kunskaper om det använda betongens uttorkningsegenskaper. Dessa egenskaper har idag inte analyserats tillräckligt för att anses kunna medge trovärdiga beräkningar för användning i produktionsplanering.

- Undersöka möjlighet att använda ytterligare klimatförbättrad betong

Att utreda hur långt klimatförbättringen av betong kan fortsätta utan att kompromissa med dess önskade egenskaper.

- Ekonomiskt perspektiv på klimatsmart byggande

Analysera kostnader för att använda material med lägre klimatpåverkan, projekt med längre genomförandetid, minskade dimensioner i relation till eventuellt ökat antal arbetstimmar och riskpåslag från entreprenörer. Detta är exempel på klimatbesparande åtgärder vars kostnader i relation till branschstandard inte har analyserats i denna rapport.

- Otätheter under byggproduktion

De referensvärden på luftläckage som användes i rapporten var baserade antingen på uppskattade värden eller mätningar från en skola. Att göra mätningar eller samla in data från flera olika projekt och koppla detta till vilket stadie produktionen befinner sig i hade kunnat minska osäkerheterna vid beräkning av uppvärmningsenergi under byggproduktionen.

- Karbonatisering av klimatoptimerad betong
- Undersöka förbättringsmöjligheter för vintergjutningar och murningsarbeten vintertid.

Referenser

- Bengtsson, C. (2021) ‘Memo Lufttäthetsmätning 2 Gullåkraskolan 210317’.
- Block, P. et al. (2016) *Rib-stiffened funicular floor system*. Available at: <https://block.arch.ethz.ch/brg/research/rib-stiffened-funicular-floor-system>.
- Boverket (2018) *Klimatdeklaration av byggnader*.
- Burke, S. (2021) ‘Tekn. Dr. Byggnadsfysik, Dipl. Fuksakkunnig, Ledande Teknisk Specialist,Handledning våren 2021’.
- Carlswärd, J. (2021) ‘Jonas Carlswärd, Chef Teknik & Provning Betongindustri, Intervju via Teams den 25 februari 2021’.
- Cembureau (2013) ‘2050 Roadmap Low Carbon Economy’.
- Cementa (2018) ‘Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggande’, pp. 1–20. Available at: <http://fossilfritt-sverige.se/verksamhet/fardplaner-for-fossilfri-konkurrenskraft/>.
- Dahlgvist, L. (2021) ‘Ludvig Dahlgvist, kvalificerad specialist NCC, handledning våren 2021’.
- Dahlgvist, L. (2020) ‘Energiberäkningsrapport’.
- Departemen of Economic and Social Affairs United Nation (2018) *World Urbanization Prospects 2018, Webpage*. Available at: <https://population.un.org/wup/>.
- Devi, K. S., Lakshmi, V. V. and Alakanandana, A. (2018) ‘Impacts of Cement Industry on Environment - An Overview’, *Asia Pacific Journal of Research*, I(November 2017), pp. 156–161.
- ECRA (2017) ‘Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead, Revision 2017’, *European Cement Research Academy*, (March).
- Energihandbok (2021) *Emmisionsfaktorer för bränslen och energislag*. Available at: <https://www.energihandbok.se/emissionsfaktorer-for-branslen-och-energislag>.
- Eriksson, J. (2021) ‘Johan Eriksson, Platschef NCC, Intervju platskontor Kv. Kungsörnen den 11 februari 2021’.
- Eriksson, T. (2020) ‘Kv. Kungsörnen A-ritningar daterade 2020-02-28’.
- Erlandsson, M. et al. (2018) ‘Minskad klimatpåverkan från nybyggda flerbostadshus - Underlagsrapport’, p. 57.

FAVIER, A. *et al.* (no date) 'A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE EUROPEAN CEMENT AND Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050 The authors'.

Favier, A., Scrivener, K. and Habert, G. (2019) 'Decarbonizing the cement and concrete sector: Integration of the full value chain to reach net zero emissions in Europe', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225(1). doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012009.

FEBY (2018) 'Kravspecifikation för energieffektiva byggnader Bostäder och lokaler', pp. 1–19.

Flodberg Munck, K. and Maljanovski, C. (2020) 'Sluta elda för kråkorna_201014_med anteckningar'.

Habert, G. *et al.* (2020) 'Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries', *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), pp. 559–573. doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.

Häfliger, I. F. *et al.* (2017) 'Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials', *Journal of Cleaner Production*, 156, pp. 805–816. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.052.

Hammadi, G. (2020) 'Kv. Kungsörnen K-ritningar daterade den 2020-03-31'.

Harderup, L.-E., Arfvidsson, J. and Samuelsson, I. (2017) *Fukthandboken*. Edited by Svensk Byggtjänst AB.

Heidelbergcement (2020) *HeidelbergCement to install the world's first full-scale CCS facility in a cement plant*. Available at: <https://www.heidelbergcement.com/en/pr-15-12-2020>.

Helsingborgshem (2019a) 'Administrativa föreskrifter', 1(50), pp. 1–50.

Helsingborgshem (2019b) 'ANBUDS PM 1', 1(4), pp. 1–4.

Helsingborgshem (2021) *Högasten*. Available at: <https://www.helsingborgshem.se/byggprojekt/hogasten>.

Hoxha, E. *et al.* (2017) 'Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability', *Journal of Cleaner Production*, 144, pp. 33–47. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.

Ics (2008) 'SS-EN ISO 13789:2007'.

Ics (2011) 'Svensk standard ss-en 197-1:2011'.

Ics (2019) 'Svensk standard ss-en 15804:2012+a2:2019'.

Ics, E. (2012) 'Svensk Standard - 21608', 08(121687). Available at: www.sis.se.

Ics, E. (2014) 'Svensk standard ss-en 10088-2:2014'.

Ics, E. (2017) 'Svensk standard ss-en 16757:2017'.

IEA (2018) 'Technology Roadmap for Cement', *International Energy Agency*, p. 66.

IPCC (2018) 'Proposed outline of the special report in 2018 on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change', *Ipcc - Sr15*, 2(October), pp. 17–20. Available at: www.environmentalgraphiti.org.

Karlsson, N. *et al.* (2019) 'Energianvändning vid klimathållning och avfuktning under byggproduktion - Förstudie'.

Kurkinen, E. *et al.* (2017) 'Energi och klimateffektiva byggsystem: Miljövärdering av olika stomalternativ', p. 46.

Landgren, J. (2020) 'Produktionstidplan Kungsörnen och Knoppen'.

Liljenström, C. *et al.* (2015) 'Byggandets klimatpåverkan. Livscykelberäkning av klimatpåverkan och energianvändning för ett nyproducerat energieffektivt flerbostadshus i betong (Rapportnummer B 2217)', *Nr B 2217*, p. 68. Available at: https://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b76c4/1445517730807/B2217_ME.pdf.

Martinsson, F. *et al.* (2012) 'Emissionsfaktor för nordisk elproduktionsmix', p. 39.

Naturvårdsverket (2019) 'Territoriella utsläpp och upptag av växthusgaser - nedladdad statistik', pp. 1–7.

NCC (2021) *Klimatsmarta hyresrätter Helsingborg*. Available at: <https://www.ncc.se/vara-projekt/klimatsmarta-hyresratter-helsingborg/>.

Olsson, N. (2021) 'Nilla Olsson, Ledande specialist NCC, handledning våren 2021'.

Passer, A., Deutsch, R. and Scherz, M. (2018) 'Beton-LCA – Wie grün ist grau?', *Bautechnik*, 95(3), pp. 250–262. doi: 10.1002/bate.201870308.

Ravemark, B. (2021) 'Björn Ravemark, projektchef Helsingborgshem, intervju via Teams den 4 Mars 2021'.

Klimatsmart betongbyggande

Regeringen (2021) *No Title.* Available at: <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2019/09/klimatdeklaration-vid-uppforande-av-byggnader/>.

SMHI (2021) *Dataserier med normalvärden för perioden 1991-2020.* Available at: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/dataserier-med-normalvar-den-for-perioden-1991-2020-1.167775>.

Stigenäs, O. (2021) ‘Olle Stigenäs, projekteringsledare NCC, Intervju via Teams den 17 februari 2021’.

Svensk Betong (2018) ‘Lathund akustik bostäder i betong’, (4), pp. 9–10.

Svensk Betong (2021) ‘Klimatförbättrad betong’.

Wadsö, L. (2017) *Construction Materials Science.* Lund.

Wern, L. (2013) ‘Luftfuktighet Variationer i Sverige’, *Meteorologi*, 154(154). Available at: internal-pdf://78.141.39.112/Luftfuktighet_-_variationer_i_Sverige-2013-12-.pdf.

Öresundskraft (2021) *Fjärrvärme Helsingborg.* Available at: <https://www.oresundskraft.se/foretag/fjarrvarme/miljovarden/>.

Örwall Lovén, E. (2021) ‘Ebba Örwall Lovén, Kvalitets- och miljöchef Betongindustri, Intervju via Teams den 25 februari 2021’.

Bilaga 1-Intervjufrågor

NCC Teknik & hållbarhet, Ludvig Dahlqvist (21-02-09)

- Hur har arbetet med klimatberäkningarna i projektet utformats?

NCC Projekteringsledning, Olle Stigenäs (21-02-17)

- När blev du inkopplad i projektet?
- Vilka åtgärder togs i projektet för att minska klimatpåverkan från betongstommen?
- Varför är det angivet 50 års livslängd på alla betongkonstruktioner utom grund?
- Hade betongmängderna kunnat minimeras med sänkt ljudkrav, eller är de redan så gott som optimerade?
- Hur har åtgärderna påverkat projektet, för/nackdelar mot ”standard” byggprocess?
- Hur påverkades samarbetet med andra projektörer?
- Hur utformades kravställningarna på betongen?
- Hur har ni tagit hänsyn till uttorkning av betongen?
- Hur stor påverkan på projekteringen har årstid för gjutning, åtgärder?
- Är ventilerade övergolv för att minska uttorkningstider en bra idé?

NCC Platschef, Johan Eriksson (21-02-11)

- När blev du inkopplad i projektet?
- Vilka krav hade ni på er från beställaren?
- Hade ni interna krav gällande arbetet med minskad klimatpåverkan?
- Vilka åtgärder togs i projektet för att minska klimatpåverkan från betongstommen?
- Förslag på ytterligare åtgärder som kunnat göras i anbudsskedet för att minska klimatpåverkan ännu mer, med eller utan att påverka anbudssumman?
- Hur har åtgärderna påverkat projektet, för/nackdelar mot ”standard” byggprocess?
- Är det möjligt att få en fingervisning på hur t. ex tjocklek på väggar/bjälklag skiljer sig från ett vanligt projekt?
- Finns det möjlighet att få tillgång till upparbetade mängder betong och armering?

Betongindustri, teknik- och provningschef Jonas Carlswärd & miljöchef Ebba Örwall Lovén (21-02-24)

- I vilket skede kopplades ni in i projektet?
- Hur såg era möjligheter ut att påverka kravställningen på betong (K0:an mm)?
- Hur har betongstandarden påverkat betongrecepten?
- Vad hade mer kunnat göras med recepten? Vad satte begränsningarna i och med att det i betongstandarden till exempel finns utrymme att använda 65% slagg för en XC1?
- Hur testar ni egenskaperna för nya recept? Uttorkning (lika bra eller bättre för bio-betongen enligt EPD)
- Tillsatsmaterial, begränsad tillgång mm?
- Vad tror ni om klimatneutral betong år 2045?
- Hur mycket påverkas betongreceptet av årstider, tillsatsmedel/varmvatten mm?
- Påverkas tillverkning och hanteringsprocessen vid tillverkning av klimatförbättrad betong?
- Hur har ni arbetat med transporter/bränsle?
- Hur påverkas priset för tillverkning av klimatförbättrad betong?
- Livslängden i projektet för all betong ovan grund är 50 år, vad innebär det i praktiken?

Helsingborgshem, projektledare Björn Ravemark (21-03-04)

- Har ni tidigare tagit med klimatpåverkan i FFU?
- Har ert FFU gett de resultat som ni tänkt er?
- Hur påverkar det er att inte ha ett bestämt datum för färdigställande?
- Vad gjorde att ni reviderade underlaget under anbudsprocessen?
- Ni har gjort vidare ändringar i FFU för pålsjö äng, varför gjorde ni detta?
- Varför är det angivet 50 års livslängd på alla betongkonstruktioner utom grund?