

Karoline Knoph Aamodt
Peder Kristoffer Alvenes

Klimagassoptimalisering av prefabrikkerte betongelementer i prosjekteringsfasen

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Terje Kanstad

Juni 2020

Karoline Knoph Aamodt
Peder Kristoffer Alvenes

Klimagassoptimalisering av prefabrikkerte betongelementer i prosjekteringsfasen

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Terje Kanstad
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2020

FAGOMRÅDE: Betongkonstruksjoner	DATO: 10.06.20	ANTALL SIDER: 118 + 6 sider vedlegg
------------------------------------	-------------------	--

TITTEL:

Klimagassoptimalisering av prefabrickerte betongelementer i prosjekteringsfasen

Greenhouse gas optimization of prefabricated concrete elements during the design phase

UTFØRT AV:

Karoline Knoph Aamodt

Peder Kristoffer Alvenes



SAMMENDRAG:

Betong er verdens mest brukte byggemateriale. I dagens samfunn hvor klima- og miljøproblematikken står i fokus, er mengden av klimagassen CO₂ som slippes ut i atmosfæren en mye brukt målestokk på dette. I den sammenheng nevnes ofte byggebransjen, og da spesielt betong, som blant de verste. Utviklingen av en mer miljøvennlig betong har pågått lenge, og blir stadig forbedret. Som et motsvar til betongbruken nevnes ofte massivtre som et mer miljøvennlig alternativ. Det finnes utallige rapporter som sammenligner betong og massivtre, og løsningene er langt fra entydige, da de er svært situasjonsbaserte.

Rønning(2019) forsøker å fremstille problemstillingen rundt betong og massivtre objektivt og ikke situasjonsbasert. Rønning(2019) konkluderer med at betong er det mest miljøvennlige alternativet i de høyeste byggene. I denne masteroppgaven er det undersøkt om løsningene for betong kan optimaliseres ytterligere ved å bruke mer tid i prosjekteringsfasen. Formålet var å vise potensialet som ligger i betong, og gi et nyansert bilde av dagens muligheter innen benyttelse av betongelementer.

For å beregne utslippene fra bjelke- og hulldekkeelementene ble det utarbeidet en klimagasskalkulator. Kapasitet- og deformasjonskrav ble opprettholdt. Forskjellige typer lavkarbonbetong ble benyttet til å beregne det potensielle, totale klimagassutslippet, og sammenlignet med verdiene funnet i rapporten nevnt ovenfor.

Hovedsakelig ble det gjort observasjoner på 3 områder; bruken av strenge karbonklasser, optimalisering av nødvendig armering og endring av trykksonehøydefaktoren, α . Disse virket positivt inn på totalt klimagassutslipp, og den største reduksjonen ble funnet til å være på 54,4% sammenlignet med referansebygget.

Undersøkelsene viste at en optimalisering av hulldekkene hadde størst innvirkning på totalutslippet. Hulldekkene utgjør 67% av total betongmengde. I en optimaliseringssammenheng kan bjelkene og de mindre konstruksjonsdelene ofte bli tilsidesatt. Ved å bruke mer tid på disse i prosjekteringen, kan det oppnås en betydelig utslippsreduksjon.

Potensialet er enormt, og bransjen bør tilpasse seg ved å se på løsninger som implementerer strenge karbonklasser på en praktisk måte. Økonomi er naturligvis den største hindringen her, og det er ikke spesielt hensyntatt i denne masteroppgaven, da hovedmålet var å vise mulige løsninger. I et miljøperspektiv bør det generelt brukes mer spennarmering enn det som er vanlig i dag, samt mer armering til å øke trykkapasiteten til betong. Dagens praksis med normalarmering etter $\alpha=0,412$ er vurdert til å være for konservativt i et bærekraftperspektiv. Velges en høyere α -verdi, og den effektive tverrsnittshøyden lik den nødvendige, resulterer det i mindre betong og mer armering og klimagassutslippene reduseres.

FAGLÆRER: Terje Kanstad

VEILEDER(E): Terje Kanstad og Sverre Smeplass

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved fakultetet for ingeniørvitenskap på Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgavens omfang er 30 studiepoeng tilsvarende hele vårsemesteret 2020.

Grunnlaget for oppgaven kom fra Betongelementforeningen formidlet gjennom vår hovedveileder Terje Kanstad. Dette besto av en rapport skrevet av Østfoldforskning og omhandler sammenligning av prefabrikkerte betongelementer og massivtreelementer i et klimagassperspektiv. Med lite kjennskap innen optimalisering av betongkonstruksjoner etter klimagassutslipp startet arbeidet med en øvelse innenfor temaet. Dette utviklet seg senere til en klimagasskalkulator som optimaliserer betongelementkonstruksjoner, og ble en stor del av masteroppgaven.

En stor takk går til vår engasjerte hovedveileder Terje Kanstad som har bidratt med solid kunnskap innenfor betongdimensjonering. Gode innspill og tilgang på høyt kvalifiserte bidrag har gjort arbeidet med oppgaven svært givende. Vi har satt stor pris på at han ønsket å føre en oppgave med høyt fokus på klimagassutslipp, vi håper at oppgaven har bidratt til et enda større fokus på klima og miljø ved instituttet.

Vi vil takke medveileder Sverre Smedplass for å ha peilet oss inn på hvilke utfordringer betong gir i et klimaperspektiv. Hvordan livsløpsanalyse (LCA) brukes som verktøy og hvordan optimaliseringen kan gjøres. I tillegg har han bidratt med sitt store bransjennettverk som har gitt oss god tilgang på erfarne fagfolk på området. Hans konstruktive tilbakemelding og engasjement kunne vi ikke vært foruten.

I tillegg vil vi takke Betongelementforeningen for at vi fikk delta på Betongindustri-dagene 2020. Det ga oss god innsikt i bransjen og tips til hvordan vi skulle utforme oppgaven. Til slutt rettes en stor takk til venner og familie for støtte og oppmuntring gjennom arbeidet med denne masteroppgaven og hele studietiden i Trondheim.

Trondheim 10. juni 2020

Karoline Knoph Aamodt

Karoline Knoph Aamodt

Peder Kristoffer Alvenes

Peder Kristoffer Alvenes

Sammendrag

Betong er verdens mest brukte byggemateriale. I dagens samfunn hvor klima- og miljøproblematikken står i fokus, er mengden av klimagassen CO_2 som slippes ut i atmosfæren en mye brukt målestokk på dette. I den sammenheng nevnes ofte byggebransjen, og da spesielt betong, som blant de verste. Produksjon av sement skaper enorme utslipp på verdensbasis. Utviklingen av en mer miljøvennlig betong har pågått lenge, og blir stadig forbedret. Som et motsvar til betongbruken nevnes ofte massivtre som et mer miljøvennlig alternativ. Det finnes utallige rapporter som sammenligner betong og massivtre, og løsningene er langt fra entydige, da de er svært situasjonsbaserte.

Rapporten "Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner; Kontorbygning - 4, 8 og 16 etasjer" av Østfoldforskning (Rønning et al., 2019) forsøker å fremstille problemstillingen rundt betong og massivtre objektivt og ikke situasjonsbasert. Rønning et al. (2019) konkluderer med at betong er det mest miljøvennlige alternativet i de høyeste byggene. I denne masteroppgaven ble det undersøkt om løsningene for betong kan optimaliseres ytterligere ved å bruke mer tid i prosjekteringsfasen. Formålet var å vise potensialet som ligger i betong, og gi et nyansert bilde av dagens muligheter innen benyttelse av betongelementer.

For å beregne utslippene fra bjelke- og hulldekkeelementene ble det utarbeidet en klimagasskalkulator der kapasitet- og deformasjonskrav ble opprettholdt. Klimagasskalkulatoren ble brukt til å optimalisere bygget på 4 etasjer i Rønning et al. (2019) etter totalt klimagassutslipp. Forskjellige typer lavkarbonbetong ble benyttet til å beregne det potensielle, totale klimagassutslippet. Dette ble videre sammenlignet med verdiene fra rapporten nevnt ovenfor.

Hovedsakelig ble det gjort observasjoner på 3 områder; bruken av strenge karbonklasser, optimalisering av nødvendig armering og endring av trykksonehøydefaktoren, α . Disse virket positivt inn på totalt klimagassutslipp, og den største reduksjonen ble funnet til å være på 54,4% sammenlignet med referansebygget.

Undersøkelsene viste at en optimalisering av hulldekkene hadde størst innvirkning på totalutslippet. Hulldekkene utgjør 67% av total betongmengde. I en optimaliseringssammenheng kan bjelkene og de mindre konstruksjonsdelene ofte bli tilsidesatt. Ved å bruke mer tid på disse i prosjekteringen, kan det oppnås en betydelig utslippsreduksjon.

Generelt benyttes ikke de strengeste karbonklassene i dagens betongelementproduksjon. Potensialet er enormt, og bransjen bør tilpasse seg ved å se på løsninger som implementerer strengere karbonklasser på en praktisk måte. Økonomi er naturligvis den største hindringen her, og det er ikke spesielt hensyntatt i denne masteroppgaven, da hovedmålet var å vise mulige løsninger. I et miljøperspektiv bør det generelt brukes mer spennarmring enn det som er vanlig i dag, samt mer armering, og tilsvarende mindre betong, for å øke trykkapasiteten. Dagens praksis med normalarmering etter $\alpha = 0,412$ er vurdert til å være for konservativt i et bærekraftperspektiv. Velges en høyere α -verdi, og den effektive tverrsnittshøyden lik den nødvendige, resulterer det i mindre betong og mer armering, og klimagassutslippene reduseres.

Abstract

Concrete is the worlds most used construction material. In today's society, with an increased focus on climate- and environmental changes, a common parameter used is the emission of the greenhouse gas CO_2 . In this context, the construction industry is often mentioned as one of the worst contributors. The production of cement creates enormous emissions worldwide. The development of a more environmentally friendly concrete has been under research for a long time and is steadily improving. As a counterpart to the use of concrete, cross laminated timber, CLT, is often mentioned as an environmentally friendly alternative. There exist countless reports comparing these two materials, and the conclusions are far from unambiguous, given that they are highly situation-based.

One of these reports aims to portray this issue objectively, and this Norwegian report is called "Greenhouse gas calculation of timber- and concrete constructions; Office building- 4, 8 and 16 floors" by Østfoldforskning (Rønning et al., 2019). This report concludes that concrete is the most environmentally friendly alternative for the higher buildings. This thesis explores whether the solution used for concrete may be optimized further, with regards to emissions, by using additional time in the design phase. The aim is to show the potential in using concrete, and to give a nuanced image of the opportunities in the use of concrete elements.

This was done by creating a greenhouse gas calculator for beam- and hollow core elements. Demands for capacity and deflections were maintained, so that the elements for the 4-storey building were optimized after total emission. Different values for low-carbon concrete were used to calculate the potential reduction of total emission for the entire building, and compared to the report mentioned above.

Several discoveries were made in this comparison. These were made, mainly, in 3 different areas; the usage of strict carbon classes, the optimization of the necessary reinforcement, and the change in the compression zone factor, α . These contributed positively to the total emission, and the largest reduction was found to be 54,4% compared to the reference building in the report.

The optimization process highlighted the importance of the hollow core elements. These make up 67% of the total concrete mass, and any improvement of these have a big impact. Due to this, beams and other smaller structural parts, can often be given less focus. By spending more time in the design phase, the optimization of these elements may be done more thoroughly and provide a reduction in emission.

In today's concrete element production, the carbon classes are generally not strict enough. The potential here is huge, and the industry should find solutions to adapt to a higher use of environmentally friendly concrete. Economy is usually the biggest hindrance. However, this is not considered in this thesis, given that the focus was mainly on the potential savings of emission. When it comes to reinforcement, a discovery was made that there should be used more prestressed reinforcement than what is normal today, and generally increase the compression capacity of the concrete by the use of reinforcement. This will pay off, environmentally. Today's practice of using normal reinforcement in the design phase, with an $\alpha = 0,412$, is considered to be too conservative in a sustainability perspective. A higher value of α will give less concrete, and more reinforcement, resulting in lower emission. Another suggestion would be to not choose the effective height in the concrete cross section to be higher than necessary.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Tabeller	xi
Figurer	xiii
Nomenklatur	xvii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Rapport fra Østfoldforskning	1
1.3 Formål med masteroppgaven	3
1.4 Oppbygging av rapporten	3
1.5 Aktører, programvare og regelverk	4
2 Beregningsgrunnlag	7
2.1 Begrensinger	8
2.1.1 Livsløpsanalyse	8
2.1.2 Elementtyper	8
2.1.3 Arkitektur	9
2.1.4 Tidligfasthet og liggetid	9
2.1.5 Økonomi	9
2.1.6 Laster	9
2.1.7 Søyler og veggskiver	10
2.2 Kommentarer til beregningsgrunnlaget	10
2.2.1 Hulldekkespennvidde	10
2.2.2 LB-tverrsnitt	10
3 Teoretisk bakgrunn	13
3.1 Materialer	13
3.1.1 Betong	13
3.1.2 Slakkarmering	19
3.1.3 Spennarmering	20
3.1.4 Betongelementer	21
3.1.5 Massivtre	24
3.2 Tidsavhengige effekter og -tap	25
3.2.1 Kryp	25
3.2.2 Svinn	26
3.2.3 Relaksasjon av spennstål	28
3.2.4 Tap av spennkraft	29
3.3 Lavkarbonbetong	29
3.3.1 Sementinnhold	30
3.3.2 k-verdi metoden	31

3.4	Klimaregnskap	32
3.4.1	LCA	32
3.4.2	Miljødeklarasjoner	37
3.4.3	Bundet energi	37
3.5	Miljøegenskaper til betong og massivtre	38
3.5.1	Betong	38
3.5.2	Tre	39
3.6	Laster	40
3.6.1	Permanente laster	40
3.6.2	Variable laster	42
3.6.3	Lastkombinering	43
4	Klimagasskalkulator	45
4.1	Forutsetninger	45
4.2	Hulldেকেelement	48
4.2.1	Dimensjonering	49
4.2.2	Deformasjonskontroll	51
4.3	Ytterbjelke	56
4.3.1	Dimensjonering	56
4.3.2	Antakelser	59
4.4	Midtbejelke	60
5	Optimalisering	61
5.1	Mengdeberegning	61
5.2	Optimaliseringspunkter	62
5.3	Variasjon av trykksonehøydefaktor α	64
5.4	Andre optimaliseringspunkter	65
6	Resultat	67
6.1	Mengdeberegning	67
6.1.1	Mengdeberegning caser	69
6.2	Klimautslipp for hele bygget	70
6.3	Elementvise resultater	77
6.3.1	Hulldেকে	77
6.3.2	Ytterbejelke	80
6.3.3	Midtbejelke	81
6.4	Variasjon av trykksonehøydefaktor α	83
7	Diskusjon	85
7.1	Vurdering av resultater	85
7.1.1	Hele bygget	85
7.1.2	Elementvis	87
7.1.3	Variasjon av trykksonehøydefaktor α	90
7.2	Betongelementer og klima	90
7.2.1	Bruken av lavkarbonbetong	90
7.2.2	Andre løsninger	91
7.2.3	Betong og massivtre	91
7.2.4	Betongprosjektering og LCA	92

7.2.5	Sammenligning med rapport	92
7.3	Usikkerhet	93
7.3.1	Klimagasskalkulator	93
7.3.2	Datagrunnlag	93
7.3.3	Resultat	93
8	Konklusjon	95
8.1	Videre arbeid	96
	Referanser	97
	Vedlegg	101
A	Tabell NA.12 fra NS-EN 206	101
B	Tverrsnittdata hulldekke fra NOBI	102
C	Påførte laster fra FEM-Design modellen til Arcon Prosjekt AS	103
D	Elementdata ytterbjelke	105
E	Elementdata midtbjelke	106

Tabeller

2.1	<i>kg CO₂ – ekv. pr. m³</i> for ulike betongresepter brukt i Rønning et al. (2019) og deres ekvivalente karbonklasse etter utslipp og fasthet fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Armeringsdata brukt i Rønning et al. (2019) og fra produsentene Celsa (Almemark, 2015) (slakkarmering) og Tycsa (Global Steel Wire S.A., Celsa Group, 2013) (spennarmering).	8
3.1	Eksponeringsklasser for betongkonstruksjoner. Fra (NS-EN 206, 2016, tabell NA.1)	13
3.2	Materialegenskaper for slakkarmering, B500NC. Fra NS-EN 1992-1-1 (2004). . .	19
3.3	Materialegenskaper for spennstål. Fra (NS-EN 1992-1-1, 2004).	20
3.4	Ulike k-verdier for tilsetningsmaterialene flygeaske og silikastøv etter bestandighetsklasser (NS-EN 206, 2016).	31
4.1	<i>kg CO₂ – ekv.pr. m³</i> betong brukt i klimagasskalkulatoren, fordelt etter fasthet (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1).	45
4.2	<i>kg CO₂ – ekv. pr. kg</i> slakk- eller spennarmering brukt i klimagasskalkulatoren. .	45
4.3	Dimensjonerende krefter for de ulike elementene som optimaliseres. Hentet ut fra FEM-design-modellen produsert av Arcon.	46
4.4	Beregnet tverrsnittdata brukt i klimagasskalkulatoren i Excel. Tverrsnitt fra NO-BI Voss (2016).	49
4.5	Krav til deformasjoner for hulldekkeelementer i et kontorbygg. Positive verdier er oppbøyning, negative er nedbøyning og <i>L</i> er spennvidden (Vinje et al., 2013, Tabell C.1.6).	51
4.6	Oppsummering av laster benyttet i deformasjonsberegningene.	53
6.1	De 8 forskjellige casene det er beregnet klimagassutslipp for i klimagasskalkulatoren vår med tilhørende <i>CO₂</i> - data benyttet. Forklaring av de ulike komponentene i avsnittet over.	70
6.2	Forutsetninger og Excel resultater for hulldekkeelementet med lavest utslipp og tilstrekkelig kapasitet.	77
6.3	Ulike kombinasjoner av hulldekkehøyder i ulike fastheter og karbonklasser med tilhørende totalt utslipp beregnet i Excel. klimagassutslipp pr. dekkeelement med bredde 1,2 m og lengde 7,9 m.	78
6.4	Utslipp for et enkelt hulldekkeelement for de 8 ulike casene. Høyest og lavest verdi er markert i hhv. rødt og grønt.	79
C.1	Lastene påført bygget hentet ut av FEM-design-modellen produsert av Arcon Prosjekt AS.	103
D.1	Elementdata for mest klimavennlige alternativ for ytterbjelken med tilstrekkelig kapasitet for hver case	105
E.1	Elementdata for mest klimavennlige alternativ for midtbjelken med tilstrekkelig kapasitet for hver case	106

Figurer

1.1	Diagrammet viser $kg CO_2 - ekv./m^2$ for referansebygget plassert i Trondheim, i 4, 8 og 16 etasjer. Diagrammet viser utslippet for fasene A1-A5, ved bruk av ulike betongresepter. Fra <i>Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner</i> (Rønning et al., 2019, figur 3.6).	2
2.1	Visualisering av referansebygget beskrevet i Rønning et al. (2019). Fra FEM-design-modellen laget av Arcon Prosjekt AS.	7
3.1	Valg av bestandighetsklasse avhengig av eksponeringsklasse. Fra <i>Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar</i> (NS-EN 206, 2016, tabell NA.15)	14
3.2	Veiledende nedre forventet faset for de ulike bestandighetsklassene. Fra <i>Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar</i> (NS-EN 1992-1-1, 2004, tabell NA.E.1N)	14
3.3	Figuren viser to alternativer av forenklet spenning-tøyningssammenheng for betong under trykk. Fra <i>Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging</i> (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.3 og 3.4)	16
3.4	Figuren viser den ikke-linære sammenhengen mellom spenning og tøyning i konstruksjonsanalyse av betong. Fra <i>Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging</i> (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.2).	17
3.5	Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningskurve for armeringsstål. Fra <i>Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging</i> (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.8).	19
3.6	Figuren viser idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningskurve for spennstål. Fra <i>Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging</i> (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.10)	20
3.7	Tverrsnitt av hulldekkeelementet HD200. Fra <i>Hulldekketyper, tverrsnittsdata</i> (NO-BI Voss, 2016, redigert).	22
3.8	LB- og DLB-bjelker der minste bredde, og største bredde er lik søylebredden. Fra <i>Betongelementboken Bind A</i> (Alexander & Vinje, 2010, figur A 4.30 og A 4.32, redigert).	22
3.9	Tverrsnitt av en LFB-bjelke. Fra <i>Betongelementboken Bind A</i> (Alexander & Vinje, 2010, tabell A 2.2).	23
3.10	Ulike massivtreelementer. Hhv. krysslågt massivtreelement, hulromelement og kantstilt element. Fra <i>Håndbok - bygge med massivtreelementer, hefte 1, Generelt</i> (Aasheim et al., 2006a, Side 7, redigert).	24
3.11	Figuren viser langtidseffekten av kryp på betongens spenning og tøyning. Fra <i>Betongkonstruksjoner</i> (Sørensen, 2017, redigert, figur 3.4 del 1).	25
3.12	Virkning av svinntøyning på betong og spennarmering. De oppståtte tverrsnittskrefter i d). Fra <i>Betongkonstruksjoner</i> (Sørensen, 2017, figur 6.4 del 2)	27
3.13	Maksimalt tillatt klimagassutslipp [$kg CO_2 - ekv. pr. m^3$ betong] for ulike lavkarbonklasser angitt etter fasthet. Fra <i>Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong</i> (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1, redigert).	30
3.14	Regional tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Fra <i>Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong</i> (Norsk Betongforening, 2019, figur 4)	31

3.15	Sammenhengen mellom trinnene i en LCA. Fra <i>Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipp og rammeverk</i> (NS-EN ISO 14040, 2006, figur 1).	34
3.16	Livssyklusstadier med moduler for byggematerialer (øverst) og ulike typer EPDer (nederst). Fra <i>Bærekraftige byggverk - miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler og byggevarer</i> (NS-EN 15804, 2012, Figur 1, redigert, oversatt fra engelsk).	36
3.17	Betong og tre kan fint kombineres i samme bygg. Fra <i>Concrete and Wood Summer House in South Iceland</i> (Springer, 2017).	38
4.1	Dimensjonerende krefter (LK35ULS) i et snitt i hulldekket. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.	47
4.2	Dimensjonerende krefter (LK38ULS) i et snitt i midtbjelken. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.	47
4.3	Dimensjonerende krefter (LK38ULS) i et snitt i ytterbjelken. I midten vises den avstivende veggen som ikke inkluderes i optimaliseringen. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.	47
4.4	Tverrsnittet til hulldekkeelementet, HD265, med sirkulære hull. Fra <i>Hulldekketyper, tverrsnittsdata</i> (NOBI Voss, 2016, Redigert).	48
4.5	Tverrsnittet til hulldekkeelementet, HD320, med tilnærmet rektangulære hull. Fra <i>Hulldekketyper, tverrsnittsdata</i> (NOBI Voss, 2016, Redigert).	48
4.6	Hulldekkeelement med trykksonehøyden a_d lik tykkelsen av toppflensen, t Fra <i>Hulldekketyper, tverrsnittsdata</i> (NOBI Voss, 2016, Redigert).	49
4.7	Figuren viser den indre momentarmen z , i et tverrsnitt påført et moment M_{Ed}	51
4.8	Figuren viser tyngdepunktet til et betongtverrsnitt, tpb , og til det transformerte tverrsnittet, tp , og avstanden mellom dem, Y_t	54
4.9	Generell utforming av en LB-bjelke med mål. Hovedbjelke (venstre) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre) skravert i blått.	56
4.10	Stavmodell for en generell LB-bjelke med avstander og nodeplassering, samt ytre påførte krefter (N_{Ed} og H_{Ed}) på tverrsnittet.	57
4.11	Generelle utforming av en midtbjelke/DLB-bjelke. Hovebjelke (midten) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre/venstre) skravert i blått.	60
5.1	Tverrsnittsdimensjoner og armeringsmengde av forspente betongelementer brukt i referansebygget. Fra <i>Klimagass-regnskap av tre- og betongkonstruksjoner</i> (Rønning et al., 2019, tabell 2-6).	61
5.2	Tverrsnittsdimensjoner, betongkvalitet og armeringsmengde etasjevis brukt i referansebygget. Fra <i>Klimagass-regnskap av tre- og betongkonstruksjoner</i> (Rønning et al., 2019, tabell 2-7).	61
5.3	Totalt mengder betong over marknivå, og armering for byggene på 4, 8 og 16 etasjer i Rønning et al. (2019) i m^3 . Total tyngde armering inkluderer både slakk- og spennarmering og oppgis i tonn. Fra <i>Oppdragsrapport rev b - eksempebygg Namsos</i> (Arcon Prosjekt AS, 2018, Tabell 10.1, redigert)	62
5.4	Gjentakelse av tabell 3.13. Maksimalt tillatt klimagassutslipp, $kg CO_2-ekv. pr. m^3$ betong angitt etter fasthet. Fra <i>Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong</i> (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1, redigert).	62
5.5	Snitt av kortsiden som viser 2 spenn. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.	63
5.6	Snitt av langsiden som viser 7 spenn. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.	63
6.1	Armeringsmengder beregnet i Excel etter verdier fra Rønning et al. (2019). Total mengde sammenlignet med mengdene fra Rønning et al. (2019).	67

6.2	Betongmengder beregnet i Excel etter verdier fra Rønning et al. (2019). Total mengde sammenlignet med mengdene fra Rønning et al. (2019).	68
6.3	Figuren viser <i>kg armering</i> (stolper) og <i>m³ betong</i> (linje) for de 8 ulike casene beskrevet i kapittel 6.2, <i>Klimautslipp for hele bygget</i>	69
6.4	Totalt utslipp for referansebygget fordelt på de ulike casene beskrevet i tabell 6.1 i <i>kg CO₂ – ekv.</i> . Figuren viser utslippet fordelt mellom de ulike elementene fra kapittel 4, <i>Klimagasskalkulator</i>	72
6.5	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 1. Tallene indikerer utslippsverdier.	73
6.6	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 2. Tallene indikerer utslippsverdier.	73
6.7	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 1. Negativ reduksjonsprosent indikerer økning i utslipp.	73
6.8	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 2.	73
6.10	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 4. Tallene indikerer utslippsverdier.	74
6.11	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 3.	74
6.12	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 4.	74
6.13	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 5. Tallene indikerer utslippsverdier.	75
6.14	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 6. Tallene indikerer utslippsverdier.	75
6.15	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 5.	75
6.16	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 6.	75
6.18	Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 8. Tallene indikerer utslippsverdier.	76
6.19	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 7.	76
6.20	Resultater fra Excel med samlet reduksjon av <i>CO₂-utslipp</i> for case 8.	76
6.21	Det optimaliserte tverrsnittet for hulldekkeelementene. Fra <i>Hulldekketyper, tverrsnittsdata</i> . (NOBI Voss, 2016, redigert).	78
6.22	Figuren viser utslipp i <i>kg CO₂ – ekv.</i> for alle de vurderte hulldekketverrsnittene i to ulike karbonklasser; klasse A og klasse Ekstrem (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1) i forskjellige fastheter. Gjelder for hulldekke med bredde 1,2 m og lengde 7,9 m.	79
6.23	<i>Gjentakelse av figur 4.9</i> . Generell utforming av en LB-bjelke, med mål og parametere som finnes igjen i tabell D.1. Hovebjelke (venstre) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre) skravert i blått.	80
6.24	Klimautslippet for én LB-bjelke med spennvidde 7,2 m, variert over; karbonklasse A og Ekstrem, fasthetsklasse, og tverrsnitt.	81
6.25	<i>Gjentakelse av figur 4.11</i> . Generelle utforming av en midtbjelke/DLB-bjelke som finnes igjen i tabell E.1. Hovebjelke(midten) skravert i grønt og sekundærbjelke(høyre/venstre) skravert i blått.	82
6.26	Klimautslippet for én midtbjelke med spenn på 7,2 m, variert over: karbonklasse A og Ekstrem, fasthetsklasse, og tverrsnitt.	82
6.27	Resultat av øvelsen utført i Excel der verdien for α varierer fra 0,3 til 0,6 for å undersøke endringen i klimagassutslipp. Verdiene gjelder for en LKBA/B35 betong og én meter bjelke.	83

A.1	Tabell NA.12 fra NS-EN 206: Grenseverdier for luftinnhold, minste effektive bindemiddelmengde og største masseforhold for betong etter nasjonalt tillegg NS-EN 206 NS-EN 206 (2016).	101
B.1	Tverrsnittdata hulldekkeelementer fra NOBI Voss (2016).	102

Nomenklatur

Forkortelser

Arcon	=	Arcon Prosjekt AS
BXX	=	Betongfasthet
CEN	=	Den europeiske standardiseringsorganisasjonen
EC	=	Eurocode
EPD	=	Environmental Product Declaration, Miljødeklarasjon
FA	=	Flygeaske
GWP	=	Global Warming Potential
ISO	=	Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen
LCA	=	Life Cycle Assessment, Livsløpsvurdering, Livsløpsanalyse
LCI	=	Life cycle inventory analysis, Livsløpsregnskap
LCIA	=	Life cycle impact assessment, Livsløpseffektvurdering
LK	=	Lastkombinasjon
LKBA	=	Lavkarbonbetong klasse A
LKBB	=	Lavkarbonbetong klasse B
LKBE	=	Lavkarbonbetong klasse Ekstrem
NA	=	National Annex, Nasjonalt tillegg
NB	=	Norsk Betongforening
NS	=	Standard utviklet i Norge
NS-EN	=	Standard utviklet i Europa og fastsatt som Norsk Standard
NS-EN ISO	=	Standard utviklet av ISO, deretter fastsatt som europeisk og Norsk Standard
ODP	=	Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer
PCR	=	Product category rules, Produktkategoriregler
RSL	=	Reference Service Life
SETAC	=	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SF	=	Silikastøv
ULS	=	Ultimate limit state, bruddgrensetilstand
UNEP	=	United Nations Environment Programme
v/b-tall	=	Vann/bindemiddel, forholdstall

Greske symboler

α	=	Trykksonehøydefaktor
α_{xx}	=	Lastfaktorer i ulike lastberegninger
β_{cc}	=	Fasthetfaktor
γ	=	Materialfaktor
ε	=	Tøyning
θ	=	Geometrisk avvik
μ	=	Relaksasjonsfaktor
ρ	=	Densitet
ρ_{1000}	=	Prosentvis relaksasjonstap etter 1000 timer
σ	=	Spenning
φ	=	Armeringsdiameter
$\varphi(t, t_0)$	=	Kryptall

Matematiske tegn

E	=	Elastisitetsmodul
c	=	Senteravstand
c	=	Sementinnhold
c_{nom}	=	Overdekning
d	=	Effektiv tverrsnittshøyde
I	=	Andre arealmoment
k	=	Virkningsfaktor
m	=	Masseforhold
MPa	=	Megapascal
M	=	Moment
N	=	Newton
p	=	Tilsetningsmaterialinnhold
P	=	Spennkraft
q	=	Fordelt last
RH	=	Luftfuktighet
s	=	Snølast
v	=	Vanninnhold
X_k	=	Karakteristisk verdi
X_{Ed}	=	Dimensjonerende verdi
X_{Rd}	=	Kapasitetsverdi
z	=	Indre momentarm

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I dagens verdenssamfunn er klimaendringer og det menneskelige bidraget til disse i stor grad i fokus. Gjennom bl.a. FNs bærekraftsmål og Paris-avtalen bindes mange av verdens land til å redusere sitt klimaavtrykk ved å redusere CO_2 -utslipp i størst mulig grad. Norge er inkludert i dette, og jobber med å redusere utslippene. I følge EUs grønne vekststrategi; Green Deal, skal en reduksjon på 55%, sammenlignet med 2015-nivået, oppnås innen 2030 (European Commission, 2019).

En av sektorene det regnes som oppnåelig med store utslippsbesparelser er byggsektoren. Blant annet diskuteres klimaegenskapene til, og sammenligningsgrunnlaget mellom, konstruksjonsmaterialene betong og massivtre. I betongindustrien utvikles stadig nye typer lavkarbonbetong. Dette konkurrerer mot det allment godkjente miljøvennlige materialet massivtre. Betongindustrien står i dag for omtrent 10% av verdens totale CO_2 -utslipp (Andrew, 2018), og motivasjonen for å redusere denne andelen er stor. Flere studier og artikler sammenligner miljøegenskapene til materialene, med tilhørende like mange ulike konklusjoner.

Utgangspunktet til denne masteroppgaven er en rapport med tittel: "Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner; Kontorbygning - 4, 8 og 16 etasjer". Denne er utarbeidet av Østfoldforskning, med bl.a. seniorforsker Anne Rønning, og ble utgitt i juli 2019 (Rønning et al., 2019). I rapporten, som er bestilt av Betongelementforeningen, utføres det et klimagassregnskap, basert på metodikken *Life cycle assessment (LCA)*, for et kontorbygg på hhv. 4, 8 og 16 etasjer, lokalisert i enten Kristiansand eller Trondheim. Det ble beregnet med to alternative hovedmaterialer; prefabrikkerte betongelementer eller massivtreelementer. Rapporten konkluderer med at det er mest gunstig å bygge med betongelementer for de to høyeste byggene.

Norsk betongforening ga i 2019 ut en revidert publikasjon omhandlende lavkarbonbetong, NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Denne oppgir krav til maksimalt klimagassutslipp for de ulike karbonklassene og fasthetsklasse. Den reviderte publikasjonen har skjerpet kravene, og er et tydelig tegn på at betongbransjen i Norge ønsker å bidra til redusert utslipp.

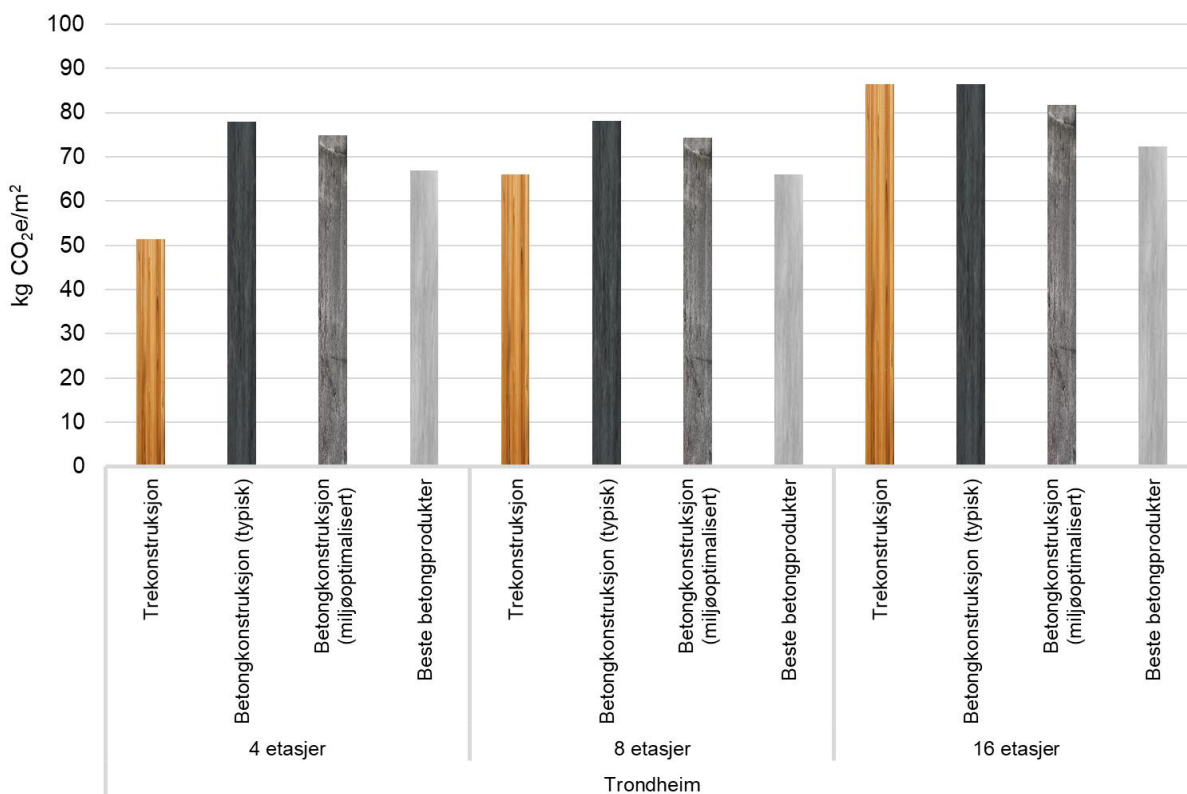
1.2 Rapport fra Østfoldforskning

Som nevnt er utgangspunktet til denne masteroppgaven rapporten: "Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner" (Rønning et al., 2019). Denne har som hovedformål å sammenligne klimagassregnskapet til et bygg med like funksjonskrav. Forskjellen på byggene er hovedbæresystemet, som består av enten prefabrikkerte betongelementer eller massivtreelementer.

De siste 25 årene har LCAer blitt brukt i byggenæringen for å vurdere forskjell i klimautslippet ved bruk av ulike produkter. Denne metoden gjør det mulig å vurdere enten deler eller hele livsløpet til et bygg. Både i media, bransjen og academia har det pågått en diskurs om hvilke materialer som er det mest klimavennlige (Rønning et al., 2019). For å oppklare dette ønsket Betongelementforeningen at det skulle utarbeides et sammenlignbart klimagassregnskap mellom et kontorbygg med like funksjonskrav i hhv. betongelementer og massivtre. Bygget ble plassert i Kristiansand og Trondheim, der valget om to ulike byer ble gjort for å se på den eventuelle konsekvensen av transport. Det ble

brukt 3 ulike betongresepter i beregningene; typiske betongprodukter, miljøoptimaliserte- og de beste betongproduktene produsenter kunne stille med.

Rapporten viser at totalt klimautslipp per kvm. er lavest ved å bygge i massivtre for bygg på 4 etasjer. Ved økt byggehøyde avtar utslippsforskjellen mellom materialene, og utslippet er relativt likt ved 16 etasjer for de typiske betongproduktene. For de miljøoptimaliserte produktene vil utslippet være mindre for betongkonstruksjoner enn trekonstruksjoner i 16 etasjer. Ved bruk av bransjens ”beste” og mest miljøvennlige betongprodukt vil utslippet være lavest for 8 og 16 etasjer, mens massivtre uansett er mest miljøvennlig for 4 etasjer. Antall $kg CO_2 - ekv. pr. m^2$ til byggene i Trondheim er fremstilt i figur 1.1.



Figur 1.1: Diagrammet viser $kg CO_2 - ekv./m^2$ for referansebygget plassert i Trondheim, i 4, 8 og 16 etasjer. Diagrammet viser utslippet for fasene A1-A5, ved bruk av ulike betongresepter. Fra *Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner* (Rønning et al., 2019, figur 3.6).

Rapportens konklusjon er gjengitt herunder.

Det er ikke empirisk grunnlag for å hevde generelt at tre er mer miljøvennlig enn betong. Avhengig av kontekst og ulike løsninger en finner i konkrete prosjekter, vil en kunne redusere klimagassutslippene uavhengig av materialvalg. Dette kan fremmes ved å la produsenter og andre utførere få større frihet til å benytte sin kompetanse og praktiske kunnskap for å utvikle innovative løsninger (Rønning et al., 2019).

1.3 Formål med masteroppgaven

Masteroppgaven tar for seg en optimalisering av ulike konstruksjonsdeler i betongelementbygget beskrevet av Rønning et al. (2019), for å se på muligheten for en ytterligere reduksjon av klimagassutslippet ved å bruke mer tid i prosjekteringsfasen. Optimaliseringen gjøres med mål om reduksjon av klimagassutslippet som viktigste parameter. Målet er å illustrere potensialet som ligger i dagens, og fremtidens marked, når det gjelder utslippsreduksjon. I forbindelse med dette utvikles en klimagasskalkulator i Microsoft Excel, hvor dimensjoneringen og optimaliseringen utføres.

Rønning et al. (2019) benyttes som et utgangspunkt og sammenligningsgrunnlag, der nye løsninger vil bli utprøvd mot de presentert i rapporten. Dagens fokus på klimagassutslipp og konsekvensene av dette virker ikke å avta med tiden. I tillegg vil byggenæringen etter all sannsynlighet endre seg i årene fremover, ved at krav om utslipp vil bli strengere både på produksjons- og prosjektbasis.

1.4 Oppbygging av rapporten

Masteroppgaven er inndelt i kapitler med ønske om at leserekkefølgen skal gi tilstrekkelig grunnlag for å forstå resultatene og den påfølgende diskusjonen.

Kapittel 2, *Beregningsgrunnlag* beskriver referansebygget i masteroppgaven, hentet fra Rønning et al. (2019). Det 4 etasjer høye bygget inneholder en rekke begrensninger det tas hensyn til i masteroppgaven for å oppnå en validert optimalisering. Kapitlet tar for seg disse begrensningene, samt diverse utfordringer og mangler som ble oppdaget underveis i arbeidet med rapporten og datagrunnlaget.

Kapittel 3, *Teoretisk bakgrunn* omhandler relevant teori for denne masteroppgaven. Formålet til dette kapitlet er å gi leseren den nødvendige kunnskapen for videre lesing. Dette inkluderer teori om alle relevante materialer, ulike laster som virker på bygget og en del spesifikk teori rettet mot miljø- og klimaproblematikken. Eksempelvis lavkarbonbetong, miljøegenskaper til materialene og beskrivelse av LCA og EPD.

Kapittel 4, *Klimagasskalkulator* beskriver verktøyet som ble laget. Metode for utarbeidelse og bruk er beskrevet, samt nødvendig teori ved dimensjonering av de ulike elementene. Optimaliseringen av hulldekke- og bjelkeelementer er utført og disse beskrives detaljert i hvert sitt delkapittel.

Kapittel 5, *Optimalisering* tar for seg optimaliseringspunktene det ble valgt å fokusere på. I tillegg blir mengdeberegningene kommentert nærmere, satt i kontekst til Rønning et al. (2019). Til slutt nevnes andre mulige optimaliseringspunkter, som er valgt bort i denne masteroppgaven.

Kapittel 6, *Resultat* presenterer resultatene fra analysene og sammenligninger med Rønning et al. (2019). Det beskrives 8 ulike caser med ulike inputparametere og hvordan disse er beregnet. Resultatene fra mengdeberegningene presenteres. I tillegg går det nærmere inn på de enkelte elementene og det vises klimagassresultater for disse. Til slutt presenteres resultatene fra en øvelse rundt klimaoptimalisering av trykksonehøydefaktoren, α .

Kapittel 7, *Diskusjon* tolker resultatene beskrevet i kapittel 6, *Resultat* samt gyldigheten og usikkerheten rundt disse. I tillegg diskuteres ulike problemstillinger rundt betongelementer og klima.

Kapittel 8, *Konklusjon* avslutter masteroppgaven, og det presenteres ulike retninger for videre arbeid med denne tematikken. Formålet med masteroppgaven besvares.

1.5 Aktører, programvare og regelverk

Aktører

Videre nevnes de ulike bedrifter og foreninger som nevnes i denne masteroppgaven, og hva de har bidratt med av enten datagrunnlag eller annet materiell.

- **Østfoldforskning** med seniorforsker Anne Rønning som prosjektleder for arbeidet utført i rapporten ”Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner”. Datagrunnlaget i rapporten inkluderer både dokumentasjonen fra de prosjekterende aktørene og klimagassberegninger. Klimagassberegningene er gjennomført hos Østfoldforskning. I tillegg har de sørget for at byggets funksjon er den samme for både massivtre og betongelementer.
- **Arcon Prosjekt AS** utførte dimensjoneringen av referansebygget i Rønning et al. (2019) i betongelementer og massivtreelementer. I forbindelse med denne masteroppgaven ble det opprettet kontakt med Simen Haave i Arcon som bidro med god hjelp. Haave ga oss dokumentasjonen til referansebygget, med flere revisjoner. Disse revisjonene besvarte spørsmål Østfoldforskning hadde om bygget. Noe av dette er ikke tatt med i rapporten. I tillegg inneholder dokumentasjonen mer detaljerte mengdebeskrivelser. Haave ga oss også tilgang til modelleringsfilene fra programmet FEM-design. Dimensjoneringen av bygget ble tredjeparts verifisert av Aas-Jakobsen.
- **Betongelementforeningen** er oppdragsgiveren til rapporten ”Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner” (Rønning et al., 2019). Prosjektet ble starten med ønske om å sammenligne et bygg med samme funksjon i betong- og massivtreelementer. I tillegg hadde Betongelementforeningen et ønske om at studenter ved NTNU skulle skrive en oppgave om betongelementer, med rapporten Rønning et al. (2019) som utgangspunkt. Betongelementforeningen inviterte oss til å delta på Betongindustridagen 2020. Dette ga oss en uvurderlig forståelse av dagens betongelementbransje og vi kom i kontakt med mange spennende aktører. I tillegg til å være behjelpelige på spørsmål om bl.a. Betongelementboken og informasjon rundt prosjektet som resulterte i Rønning et al. (2019).

Programvare

Følgende dataprogrammer benyttes:

- **FEM-Design**; brukes til å hente ut informasjon om referansebygget benyttet i rapporten til Østfoldforskning (Rønning et al., 2019), og som sammenligningsgrunnlag i denne masteroppgaven. I tillegg beregnes dimensjonerende krefter. Filer mottatt fra Arcon.
- **Microsoft Office Excel**; brukes til å lage klimagasskalkulatoren, optimalisere løsninger og plote verdier for å produsere diagrammer.
- **Autodesk AutoCAD**; brukes til å produsere tegninger og illustrasjoner.

Standarder, håndbøker og publikasjoner

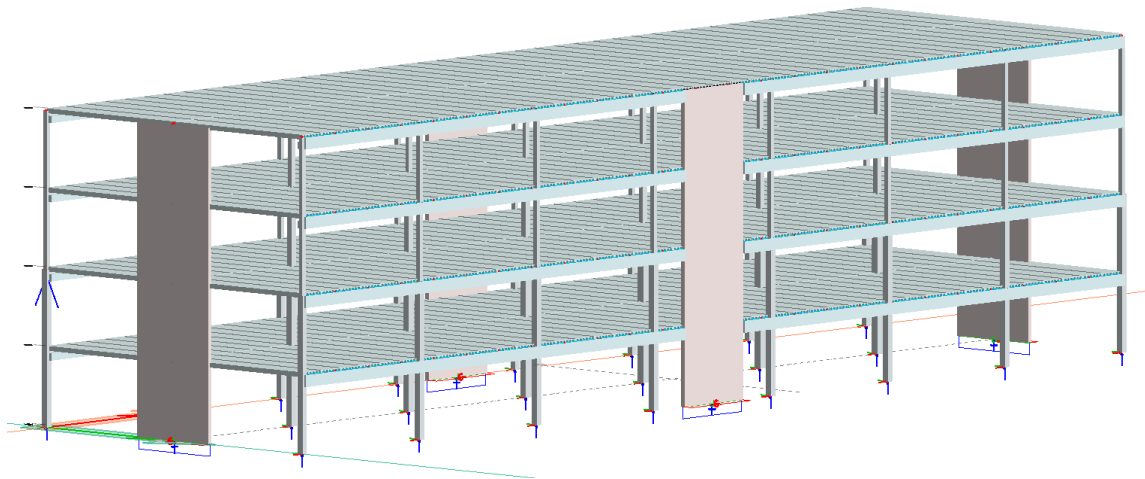
Relevante standarder, håndbøker og publikasjoner for masteroppgaven er listet under.

- NS-EN 1990:2002+NA:2016: Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner (NS-EN 1990, 2002).
- NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-1: Allmenne laster. Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger (NS-EN 1991-1-1, 2002).
- NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-3: Allmenne laster. Snølaster (NS-EN 1991-1-3, 2003).
- NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-4: Allmenne laster. Vindlaster (NS-EN 1991-1-4, 2005).
- NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008: Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging (NS-EN 1992-1-1, 2004).
- NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017: Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar (NS-EN 206, 2016).
- NS-EN 15804: Bærekraftige byggverk - miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategori-regler og byggevarer (NS-EN 15804, 2012).
- NS-EN 14025; Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer (NS-EN 14025, 2010).
- NS-EN ISO 14040; Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipp og rammeverk (NS-EN ISO 14040, 2006).
- NS-EN ISO 14044; Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer (NS-EN ISO 14044, 2006).
- NS-EN 16757; Bærekraftige byggverk - Miljødeklarasjoner - Produktkategori-regler for betong og betongelementer (NS-EN 16757, 2017).
- Håndbok N400: Bruprosjektering, Vegdirektoratet (Håndbok N400, 2015).
- Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong, Norsk betongforening (Norsk Betongforening, 2019).
- Publikasjon nr. 6: Betong og miljø, Norsk betongforening (Miljøkomiteen i Norsk Betongforening, 2018).

2 Beregningsgrunnlag

Referansebygget er et tenkt bygg med grunnflate $50,4 \times 15,9 \text{ m}$ i 4, 8 og 16 etasjer. Byggene ble prosjektert og dimensjonert i henhold til dagens praksis av *Arcon Prosjekt AS (Arcon)*. I dette kapitlet vil bygget og dens geometri bli presentert. Det forklares hvordan utslippet er beregnet og hva denne masteroppgaven har fokusert på som sammenligningsgrunnlag. Til slutt kommenteres diverse uklarheter og mangler fra beregningsgrunnlaget mottatt fra Arcon.

Bygget er plassert i enten Kristiansand eller Trondheim for å vise forskjellen i materialtilgang og transportkostnaden i *antall kilo CO_2 -ekvivalenter ($\text{kg CO}_2 - \text{ekv.}$)*. Bygget er av samme funksjonskrav som et tilsvarende bygg i massivtre for å kunne sammenligne de ulike byggematerialene opp mot hverandre. Byggets klimaskjerm, innvendige vegger og tekniske installasjoner er ikke inkludert i rapporten da dette antas likt uavhengig av bærematerialene. Figuren under viser referansebygget i 4 etasjer i prefabrikkerte betongelementer. Rønning et al. (2019) har brukt masseberegningen fra Arcon til å gjennomføre



Figur 2.1: Visualisering av referansebygget beskrevet i Rønning et al. (2019). Fra FEM-designmodellen laget av Arcon Prosjekt AS.

LCAen. Dokumentasjonen på klimagassutslippet for de ulike elementene og produktene er funnet i produktspesifikke *Environmental Product Declarations (EPD)* og omfatter LCA-fasene *A1-A5*. Mer om dette i delkapittel 3.4.1, *LCA*. En EPD er en miljødeklarasjon for produkter som produsenten selv fremstiller iht. internasjonalt regelverk, og legger grunnlaget for en LCA. Klimaberegningene ble gjennomført i to faser, der den første fasen bestod av EPDer fra fire leverandører som ga et gjennomsnitt for produktet. I den andre fasen ble leverandørene involvert for å finne løsninger som minimerer utslippet. Dette resulterte i såkalte miljøoptimaliserte produkter, som ble brukt i klimagassberegningene.

Konsekvensen av produktspesifikke EPDer er at CO_2 -dataen vil ha noe varierende størrelse sammenlignet med tallene som brukes i klimagasskalkulatoren vår, beskrevet i kapittel 4, *Klimagasskalkulator*. EPDene brukt i Rønning et al. (2019) er produktspesifikke i motsetning til CO_2 -dataen kalkulatoren bruker, fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019), som er generelle. Tallene som legger grunnlaget for beregning av totalt CO_2 -utslipp i Rønning et al. (2019) er vist i tabell 2.1. Tettheten til betongen anvendt i Rønning et al. (2019) er $\rho = 2548 \text{ kg/m}^3$. Dette brukes for å regne om fra *tonn* til m^3 betong, som gjør tallene sammenlignbare med NB37.

Tabell 2.1: $kg CO_2 - ekv. pr. m^3$ for ulike betongresepter brukt i Rønning et al. (2019) og deres ekvivalente karbonklasse etter utslipp og fasthet fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Armeringsdata brukt i Rønning et al. (2019) og fra produsentene Celsa (Almemark, 2015) (slakkarmering) og Tycsa (Global Steel Wire S.A., Celsa Group, 2013) (spennarmering).

Element	Fasthet, f_{ck}	Gj.snitt	Optimal	NB37
$[kg CO_2 - ekv. pr. m^3 \text{ betong}]$				
Søyler/bjelker	B45	298	298	B (290)
Veggskive	B35/B45	280	262	B (280)/ B (290)
Hulldekke	B45	275	253	B (290), A (220)
Element	Fasthet, f_d	Gj.snitt	Optimal	Celsa & Tycsa
$[kg CO_2 - ekv. pr. kg \text{ armering}]$				
Slakkarmering	434 MPa	0,479		0,36
Spennarmering	1422 MPa	1,04		0,599

2.1 Begrensinger

For å kunne benytte Rønning et al. (2019) som sammenligningsgrunnlag, er det visse begrensninger som må implementeres i beregningene. Disse fører til at resultatet i masteroppgaven ikke kan generaliseres for alle tilfeller. Begrensningene består av flere ulike faktorer, og i dette delkapittelet vil disse bli presentert og begrunnet, før de blir diskutert i kapittel 7, *Diskusjon* mer inngående.

2.1.1 Livsløpsanalyse

I utslippsberegningene i denne masteroppgaven vurderes kun LCA-fasene *A1-A3* som omhandler byggets produksjonsfase. Dette innebærer sement- og elementproduksjon, helt frem til transporten til anleggsplass. Det var enkelt å finne EPDer for disse fasene som gav et godt datagrunnlag, bl.a. oppgir NB37 verdier for disse fasene (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1). I tillegg er transportavstander svært prosjektspesifikt. I Rønning et al. (2019) ble det beregnet utslipp for fasene *A1-A5*, men resultatet var delt opp i de enkelte fasene, så sammenligning med rapportens tall viste seg mulig.

2.1.2 Elementtyper

Dimensjoneringen av betongelementer begrenses til standardelementene beskrevet i Betongelementboken Bind A (Alexander & Vinje, 2010). Disse er lett tilgjengelig i dagens marked, mye benyttet og grundig testet. Ved å utforme egne betongelementer er det mulig løsningen hadde blitt enda mer klimaoptimalisert. For å ikke begrense resultatet til spesialprodukter ble det besluttet å restrikttere valgene til standardelementer gitt i Betongelementboken (Alexander & Vinje, 2010). Det er derimot funnet spesifikke produsenter av hulldekkeelementer for å bruke et reelt tverrsnitt.

2.1.3 Arkitektur

Byggets geometri består av 7×2 spenn, med avstivende veggskiver i full høyde på alle fasader, som vist i figur 2.1. Valget av 2 spenn fremfor 3 er begrunnet i tidligere erfaring fra Arcon (Rønning et al., 2019). Det er valgt å videreføre denne geometrien slik at det tenkte arkitektoniske uttrykket ikke vil bli påvirket, og at bygget skal opprettholde samme funksjonskrav. Dette innebærer at spennvidden til hulldekkene og bjelkene forblir den samme, noe som begrenser optimaliseringsmulighetene. Denne begrensningen antas å være relevant da arkitekten og byggherren ofte er enig om arkitektonisk uttrykk før detaljprosjekteringen er ferdig. Bygget i rapporten utføres i 4, 8 og 16 etasjer. Det er valgt å sammenligne optimaliseringen med bygget på 4 etasjer i denne masteroppgaven, da reduksjonen i utslipp vil ha overføringverdi til 8 og 16 etasjer.

2.1.4 Tidligfasthet og liggetid

Ved betongelementproduksjon av forspente elementer er høy tidligfasthet avgjørende for å opprettholde en jevn produksjon, og betongen må tåle spennkraften raskest mulig. Ved å oppnå en tilstrekkelig høy tidligfasthet på mindre enn ett døgn vil produksjonen kunne opprettholdes hver dag. I lavkarbonbetong erstattes en del av sementen med såkalte pozzolane materialer noe som ofte fører til tregere fasthetsutvikling, mer om dette i kapittel 3.3, *Lavkarbonbetong*. Dette gjelder spesielt for materialene *flygeaske (FA)* og slag som er mye brukt i dag (Sellevoid, 2008). Dette er stadig under forskning, slik at lavkarbonbetong med alternative bindemidler i fremtiden kan oppnå enda raskere fasthetsutvikling. Det vil dermed ta lengre tid å oppnå ønsket fasthet, for lavkarbonbetong, i dagens produksjon. For å vise potensialet ved bruk av mer klimavennlig betong er det derfor valgt å se bort fra ønsket om høy tidligfasthet på under et døgn. Det er kun tatt hensyn til tilstrekkelig betongfasthet i tilnærmet herdet tilstand. Dette vil øke liggetiden til elementene, og betongelementfabrikkene blir nødt til å løse dette med bl.a. reduserte produksjonsintervall. I denne masteroppgaven betraktes ikke dette som et problem, da det antas at bestilleren er villig til å betale for dette.

2.1.5 Økonomi

Kostnadene til et byggeprosjekt er stort sett avgjørende for om bygget blir reist eller ikke. Det er derfor vanlig å vurdere kostnaden til prosjektet, og optimalisere løsningene deretter. I denne masteroppgaven er det derimot ikke vurdert kostnaden av optimaliseringen. Målet om redusert utslipp kan, i noen tilfeller, være avgjørende for om løsningen velges, uavhengig av kostnaden. Det er derfor viktig å belyse hvilket potensiale betong har som byggemateriale når målet er kun fokusert på redusert utslipp.

2.1.6 Laster

Byggets lastdata er hentet fra Namsos kommune da deres naturlaster er tilnærmet et gjennomsnitt for Norge. De påførte lastene som vindlast, snølast osv. er i denne masteroppgaven hentet ut fra FEM-design-modellen laget av Arcon. Det er gjort for å opprettholde muligheten for sammenligning med Rønning et al. (2019). Lastplasseringene og lastkombineringen som gir de dimensjonerende kreftene er gjennomført med samme modell. Mer og påførte laster i kapittel 3.6, *Laster*.

2.1.7 Søyler og veggskiver

I Rønning et al. (2019) og prosjekteringen til Arcon er søyler en del av beregningen. Betongvolumet til søylene er relativt lavt sammenlignet med betongvolumet til dekkene og bjelkene. Det er derfor valgt å ikke optimalisere søylene. Søylevolumet er derimot tatt med i oppgavens beregninger av det totale klimautslippet, med inndata fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019), som for de øvrige elementene. Veggskivene som gir den påkrevde avstivningen er heller ikke optimalisert i kalkulatoren, og betongvolumet til veggskivene er utelatt fra alle beregninger.

2.2 Kommentarer til beregningsgrunnlaget

Videre påpekes enkelte feil og mangler i Rønning et al. (2019) som ble oppdaget under arbeid med optimaliseringen.

2.2.1 Hulldekkespennvidde

Rønning et al. (2019) bruker et totalt areal på hulldekkene på $A_0 = 3185 \text{ m}^2$ i bygget på 4 etasjer, som gir 796 m^2 per etasje. Lengden på bygget er $50,4 \text{ m}$. Dette vil gi en spennvidde L på hulldekkene på

$$L = \frac{796 \text{ m}^2}{50,4 \text{ m} \cdot 2} = 7,9 \text{ m} \quad (2.1)$$

Da midtbjelken (LFB-bjelken) og ytterbjelkene (LB-bjelkene) vil bidra til oppnådd flate per etasje vil den reelle spennvidden til hulldekkene være kortere enn $7,9 \text{ m}$. For å få bedre sammenligningsgrunnlag er det valgt å beholde spennvidden brukt av Arcon, på $7,9 \text{ m}$.

2.2.2 LB-tverrsnitt

Tverrsnittet brukt av Arcon i beregningsprogrammet FEM-design og tverrsnittet bruk i mengdeberegningen stemmer ikke overens for ytterbjelkene. I FEM-design benevnes LB-tverrsnittet $LB\ 300/500$, og har følgende areal:

$$A_1 = 450 \cdot 500 - 200 \cdot 150 = 0,0195 \text{ m}^2 = 195\ 000 \text{ mm}^2 \quad (2.2)$$

Denne bjelken er en LB-bjelke av typen "LB'er med minste bredde lik søylebredden" og har følgende tverrsnittsdata og kapasitet i følge Betongelementboken Bind A (Alexander & Vinje, 2010):

$$b_1 = 450 \text{ mm} \quad : \quad h = 500 \text{ mm} \quad : \quad b = 300 \text{ mm} \quad : \quad M_{Rd} = 379 \text{ kNm} \quad (2.3)$$

I Rønning et al. (2019) er det kun oppgitt totalt lengde, og total mengde betong for LB-bjelkene. Ved bruk av densitet lik 2584 kg/m^3 oppnås følgende tverrsnittsareal for $403,2 \text{ m}$ bjelke:

$$A_2 = \frac{48,348 \text{ m}^3}{403,2 \text{ m}} = 0,12 \text{ m}^2 = 120\ 000 \text{ mm}^2 \quad (2.4)$$

Dette arealet svarer til tverrsnittet *LB 150/500* i Betongelementboken Bind A (Alexander & Vinje, 2010). Den er en LB-bjelke av typen "LB"er med største bredde lik søylebredden" og har følgende tverrsnittsdata i følge samme kilde:

$$b_1 = 300 \text{ mm} \quad : \quad h = 500 \text{ mm} \quad : \quad b = 150 \text{ mm} \quad : \quad M_{Rd} = 285 \text{ kNm} \quad (2.5)$$

Den dimensjonerende lasten for ytterbjelken er mindre enn kapasiteten til begge bjelkene. Ved beregning av dimensjonerende last i FEM-design brukes en bjelke med høyere egenlast som dermed gir en høyere verdi. Bruken av lastene hentet fra FEM-design er omtalt i kapittel 4, *Klimagasskalkulator*.

3 Teoretisk bakgrunn

Nødvendig teoretisk grunnlag for denne masteroppgaven beskrives i dette kapittelet. Kapittelet består av seks deler som danner grunnlaget for beregningene og optimaliseringen av referansebygget i forrige kapittel. Disse innebærer beskrivelser av: materialer, tids-effekter på betong og armeringsstål, lavkarbonbetong, utførelse av klimagassregnskap, miljøegenskaper til betong og massivtre og laster.

3.1 Materialer

I alle konstruksjoner benyttes flere ulike materialer, med ulike konstruksjonstekniske egenskaper. Videre i dette delkapittelet beskrives noen av disse egenskapene for materialene betong, massivtre og armeringsstål. Termer og begreper beskrives hvis nødvendig.

3.1.1 Betong

Betong består av hovedbestanddelene sement, vann og tilslag. Det stilles krav til betongens egenskaper både i fersk og herdet tilstand, samt i tiden fra fersk til herdet. For betongelementproduksjon er det krav til fasthet for støping på støpebord, i tillegg til tidligfasthet for løfting bort fra støpebordet. Valg av sementerstatter, f.eks. flyveaske, påvirker dette (Norsk Betongforening, 2019). Betongen klassifiseres etter fasthetsklasse og bestandighetsklasse, som påvirkes av hverandre og.

Eksponering- og bestandighetsklasse

Miljøets påvirkning på betongen differensieres i ulike eksponeringsklasser etter NS-EN 206 (2016). Klassene beskriver miljøet betongen vil bli eksponert for og kan variere for ulike deler av bygget. Det finnes 18 ulike eksponeringsklasser fra X0 til XSA som deles inn i 8 hovedkategorier. Tabell 3.1 beskriver de ulike kategoriene med betegnelser for de tilhørende eksponeringsklassene.

Tabell 3.1: Eksponeringsklasser for betongkonstruksjoner. Fra (NS-EN 206, 2016, tabell NA.1)

Kategoribeskrivelse	Eksponeringsklasser
1 Ingen risiko for korrosjon eller nedbrytning	X0
2 Korrosjon framkalt av karbonatisering	XC1, XC2, XC3, XC4
3 Korrosjon framkalt av klorider som ikke stammer fra sjøvann	XD1, XD2, XD3
4 Korrosjon framkalt av klorider fra sjøvann	XS1, XS2, XS3
5 Fryse-/tineangrep med eller uten avisningsmidler	XF1, XF2, XF3, XF4
6 Kjemiske angrep	XA1, XA2, XA3
7 Kjemiske angrep fra husdyrgjødsel	XA4
8 Særlig aggressivt miljø	XSA

For at betongen skal kunne motstå de miljøpåvirkningene den blir utsatt for er det gitt grenseverdier for betongsammensetning i NS-EN 206 (2016, tabell NA.12). Denne tabellen inneholder krav til minste luftinnhold i fersk betong, minste effektive bindemiddelmengde og største masseforhold. Tabellen er gjengitt i vedlegg A.

De ulike settene med grenseverdier kategoriseres i bestandighetsklasser, fra M90 til M40, der tallene betegner masseforholdet mellom vann og de andre komponentene i betongen, som bindemidler og sement. Valg av bestandighetsklasse påvirker utslippet pga. dette masseforholdet, og det er viktig å velge riktig. F.eks. kan M40 med relativt lavt masseforhold velges for både X0 og de strengeste eksponeringsklassene. Ved å bruke denne etter X0-forhold vil betongen ha mye høyere miljømotstand og utslipp enn nødvendig. Hvilken bestandighetsklasse som kan brukes for gitt eksponeringsklasse angis i NS-EN 206 (2016, tabell NA.15). Tabellen er gjengitt under.

Eksponeringsklasse	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
X0	X	X	X	X	X	X
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		X	X	X	X	X
XD1, XS1, XA1, XA2 ^a , XA4 ^b			X	X	X	X
XF2, XF3, XF4				X		X
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3 ^a					X	X
XSA ^a	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstillende kravene til M40.					
^a	Om det i eksponeringsklasse XA2, XA3 eller XSA er mulighet for kontakt med sulfater i konsentrasjoner høyere enn nedre grenseverdi for XA2, skal det i betongspesifikasjonen være angitt at det skal anvendes sulfatbestandig bindemiddel (SuR1 eller SuR2). Se også tabell NA.13.					
^b	For konstruksjoner utsatt for husdyrgjødsel skal det i betongspesifikasjonen være angitt at det skal anvendes minst 4 % silikastøv.					

Figur 3.1: Valg av bestandighetsklasse avhengig av eksponeringsklasse. Fra *Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar* (NS-EN 206, 2016, tabell NA.15)

Masseforholdet i en betong påvirker både trykkfastheten og bestandighetsklassen. Disse to vil dermed ha en korrelasjon, og oppgis gjerne i kjente kombinasjoner. Fasthet og bestandighet er ikke avhengig av hverandre i utgangspunktet, men de er begge avhengig av samme faktor, masseforholdet. Den forventede fastheten etter gitt bestandighetsklasse angis i NS-EN 1992-1-1 (2004, tabell NA.E.1N) og er gjengitt under.

Forutsatt bestandighetsklasse	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
Forventet minste fasthetsklasse	B20	B25	B35	B35	B40	B40

Figur 3.2: Veiledende nedre forventet fasthet for de ulike bestandighetsklassene. Fra *Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar* (NS-EN 1992-1-1, 2004, tabell NA.E.1N)

Masseforholdet i betongen avhenger av bestandighetsklassen. Ved ulike krav til forholdstallet gjelder laveste verdi. Dette kan føre til at betongen får høyere fasthet enn det som er dimensjonerende nødvendig. Ved å ikke korrigere for dette ved å f.eks. endre på betongmengde blir det et overforbruk av betong. Dette er ikke ønskelig fra et økonomisk og miljømessig synspunkt.

Det bør ikke dimensjoneres med lavere fasthet enn bestandighetsklassens minste fasthet. Da vil tverrsnittet dimensjoneres med et større areal og gi hyppigere bruk av trykkarmering enn nødvendig. Dette skyldes at betongprodusentene ikke klarer å produsere betong med fasthet lavere enn angitt i figur 3.2 med den gitte bestandighetsklassen og masseforholdet. F.eks. vil en bestilling på *B25 M45* betong bli produsert som en *B35 M45*, en bestilling på *B40 M90* bli produsert som en *B40 M40* osv.

Fasthetsklasse

Betongens fasthetsegenskaper deles inn i trykkfasthetsklasser angitt med en enkelnotasjon "B" for normal og tungbetong eller "LB" for lettbetong. Tallet angir kravet til sylindrefasthet, f_{ck} , etter 28 døgn, som er den høyeste trykkspenningen betongen kan utsettes for før den går til brudd, og er målt i *MPa*. Den høyeste fastheten lovlig i Norge er B95 (NS-EN 206, 2016). Etter dagens regelverk dimensjoneres det etter 28 døgns fasthet, og all utvikling etter dette anses som en ekstra sikkerhet. I ny Eurokode 2 (prEN 1992-1-1, 2020) åpnes det derimot opp får å dimensjonere etter en 91-døgns fasthet. Er det behov for å kjenne fastheten til betongen før 28 døgn brukes beregningsregler etter NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.2), vist i formel (3.1). $f_{cm}(t)$ er middelverdien av betongtrykkfastheten ved tiden t , korrigert av en faktor $\beta_{cc}(t)$, som er lik 1,0 ved 28 døgn, og beregnes etter NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 3.2):

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8MPa \text{ for } 3 < t < 28 \text{ døgn} \quad (3.1)$$

Ved beregninger benyttes en dimensjonerende trykkfasthet. Denne tar hensyn til ulike faktorer, og er gitt i formel (3.2).

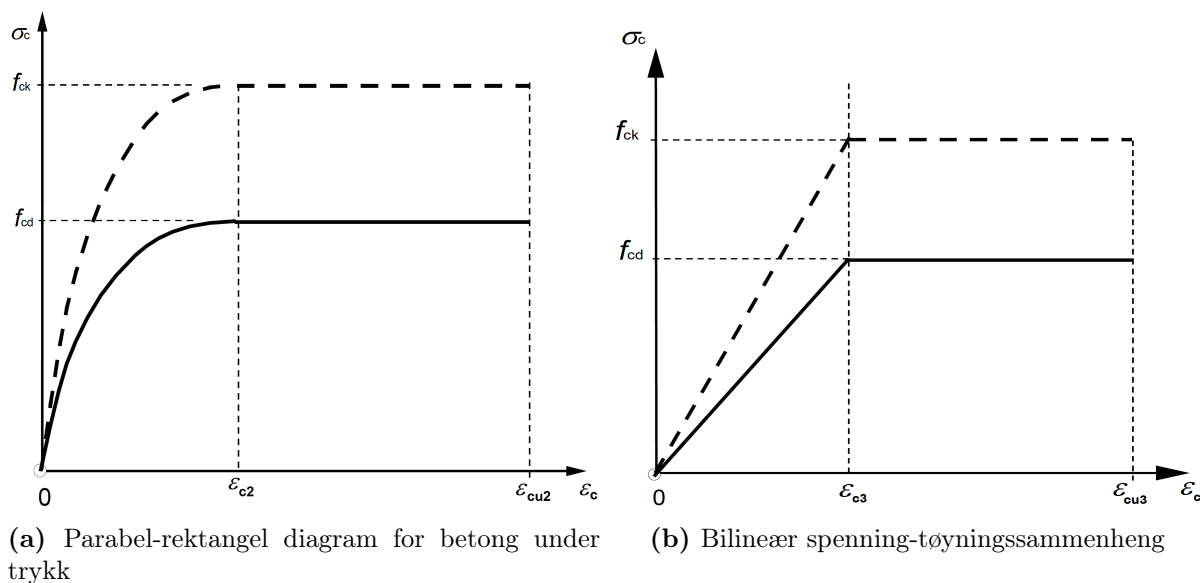
$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} f_{ck} \quad (3.2)$$

der γ_c er materialfaktoren til betong og settes til 1,5 iht. NS-EN 1992-1-1 (2004, nasjonalt tillegg). α_{cc} tar hensyn til påvirkninger fra langtidslast og ugunstige virkninger som en følge av måten lasten påføres, denne settes lik 0,85 i Norge (NS-EN 1992-1-1, 2004).

Ved dimensjonering bestemmes nødvendig fasthet etter gitte lastvirkninger. Etter valgt fasthet fastslås nødvendig masseforhold i betongen. Masseforholdet betegner forholdet mellom vann og bindemiddel i betongen, og kalles ofte v/b -tallet. Betongen får høyere fasthet ved lavere masseforhold. Dette forholdet kan fastsettes fra andre hensyn enn kun nødvendig styrke, som f.eks. miljøhensyn, da mengden sement påvirker klimagassutslippet, som tidligere beskrevet.

I betongelementproduksjon med spennarmering er det viktig at betongen oppnår en relativt høy tidligfasthet raskt, for at betongen skal tåle trykket det påkjennes fra oppspenningen. Hvor lenge et element må herde før det kan tåle overføring av forspenningskraften avhenger av kraften fra spennarmeringen. Betongens trykkspenning, σ_c , på tidspunktet for overføring bør begrenses etter følgende NS-EN 1992-1-1 (2004, 5.10.2.2(5)):

$$\sigma_c \leq 0,7f_{ck}(t) \quad (3.3)$$



Figur 3.3: Figuren viser to alternativer av forenklet spenning-tøyningssammenheng for betong under trykk. Fra *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging* (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.3 og 3.4)

Tøyning ε

Ved dimensjonering kan det velges mellom to ulike spenning-tøyingsforhold som illustrert i figuren under. Valget påvirker størrelsen på den antatte tøyningen i betongen ved maksimal spenning, ε_c som enten er ε_{c2} eller ε_{c3} . Tøyningen ved brudd er den samme for de to ulike spenning-tøyningssammenhengene for betong B12-B50, dvs. $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3}$ (NS-EN 1992-1-1, 2004).

Overdekning

Overdekningen, c_{nom} , til betongen betegner avstanden fra betongoverflaten til nærmeste konstruktive armering. Overdekningen tar hensyn til bl.a. miljøpåvirkninger, krav til heft, dimensjonerende brukstid, armeringsdiameter og utførelsesavvik på byggeplass. Nominell overdekning beregnes etter NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 4.1) og er gjengitt i formel (3.4).

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (3.4)$$

der Δc_{dev} betegner et utleggingsavvik som skal legges til minimumskravet på 10 mm. Minste overdekning, c_{min} , skal sikre sikker overføring av krefter ved hjelp av heft, beskyttelse av stål mot korrosjon og tilfredsstillende brannmotstand. Denne er gitt i NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 4.2) og gjengitt i formel (3.5).

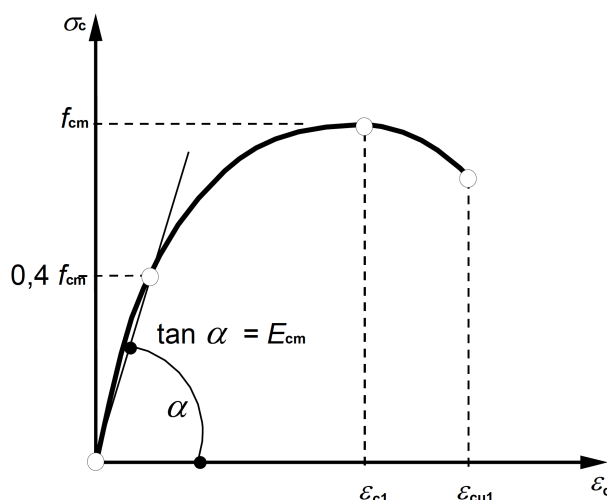
$$c_{min} = \max[c_{min,b}; c_{min,dur}; 10mm] \quad (3.5)$$

der $c_{min,b}$ kommer av kravene til heft og er i følge NS-EN 1992-1-1 (2004, tabell NA.4.2) enten lik stangdiameter for slakkarmering, eller 1,5 ganger diameter til spenntau ved forspenning. $c_{min,dur}$ avhenger av eksponeringsklasse og skal sikre bestandighet til armeringsstål eller spennstål. Verdiene for denne faktoren er gitt i NS-EN 1992-1-1 (2004, tabell 4.4N).

I et klimaperspektiv er det ulike strategier i betongbransjen når det gjelder overdekning. F.eks. vil betongelementforeningen helst ha overdekningen ned til kun 10 mm (Vinje, 2018). De mener at det ofte kan velges en lavere eksponeringsklasse enn den nødvendige, aller helst klasse X0 (NS-EN 1992-1-1, 2004), da dette vil spare mest mulig sement, og dermed redusere utslippene. Som et annet eksempel ønsker Statens vegvesen å øke betongoverdekningen for å øke levetiden til konstruksjonen (Håndbok N400, 2015). I Håndbok N400 (2015, tabell 7.2) er overdekningskravet i brukonstruksjonene normalt 60 mm, men kan også bli så høye som 100 mm. Selv om disse to eksemplene kan illustrere to ulike miljøer og konstruksjoner, viser de to ulike fokus. Enten et ønske om å redusere betongmengden, eller et om å maksimere levetiden til konstruksjonen. Begge gir miljøbidrag på ulike vis, og for å kunne sammenligne dette er det viktig å se på hele levetiden til konstruksjonen og inkludere alle fasene i en LCA, mer om dette i delkapittel 3.4.1, LCA.

Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulen (E-modul) definerer spenning-tøyingsforholdet til et materiale etter Hookes lov, $\sigma = E\varepsilon$. E-modulen for betong er ikke-lineær fordi den er avhengig av E-modulen for betongens bestandeler, som illustrert i figuren under (NS-EN 1992-1-1, 2004).



Figur 3.4: Figuren viser den ikke-lineære sammenhengen mellom spenning og tøyning i konstruksjonsanalyse av betong. Fra *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging* (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.2).

Det betyr at verdien for E-modulen ikke er konstant og kan dermed ikke leses av det lineære stigningstallet på en enkel spenning/tøyingskurve, som den kan for materialer som f.eks. stål. I følge NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.3) er den tilnærmede verdien for E-modulen, E_{cm} , definert som stigningstallet til sekanten mellom $\sigma_c = 0$ og $\sigma_c = 0,4 \cdot f_{cm}$ som varierer avhengig av fasthetsklasse (NS-EN 1992-1-1, 2004), som illustrert i figur 3.4. Denne verdien oppgis i NS-EN 1992-1-1 (2004, tabell 3.1) og gjelder for betong som er eldre enn 28 døgn. For å bestemme E_{cm} før 28 døgn benyttes NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 3.5), gjengitt i formel (3.6), der $f_{cm}(t)$ beregnes etter regler i NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.2).

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (3.6)$$

Det bemerkes at de elastiske deformasjonene i betong avhenger stort av sammensetningen, spesielt tilslaget. Verdiene gitt i NS-EN 1992-1-1 (2004) er for betong med kvartsitt som tilslag. Benyttes et annet tilslag bør den tabellerte verdien enten reduseres eller økes avhengig av type i henhold til NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.3(2)).

Det er bred enighet i litteraturen at verdien E_{cm} er overdimensjonert i forhold til virkeligheten for de fleste fastheter. Konsekvensen av å bruke for høy verdi, som de oppgitt i (NS-EN 1992-1-1, 2004, tabell 3.1), er at estimert nedbøyning blir lavere enn den faktiske, noe som kan ha store økonomiske konsekvenser. Videre forklares hvordan E-modulen beregnes for betong.

Definisjonen av E-modulen i denne masteroppgaven benytter metoden som skal brukes i ny EC2 (prEN 1992-1-1, 2020) og som tidligere ble brukt i Finnesand (1989), som er basert på sekant- E-modulen. (prEN 1992-1-1, 2020, formel 5.1) er gjengitt herunder:

$$E_{cm} = k_E \cdot (f_{cm})^{1/3} \quad (3.7)$$

Der k_E er en empirisk faktor som kan fastsettes ved forsøk. Denne er avhengig av tilslaget brukt i betongen, og i Norge kan en verdi på 9500 brukes som en samlet faktor for de aller fleste betonger (Finnesand, 1989).

Trykksonehøydefaktor α

Ved dimensjonering av betongkonstruksjoner må tøyningen i armeringen, ε_s , ved brudd defineres. Størrelsen på tøyningen varierer med mengde armering A_s og defineres i ulike kategorier. Definisjonen av disse er listet opp under (Sørensen, 2017, sitert side 32).

- $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$: Overarmert tverrsnitt - armeringen flyter ikke før betongen knuses. Armeringsmengden i tverrsnittet er relativt stor [$A_s > A_{s,bal}$ og $\alpha > \alpha_{bal}$].
- $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$: Balansert armert tverrsnitt - flytning i armeringen samtidig med knusing [$A_s = A_{s,bal}$ og $\alpha = \alpha_{bal}$].
- $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$: Underarmert tverrsnitt - armeringen flyter før betongen knuses. Armeringsmengden i tverrsnittet er relativt liten [$A_s < A_{s,bal}$ og $\alpha < \alpha_{bal}$].

Ved beregning av trykksoneens momentkapasitet, M_{Rd} , må trykksonehøydefaktoren, α , bestemmes. Denne er definert i formelen under. Med $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu2} = 0,0035$ og $\varepsilon_{yd} = 0,00217$ gir dette $\alpha_b = 0,617$ (NS-EN 1992-1-1, 2004).

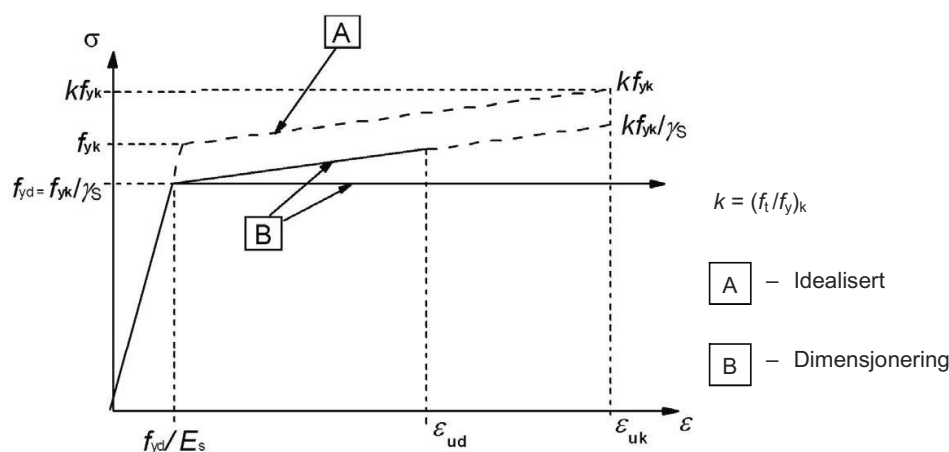
$$\alpha = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s} \Rightarrow \alpha_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (3.8)$$

Ønske om et forvarsel gjennom deformasjoner og synlige riss før brudd oppnås ved å ha en tilstrekkelig seighet i tverrsnittet (Sørensen, 2017). Denne seigheten oppnås ved å velge et underarmert tverrsnitt. En vanlig praksis i Norge er $\varepsilon_s = 2\varepsilon_{yk} = 0,005 > \varepsilon_{yd}$. Dette kalles et normalarmert tverrsnitt, og er underarmert. For betongfastheter mellom B20-B45 er $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$, som gir $\alpha_b = 0,412$. Ut over disse fastene varierer ε_{cu2} .

3.1.2 Slakkarmering

Betongen armeres med stål for å øke motstanden til tverrsnittet. Dette kan gjøres enten ved å strekkarmere eller trykkarmere. Når armeringen legges uten spenn kalles det slakkarmering. Armeringsstålet må ha tilstrekkelig duktilitet, høy fasthet, samt nødvendig heft for at egenskapene til tverrsnittet skal være gode nok. Stålet utformes med en nominell diameter med såkalte ”kammer” på overflaten for å oppnå god heft, og har dermed navnet kamstål.

Spenning-tøyningskurven for armeringsstål forenkles etter NS-EN 1992-1-1 (2004, figur 3.8), denne er gjengitt i figuren under. Figuren viser to alternative forutsetninger for den dimensjonerende tøyningen. Kurve A beskriver den idealiserte spenningen og kurve B beskriver de to alternative og dimensjonerende forutsetningene. I det første alternativet antas en lineær fastning med dimensjonerende grensetøyning $\varepsilon_{ud} = 3,0\%$ og $k = 1,04$, etter NS-EN 1992-1-1 (2004, tabell NA.3.5.(901)). I det andre antas en ideell flytning uten grensetøyning. Dette er den mest vanlige forutsetningen i norsk praksis, men med en grensetøyning $\varepsilon_{ud} = 1,0\%$ (Sørensen, 2017).



Figur 3.5: Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningskurve for armeringsstål. Fra *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging* (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.8).

I Norge er det mest vanlig med kamstål med karakteristisk fasthet $f_{yk} = 500\text{MPa}$. Kamstålet leveres med diameterne 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25 og 32 mm. Armeringsstålet kan komme fra nytt eller resirkulert stål. De fleste EPDene som ligger i arkivet til EPD-Norge inneholder $> 99\%$ resirkulert stål. I tabellen under er det listet de mest brukte materialeegenskapene til slakkarmering.

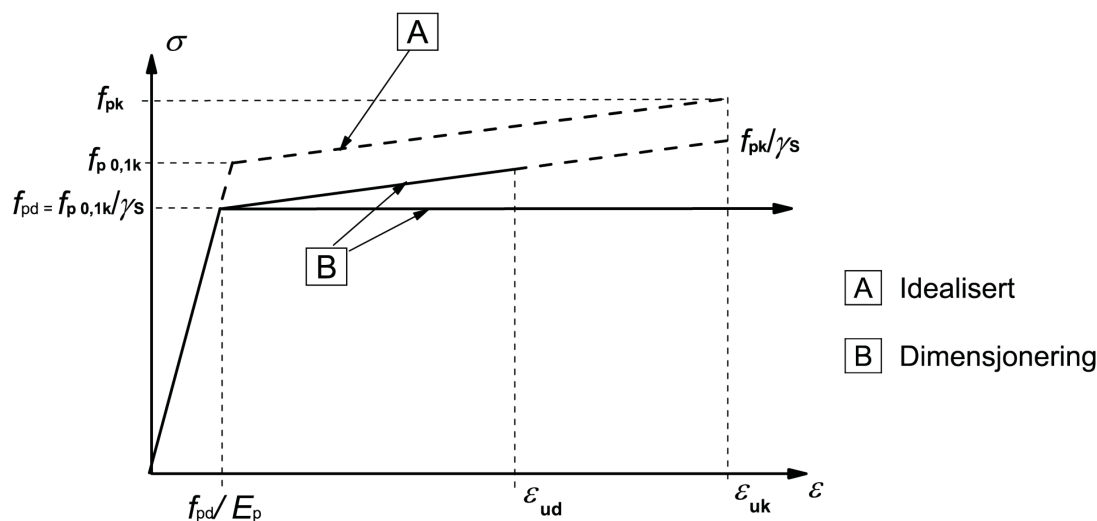
Tabell 3.2: Materialeegenskaper for slakkarmering, B500NC. Fra NS-EN 1992-1-1 (2004).

Egenskap	Symbol	Verdi
Karakteristisk flytegrense [MPa]	f_{yk}	500
Dimensjonerende flytegrense [MPa]	f_{yd}	434
Materialfaktor	γ_s	1,15
Elastisitetsmodul [MPa]	E_s	200 000

3.1.3 Spennarmering

Spennstål har en del ulike egenskaper sammenlignet med slakkarmering. Da det som oftest brukes en betong med høyere fasthet ved spennarmerte konstruksjoner, er det også behov for at stålet har en høy fasthet (Sørensen, 2017). For å oppnå dette benyttes riktig legering og kaldtrekking av stålet. Sammenlignet med slakkarmering har ikke spennarmering en typisk flytgrense, men det oppgis en tilsvarende grense kalt karakteristisk fasthet, for 0,1% inelastisk tøyning, $f_{p0,1k}$.

På lik linje med slakkarmering er det to alternative forutsetninger som kan brukes i dimensjoneringen. Enten fastning etter dimensjonerende flytspenning, f_{pd} , til maks dimensjonerende tøyning, ε_{ud} . Eller etter konstant flytspenning, f_{pd} , uten maks tøyning. Begge alternativer er illustrert i figur 3.6 med bokstav B.



Figur 3.6: Figuren viser idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningskurve for spennstål. Fra *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging* (NS-EN 1992-1-1, 2004, figur 3.10)

Konstant stålspenning er det vanlige valget i Norge (Sørensen, 2017). Ved dimensjonering i bruddgrensetilstand vil bruddkriteriet være $\varepsilon_c = \varepsilon_{ud}$. Langvarig spenn i armeringen vil føre til at spenningen reduseres, dette kalles relaksasjon. Spennstålet kategoriseres etter graden av relaksasjon i tre klasser, mer om dette i delkapittel 3.2.3, *Relaksasjon av spennstål*. Spennstål fremstilles enten i tråder, tau eller kabler med en fasthet mellom $f_{p0,1k} = 1500 - 1800 \text{ MPa}$. I tabellen under er det listet noen ofte brukte materialegenskaper til spennarmering.

Tabell 3.3: Materialegenskaper for spennstål. Fra (NS-EN 1992-1-1, 2004).

Egenskap	Symbol	Verdi
Bruddfasthet [MPa]	f_{pk}	1860
0,1% strekkgrense [MPa]	$f_{p0,1k}$	1636
Dimensjonerende spenning [MPa]	f_{pd}	1422
Materialfaktor	γ_s	1,15
Elastisitetsmodul [MPa]	E_p	195 000

I et klimagassperspektiv er det en distinkt forskjell i utslipp for slakk- og spennarmering. Generelt er utslippene for slakkarmering, *pr. kg.* stål en god del lavere enn for spennarmering. Dette kommer først og fremst av graden av resirkulert stål. Denne er høy for slakkarmering, ofte $> 99\%$, da dette har vært et krav til produsentene en god stund. Dette kravet begynner og å settes til spennarmeringsprodusentene. Generelt brukes mindre mengde spennarmering enn slakkarmering for å oppnå tilstrekkelig kapasitet. Utslippene til en betongkonstruksjon kan dermed bli en god del redusert ved å benytte mest mulig spennarmering, samtidig som det jobbes med å øke resirkuleringsgraden.

3.1.4 Betongelementer

Prefabrikkerte betongelementer produseres på fabrikk og transporteres ut til anleggsplass for montering. Ved å bruke elementer oppnås en rekke fordeler både økonomisk og under prosjekteringsfasen. Enkelte fordeler er som følger (Alexander & Vinje, 2010):

- + Lite avfall og lite energikrevende under produksjon. Gjenbruk av former og overflødig fersk og herdet betong. Varme som genereres benyttes til oppvarming av fabrikklokaler.
- + Rask og effektiv transport og montasje. Kortere tidsperspektiv og mindre støy og støv fra anleggsplass er ønskelig for både arbeidere og publikum.
- + Redusert materialforbruk ved lange spenn, samt store søylefrie områder; enkelt bruksområde.
- + Lite eller ingen behov for vedlikehold av elementene.
- + Raskere prosjektering. Mange utprøvde muligheter gjør det enkelt og raskt å velge trygge og gode løsninger.

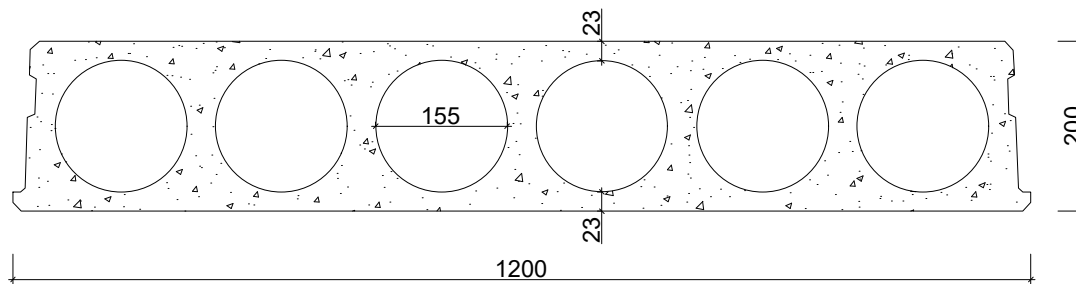
Prosjektering av konstruksjoner med betongelementer er ofte sterkt basert på erfaring, og tidligere brukte løsninger. Skal man prosjektere med hensyn på klimagassutslipp må muligens denne tankegangen revurderes, og det kan lønne seg å bruke mer tid til optimalisering. Det er viktig å ikke la utslippene havne i bakre rekke når et nytt bygg skal reises.

De konstruktive elementene som produseres er bjelker, søyler, veggelementer og hulldekker. Videre i dette delkapittelet vil de aktuelle elementene i denne masteroppgaven beskrives mer inngående.

Forspente hulldekker

Ett av de mest benyttede elementene i dekker og tak er forspente hulldekker. Disse brukes normalt i kontor- og forretningsbygg, boliger, skoler og sykehus (Alexander & Vinje, 2010). Dekkene er særdeles anvendelige da de kan brukes i lange spenn og kan tåle mindre utspåringer. De er enkle å montere og kan redusere behovet for f.eks. himlinger da de kan males direkte. I tillegg har de ofte en gunstig pris, som gjør elementene svært populære.

Som nevnt kan elementene oppnå lange spenn, opptil 19 m, og samtidig ha relativt lave byggehøyder. De vanlige høydene er 200 – 500 mm, noe avhengig av produsent. Elementene betegnes "HDxxx" med høyden som betegnende verdi. Modulbredden er satt til 1200 mm, og et typisk tverrsnitt for HD200 er vist i figur 3.7.



Figur 3.7: Tverrsnitt av hulldekkeelementet HD200. Fra *Hulldekketyper, tverrsnittsdata* (NOBI Voss, 2016, redigert).

Hulldekkeelementer tilfredsstiller det meste innen lyd-, brann og VVS-krav. Flatevekten til elementene er såpass høye at de aller fleste krav til lydisolasjon tilfredstilles, da hulldekkene kan betraktes som en massiv konstruksjon i den sammenheng. Hva gjelder brann vil brannmotstand R60 tilfredstilles i standard utførelse, men høyere enn dette kan også leveres. Kanalene i hulldekkene er ypperlige til å brukes som føringer til elektro- og VVS-installasjoner. I tillegg kan kanalene brukes direkte som ventilasjonskanaler, spesielt om det ønskes å utnytte betongens termiske egenskaper (Alexander & Vinje, 2010).

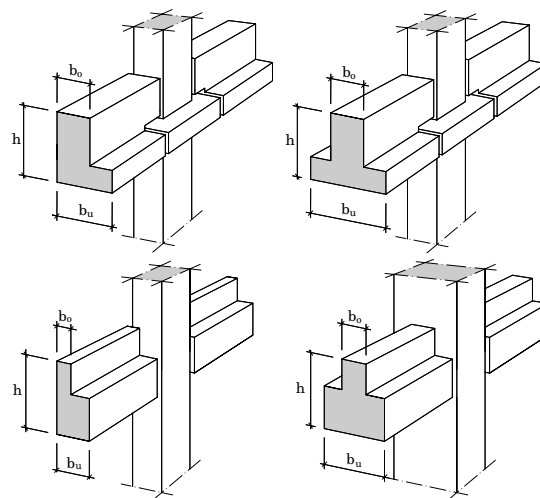
Ved dimensjonering av hulldekkeelementer benyttes ofte standardelementene som finnes tabellert i Alexander & Vinje (2010). Ved å beregne lastvirkninger kan man benytte Alexander & Vinje (2010, figur A 4.2) og bestemme nødvendig dekk høyde. I tillegg til lastvirkning er det også gitt deformasjonskrav det må tas hensyn til. Dekkene vil få en oppbøyning ved oppspenning og bli nedbøyd over tid fra nytte- og egenlast. For at denne nedbøyning ikke skal bli for stor kan det være nødvendig å øke armeringsmengden.

Bjelkeelementer

Felles for bjelkene som beskrives videre er at de leveres enten forspent eller slakkarmert. Er bjelkene fritt opplagte er det enten eller, er de kontinuerlige leveres de ofte med en kombinasjon.

LB- og DLB-bjelker

En LB-bjelke har et tverrsnitt formet som en "L", som illustrert i figur 3.8, sammen med tverrsnittet for en DLB-bjelke. Disse bjelkene bærer dekkeelementer på sin langsgående oppleggshylle og bidrar dermed til å redusere den totale konstruksjonshøyden, enten på én eller to sider. Bjelkene oppfyller brannmotstand R60, men kan også produseres med høyere motstand. Bjelkene kan utformes slik at enten den minste bjelkebredden er lik søylebredden til tilhørende søyler, eller at den største bredden er lik søylebredden. Begge tilfelle-



Figur 3.8: LB- og DLB-bjelker der minste bredde, og største bredde er lik søylebredden. Fra *Betongelementboken Bind A* (Alexander & Vinje, 2010, figur A 4.30 og A 4.32, redigert).

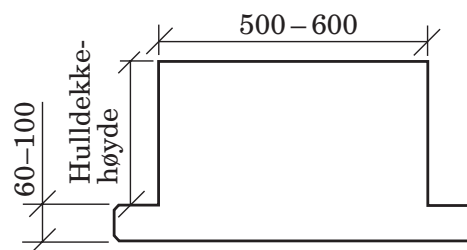
ne er vist i figur 3.8. Bredden på hyllen avhenger av dimensjonene på dekkeelementene. Vanlig hyllebredde er 150 mm , og hyllehøyde lik $150 - 200\text{ mm}$.

Ved dimensjonering av LB- og DLB-bjelker brukes løsninger som beskrevet i Alexander & Vinje (2010, pkt. 4.3.4). Der angis anbefalt maksimalt bruddgrensemoment for hhv. LB- og DLB-bjelker. Her er egenvekten til bjelkene medregnet slik at det kun tas hensyn til brukslasten. Betegnelsen til bjelkene er *LB/DLB* b_o/h , der b_o er minste bjelkebredde og h er bjelkehøyden.

LFB-bjelke

Lavflensbjelker er de mest vanlige elementene å benytte til kontinuerlige bjelker. Prinsippet for en LFB-bjelke er lav høyde i forhold til bredden for å spare byggehøyde. Et typisk tverrsnitt vises i figur 3.9. Høyden fra hyllen til overkant av bjelken er gjerne lik dekket som skal bæres. Denne kan lages så lav som 60 mm . Er derimot høyden under 100 mm må bæreevnen til hyllen bestemmes ved bruk av prøving.

Dimensjonering av LFB-bjelker foregår ved bruk av Alexander & Vinje (2010, figur A 4.35) med samme prinsipp som beskrevet for LB- og DLB-bjelker for hyllehøyde større enn 140 mm . Betegnelsen til bjelken er *LFB* b_o/h_o , der b_o er toppbredden, og h_o er høyden fra overkant av hyllen til bjelketoppen.



Figur 3.9: Tverrsnitt av en LFB-bjelke. Fra *Betongelementboken Bind A* (Alexander & Vinje, 2010, tabell A 2.2).

Produksjon i fabrikk

Elementene armeres og støpes i former på fabrikkens under stabile forhold. Ved produksjon av betongelementer er en høy grad av standardisering ønskelig for å spare tid og kostnader. Formene lages enten av stål eller tre, avhengig av om formen skal brukes flere ganger.

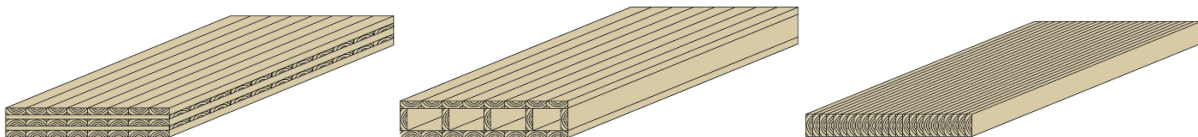
Betongelementprodusenter har gjerne egne, automatiserte blandeverk for å få riktig resept hver gang. Disse kontrollerer konsistens og sammensetning. Under støpet er det ofte koblet vibratorer direkte til formen for å oppnå korrekt vibrasjon. Etter støping blir overflaten behandlet. For innvendig overflate er brettskuring og stålglatting det vanligste (Ekeløf et al., 1995).

Prosessen med å støpe hulldekker foregår med rørformede utsparinger i hele elementets lengde. Under støp benyttes spesielle ekstrudermaskinger som presser ut betong med høy viskositet i riktig dimensjon. Spennarmering blir strukket i formbunner av stål i oppmot 100 m . Etter herding blir elementene kappet i ønsket lengde med sag (Ekeløf et al., 1995).

3.1.5 Massivtre

Massivtre er et konstruksjonmateriale som benyttes mer og mer i dagens bygging. Dette er det flere grunner til, bl.a. miljøegenskapene til materialet, som beskrives nærmere senere i kapitlet. Massivtre produseres i elementer og er brukt i bolighus, næringsbygg og skoler (Utvær et al., 2019). Det er vanlig at massivtrelementene produseres på fabrikk og deles inn i følgende kategorier (Trefokus, u.å.):

- **Krysslagte elementer:** Lameller lagt i kryss i forhold til hverandre i flere sjikt festet med lim eller tredybler. Vanligvis i 45° eller 90° i forhold til hverandre.
- **Hulromselementer:** Elementer uten massiv kjerne, denne blir gjerne fylt med isolasjon.
- **Kantstilte elementer:** Stående lameller festet med lim, skruer, tredybler eller stålstag.



Figur 3.10: Ulike massivtrelementer. Hhv. krysslagt massivtrelement, hulromelement og kantstilt element. Fra *Håndbok - bygge med massivtrelementer, hefte 1, Generelt* (Aasheim et al., 2006a, Side 7, redigert).

Elementene brukes som bærende elementer i gulv, vegger og tak. Hele bæresystemet i et bygg kan bygges med elementer eller kombineres med andre materialer og konstruksjonstyper (Aasheim et al., 2006a). De gir fleksibilitet i planløsning ved at de kan leveres i de aller fleste former og fasonger.

Branntmotstand

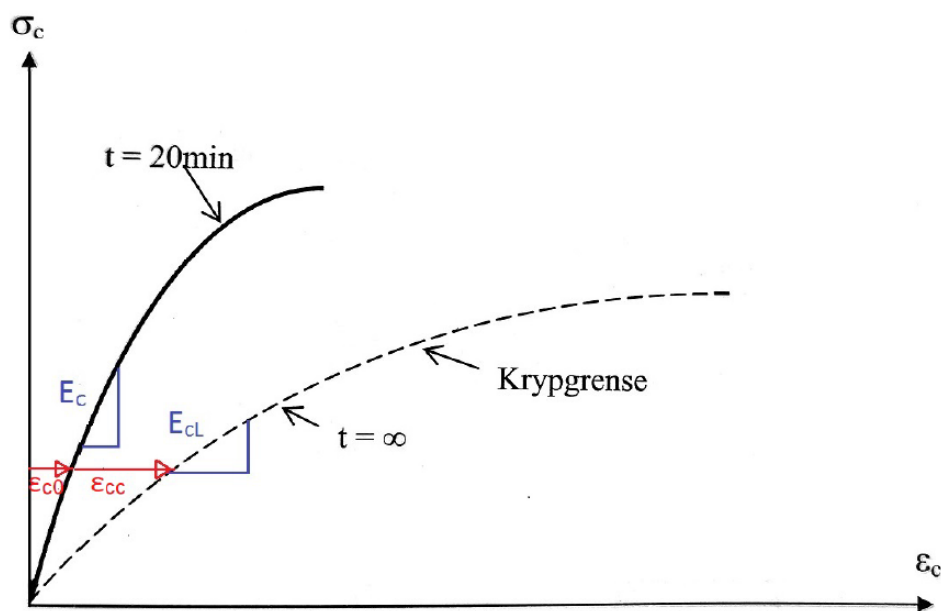
Under en brann vil det ytre laget av massivtre forkulle, mens materialet innenfor vil beholde sin bæreevne innen det selv forkuller. Forkullingsraten er konstant og massivtre vil brenne forutsigbart (Utvær et al., 2019). For å oppnå høyest mulig brannmotstand er det viktig at elementene er helt tette slik at ikke flammer og gasser vil trenge gjennom. Limtre, hellimte, krysslagte elementer, vil i den forbindelse ha de beste egenskapene. Har elementene åpne fuger vil de yte dårligere motstand, og det er viktig at også fugene som brukes er helt tette (Aasheim et al., 2006b).

3.2 Tidsavhengige effekter og -tap

Konstruksjonsdeler med spennarmering vil oppleve endringer over tid som påvirker betongens egenskaper. Disse innebærer effekter som kryp, svinn og relaksasjon. I tillegg kommer tap i oppspenningskraften til spennarmeringen. Mer om spennkraft i kapittel 3.6.1, *Spennkrefter*. Alle disse effektene virker inn på spennkreftene og må medregnes i beregninger som omfatter langtidsvirkninger. Videre i dette kapitlet vil de ulike effektene og spenntapene forklares nærmere.

3.2.1 Kryp

Når betong utsettes for konstant trykk vil betongen fortsette å trykkes sammen over tid, utover den momentane sammentrykningen. Denne effekten kalles kryp og er illustrert i figur 3.11.



Figur 3.11: Figuren viser langtidseffekten av kryp på betongens spenning og tøyning. Fra *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017, redigert, figur 3.4 del 1).

Som figuren over viser oppstår det en tilleggstøyning pga kryp, ε_{cc} . Denne tøyningen varierer med spenningsnivået og tiden spenningen virker over, og kan uttrykkes ved (Sørensen, 2017, formel 3.5, del 1):

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \varepsilon_{c0} = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (3.9)$$

Kryptøyningen gir en redusert langtidsemodul, E_{cL} , som illustrert i figuren over. Denne er definert som:

$$E_{cL} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3.10)$$

der E_{cm} er verdien beregnet for gjeldende fasthet, som vist i delkapittel 3.1.1, *Elastisitetmodul*. Kryptallet til betongen, $\varphi(t, t_0)$, uttrykker størrelsen på kryptøyningen. Denne faktoren beregnes etter NS-EN 1992-1-1 (2004, tillegg B) og er avhengig av følgende faktorer:

- Omgivelsenes relative fuktighet.
- Omgivelsenes temperatur.
- Bygningsdelenes dimensjoner.
- Betongens sammensetning.
- Tidspunkt for lastpåføring.
- Belastningens varighet og størrelse.

Forskjellige verdier av E_{cL} kan beregnes for ulike lasttilfeller med laster som virker over lang tid. Eksempelvis spennkrefter, egenlast og langtidsandeler av nyttelast. Ved mange laster som påføres ved ulike tidspunkt vil spenningsberegninger bli tidkrevende, da det må beregnes bidrag fra hvert tilfelle og addere disse. Det benyttes derfor en midlere E-modul, E_{middel} , i praktiske beregninger. Alle laster inkluderes, og deres tilhørende E-moduler. E_{cL} bergnes for langtidslastene, mens for korttidslastene benyttes E_{cm} .

$$\frac{\sum |M_i|}{E_{middel}} = \frac{|M_{L1}|}{E_{cL1}} + \frac{|M_{L2}|}{E_{cL2}} + \dots + \frac{|M_k|}{E_{cm}} \quad (3.11)$$

Spennarmeringen får krafttap fra kryptøyningene. Størrelsen bestemmes ved å betrakte korttids- og langtidstøyninger i betongen. Da armeringstøyningene må være lik tøyningene i betongen bestemmes spenningsstap for spennarmeringen fra disse. Differansen mellom korttids- og langtidstøyningene representerer spenningsfallet i spennkraften, og uttrykkes gjerne i en prosentandel reduksjon.

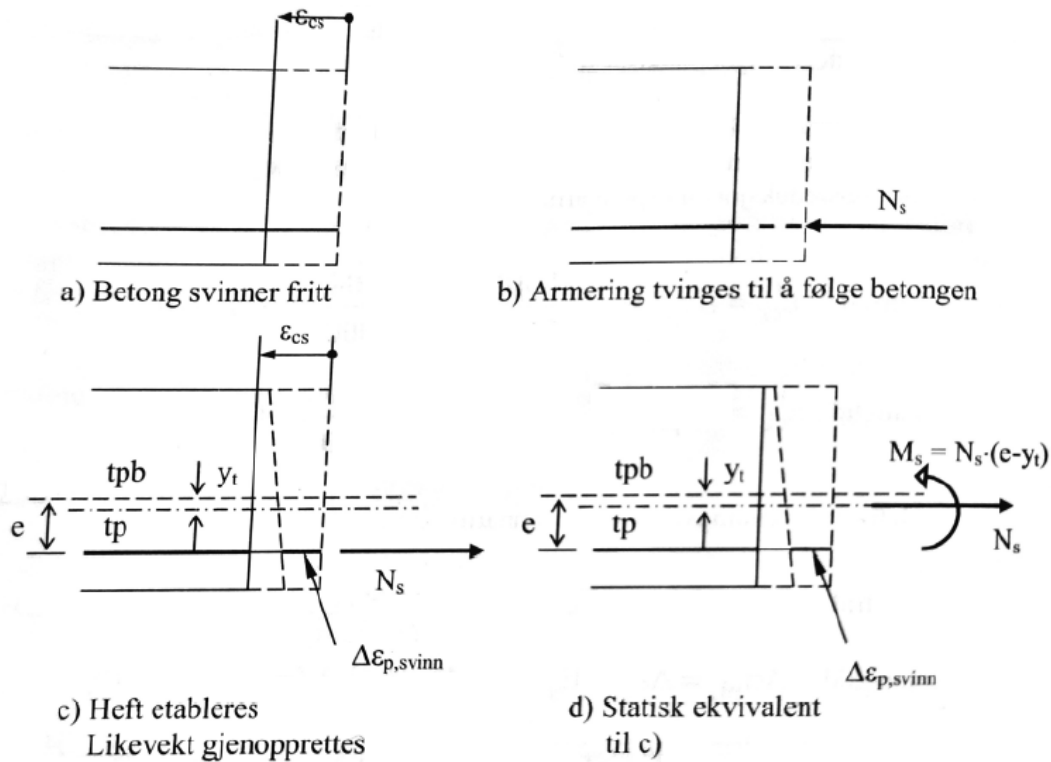
3.2.2 Svinn

Over tid vil betongen tørke ut, og betongen vil krympe. Denne effekten kalles svinn. I motsetning til kryp er ikke svinn avhengig av last. Den totale svinntøyningen, ε_{cs} , er sammensatt av to bidrag. Uttørkingssvinn, ε_{cd} , og autogent svinn, ε_{ca} , også kalt selvut-tørkingssvinn.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (3.12)$$

Bidragene beregnes etter NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.4 og tillegg B). Metoden går ut på å beregne nominell tøyning som skaleres ned med en verdi, avhengig av betongens alder på sjekktidspunktet.

Svinntøyningene vil ha en effekt på spennarmeringen, da den tvinges til å følge betongens tøyninger. Dette vil skape et moment i betongen fra den motsatt rettede kraften fra armeringen, som vist i figuren under.



Figur 3.12: Virkning av svinntøyning på betong og spennarmering. De oppståtte tverrsnittskrefter i d). Fra *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017, figur 6.4 del 2)

Momentet beregnes ut fra likevektsbetraktning (Sørensen, 2017, formel 6.15 del 2):

$$N_s = \varepsilon_{cs} \cdot E_p \cdot A_p \quad (3.13)$$

$$M_s = N_s(e - y_t) \quad (3.14)$$

Dette momentet gir et nedbøyingsbidrag i en deformasjonsberegning, samt en spenningsreduksjon i spennarmeringen. For å beregne dette tapet må først svinntøyningene til et tverrsnitt som svinner fritt beregnes. Deretter trekkes det fra tøyningene motkraften og momentet gir. Dette gir en negativ spenningsendring i spennarmeringen og kan beregnes ved bruk av (Sørensen, 2017, formler 6.16 og 6.17 del 2):

$$\Delta\varepsilon_{p,svinn} = \varepsilon_{cs} + \frac{N_s}{E_{middel} \cdot A_t} + \frac{N_s \cdot (e - y_t)^2}{E_{middel} \cdot I_t} \quad (3.15)$$

$$\Delta\sigma_{p,svinn} = \Delta\varepsilon_{p,svinn} \cdot E_p \quad (3.16)$$

Hvor A_t , y_t , I_t er parametre for det transformerte, armerte tverrsnittet. Dette forklares nærmere i kapittel 4.2.2, *Deformasjonskontroll*.

3.2.3 Relaksasjon av spennstål

Relaksasjon er spenningsfallet som vil oppstå når stålet utsettes for en konstant tøyning over tid. Spennstål utsettes for store strekktøyninger i hele konstruksjonens levetid. For å beregne spenningstapet defineres tre relaksasjonsklasser i NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt 3.3.2):

- Klasse 1: Tråd eller tau, *vanlig relaksasjon*.
- Klasse 2: Tråd eller tau, *lav relaksasjon*.
- Klasse 3: Varmvalsete og bearbejdede stenger.

Vanlig relaksasjonsklasse for førroppsente betongelementer er klasse 2. Fra NS-EN 1992-1-1 (2004, formler 3.28, 3.29 og 3.30) beregnes relaksasjonstapet:

$$\text{Klasse 1: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{p0}} = 5,39 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{6,7\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (3.17)$$

$$\text{Klasse 2: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{p0}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (3.18)$$

$$\text{Klasse 3: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{p0}} = 1,98 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{8\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (3.19)$$

der

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pr} &= \text{Absoluttverdi av relaksasjonstapet} \\ \sigma_{p0} &= \text{Initiell forspenning} \\ t &= \text{tid etter oppspenning} \\ \mu &= \sigma_{p0}/f_{pk} \end{aligned}$$

ρ_{1000} tilsvarer det prosentvise relaksasjonstapet 1000 timer etter oppspenning med en middeltemperatur på 20°C . Verdien avhenger av relaksasjonsklasse (NS-EN 1992-1-1, 2004, pkt. 3.3.2(6)):

- Klasse 1: $\rho_{1000} = 8\%$
- Klasse 2: $\rho_{1000} = 2,5\%$
- Klasse 3: $\rho_{1000} = 4\%$

Til slutt må spenningsfallet multipliseres med en faktor på 0,8. Dette kommer av spenningsfallet i spennstålet som vil skape en ubalanse i indre krefter. Den reelle kraftreduksjonen kan bestemmes ved likevektsbetraktning av tverrsnittet. Dette kan i følge NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 5.10.6(1)), forenkles ved å redusere tapet med en faktor 0,8.

3.2.4 Tap av spennkraft

Spennarmeringen vil miste spennkraft under brukstiden. Enten umiddelbart etter oppspenning, eller etter langtidseffekter. De umiddelbare tapene, ΔP_i , er:

- Låsetap ved forankringer, ΔP_{sl}
- Tap pga. temperaturendringer under herdefasen, ΔP_{θ}
- Tap som skyldes korttidsrelaksasjon, $\Delta P_{rel,k}$
- Tap som skyldes umiddelbar deformasjon av betongen, ΔP_{def}

Tidsavhengige tap, ΔP_{c+s+r} , inkluderer:

- Tap fra relaksasjon i spennstål, ΔP_{rel}
- Tap fra svinn i betongen, ΔP_{svinn}
- Tap fra kryp i betongen, ΔP_{kryp}

De tidsavhengige tapene er allerede beskrevet. Vurderte umiddelbare tap i denne masteroppgaven er låsetap, resten neglisjeres. Mer om spennkraft i 3.6.1, *Spennkrefter*.

Låsetap

Låsetap kommer fra glidning av spennstålet under forankring, gjerne noen millimeter, når kraften overføres fra jekken til forankringen. Det kan oppstå deformasjoner ved selve forankringen det også skal tas hensyn til.

3.3 Lavkarbonbetong

Da betong er en stor bidragsyter til det totale klimagassutslippet i verden i dag, utvikles det stadig nye betongresepter for å redusere dette. *Lavkarbonbetong* er konstruksjonsbetong som produseres etter reglene i NS-EN 206 (2016) og kategoriseres etter begrensninger av klimagassutslipp definert i publikasjonen fra Norsk Betongforening, NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Denne er utarbeidet for det norske marked for å forenkle bruken av denne typen betong. Lavkarbonbetong deles inn i følgende klasser:

- **Karbonklasse B:** Oppnås med ordinære resepttekniske tiltak.
- **Karbonklasse A:** Strengere enn B. Krever som regel bruk av spesielle resepttekniske tiltak.
- **Karbonklasse Pluss og Ekstrem:** De strengeste kravene. Krever bruk av spesielle bindemiddelsammensetninger som ikke kan forventes å være allment tilgjengelige.

Grenseverdien av $kg CO_2 - ekv. pr. m^3$ for de ulike klassene er hentet fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1) og gjengis i tabellen under. Verdiene er nylig blitt oppdatert med skjerpede krav om utslipp. Det er viktig å alltid bruke siste publikasjon for å nå de krav som er satt i et prosjekt. Verdiene angitt er beregnet for $1 m^3$ betong og gjelder fra råvareuttak til betongen forlater fabrikkport, tilsvarende fasene *A1-A3: vugge-til-port* i en LCA.

Fasthetsklasse og lavkarbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
	<i>Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO₂-ekv.pr m³ betong]</i>						
Bransjereferanse	240	260	280	330	360	370	380
Lavkarbon B	190	210	230	280	290	300	310
Lavkarbon A	170	180	200	210	220	230	240
Lavkarbon Pluss	-	-	150	160	170	180	190
Lavkarbon Ekstrem	-	-	110	120	130	140	150

Figur 3.13: Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO₂ – ekv. pr. m³ betong] for ulike lavkarbonklasser angitt etter fasthet. Fra *Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong* (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1, redigert).

Sammenhengen mellom fasthetsklasser, bestandighetsklasser og karbonklasser må hensyntas. Bestandighetsklassen bestemmes ut i fra de lokale eksponeringsforholdene, og fasthetsklasse velges fritt etter forutsetninger om bl.a. lastpåvirkning, spennvidder, tverrsnittsdimensjoner osv. Det er derimot viktig å ikke se seg blind på tabellen over. Valg av fasthetsklasse kan ha like stor betydning som valg av karbonklasse. Ved å gå opp i fasthet kan man f.eks. velge en strengere karbonklasse og bruke mindre betong, og dermed spare utslipp.

3.3.1 Sementinnhold

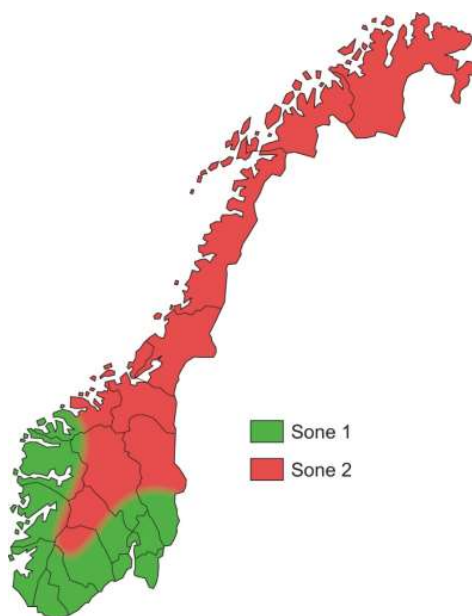
Det som skiller lavkarbonbetong fra vanlig betong er tre ting; *mindre sementmengde, en optimalisering av betongsammensetningen og bruken av sementerstatningsmaterialer* (Norsk Betongforening, 2019). Det antas at sement står for mer enn 90% av det samlede klimaavtrykket til betong (Norsk Betongforening, 2019). For å redusere utslippene tilsettes såkalte pozzolane materialer, som erstatter deler av den typiske Portlandsementen. Disse har lik effekt som sement i en betong, og reagerer som et bindemiddel. De fungerer derimot kun som bindemidler når de kombineres med sement. Det må derfor alltid være noe klassisk sement med i blandingen (Sellevoid, 2008). Tilsetningsmaterialene er restprodukter fra industrien. Regelen om at CO₂-utslipp skal tilordnes hovedproduktet gjør at restprodukter fra industrien ikke regnes med i sementens karbonregnskap (NS-EN 15804, 2012). Typiske restprodukter fra industrien som brukes som tilsetningsmaterialer er:

- **Flygeaske (FA):** restprodukt fra kullfyrte kraftverk.
- **Silikastøv (SF):** kondensert røykgass fra produksjon av ferrosilisium- eller silisiummetall.
- **Slagg:** masovnslagg fra råjernproduksjon.

Materialene kan tilsettes sementen i ulike fraksjoner for å oppnå de ønskede kvalitetene. I normal konstruksjonsbetong gjelder følgende veiledninger for andel tilsetningsmateriale av total bindemiddelmengde (Sellevoid, 2008):

- 1) FA: 20 – 35%
- 2) SF: opptil 10%
- 3) Slagg: 30 – 65%

Tilgjengeligheten av disse materialene er utslagsgivende når det kommer til hvilken karbonklasse som kan benyttes, da de strengeste karbonklassene krever spesielle sammensetninger av bindemidler. Tilgangen på disse varierer rundt om i Norge. NB37 (Norsk Betongforening, 2019) deler landet inn i to soner, der sone 1 er egnet for å produsere de strengeste karbonklassene, mens det i sone 2 er vanskeligere å få produsert lavkarbonbetong. Dette skyldes hovedsaklig tilgjengelighet og transportavstander. De to ulike sonene er illustrert i figuren til høyre.



Figur 3.14: Regional tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Fra *Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong* (Norsk Betongforening, 2019, figur 4)

3.3.2 k-verdi metoden

NS-EN 206 (2016) stiller krav til hvor mye av den klassiske sementen som kan erstattes av alternative bindemidler. Det stilles også krav til masseforholdet avhengig av hvilken bestandighetsklasse som benyttes, som tidligere beskrevet i delkapittel 3.1.1, *Betong*. Ved bruk av tilsetningsmaterialer benyttes en virkningsfaktor k , som reflekterer materialets effekt på betongens bestandighetsegenskaper (Norsk Betongforening, 2019). Masseforholdet, m , bestemmes ved følgende formel:

$$m = \frac{v}{c + k \cdot p} \quad (3.20)$$

Der v er vanninnhold, c er sementinnhold og p er innholdet av tilsetningsmaterialer. Dette konseptet ble innført da det ble mer vanlig å betegne betongen etter masseforhold, i stedet for 28 dagers fasthet (Sellevold, 2008). De ulike tilsetningsmaterialene har ulike k -verdier. Disse kan være forskjellige for ulike bestandighetsklasser, og oppgis dermed med stor usikkerhet. De mest vanlige verdiene for k er gitt i tabellen under.

Tabell 3.4: Ulike k -verdier for tilsetningsmaterialene flygeaske og silikastøv etter bestandighetsklasser (NS-EN 206, 2016).

	M40	M45	M60	M90
FA	0.7	0.7	0.4	0.7
SF	2	2	1	1

3.4 Klimaregnskap

I følge FN er klimaendringene det største problemet verden må løse (FN-sambandet, 2019). Disse endringene skjer fordi utslippet av drivhusgasser skjer i større omfang en tidligere. Som en konsekvens av de store utslippene stiger temperaturen på kloden. Karbondioksid, CO_2 , er et eksempel på en slik drivhusgass, også kalt klimagass (FN-sambandet, 2019).

For å redusere klimagassutslippet har FNs klimapanel kommet med ulike tiltak. Ett av disse er å redusere utslippene fra energiproduksjonen, som er den aller største kilden til klimagassutslipp. Produksjonen av sement har et stort behov for energi i spaltingen av kalkstein. Reduseringen innebærer å gå over til mer miljøvennlige energikilder som vann-, vind- og solkraft. I tillegg foreslår FNs Klimapanel at ”Byene må bygges på en klimavennlig måte” (FN-sambandet, 2019, sitat). Dette innebærer at bygg må bygges med lave klimagassutslipp og at bygget i seg selv ikke er avhenging av fossile energikilder. En reduksjon av betongvolum og armeringsandel i bygninger vil redusere klimagassutslippet. Bedre utnyttelse av betong i tverrsnittet, som hulldekkeelementer, og utnyttelse av betongens termiske egenskaper er eksempler på slike tiltak.

Et annet tiltak er at ”Menneskers forbruk og livsstil må være bærekraftig” (FN-sambandet, 2019, sitat). Dette kan, eksempelvis, være å fokusere på god kvalitet og bærekraftig produksjon ved produktvalg. Betong som byggemateriale har god kvalitet og beholder egenskaper over tid ved riktig bruk, i tillegg til å ha et stort potensiale for mer klimavennlig produksjon og -bruk.

I dette delkapittelet fokuseres det på hvordan byggebransjen kan være med på å redusere utslippene av klimagasser. Dette gjøres ved å bruke metoden Livssyklusanalyse (LCA), som gir en oversikt over utslippskilder. Ved å bruke LCAer blir tiltak og valg som vurderes mest mulig effektive. For at valgene til produsenter, entreprenører og rådgivere skal bli enklere utarbeides det korte og konsise miljødeklarasjoner (EPDer). Disse oppsummerer en LCA for et spesifikt produkt- eller funksjonsvalg.

3.4.1 LCA

Videre forklares det hvordan LCA ble en del av klimagassregnskapet til bygg, hvilke regelverk som finnes og brukes i prosessen, og hvordan en analyse er bygget opp.

Bakgrunn/historie

På 70- og 80-tallet eksisterte det ulike forskrifter og lover som kontrollerte utslippet fra enkeltkilder. Disse forskriftene fokuserte kun på enkelte faser av produktens levetid som produksjon, bruk eller avfall i tillegg til enkelte kjemikalier og nivåer. Forskriftene fokuserte først og fremst på sluttresultatet og hadde derfor liten effekt på den totale miljøpåvirkningen (Klöpffer, 2014). Det ble derfor viktigere å se på inngangsmaterialene og hvilken effekt de hadde på utslippene. Denne tankegangen, som oppsto på 80-tallet, ble starten på en forbedret miljøforvaltning av produkter og tjenester. Selv om dette kunne bety økte kostnader for fabrikkere fant organisasjoner ut at de faktisk kunne spare penger på å redusere utslippene. 3M gikk i førersetet og utviklet, som et av de første selskapene, et såkalt *Pollution Prevention program (3 Per)*. Siden 1980-tallet har dette programmet spart 3M for nesten én milliard amerikanske dollar (Klöpffer, 2014).

Samtidig som produsentene fokuserte på utslippet i sine produksjonsanlegg, ble samfunnet mer opptatt av utslipp også etter at produktene var ferdig produsert. Produktene

kan forbruke energi fra det lokale kullkraftverket og må gjennom avfallsbehandling etter endt levetid (Klöpffer, 2014). For å kunne ta hensyn til alle konsekvensene et produkt har, fra råvare til f.eks. forbrenning, meldte behovet seg for et verktøy som kunne gi en komplett oversikt. På dette tidspunktet viste det seg at Life cycle assessment, Livssyklus-analyse på norsk, var et godt verktøy. På 90-tallet var det *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, *International Organization for Standardization (ISO)* og *United Nations Environment Programme (UNEP)* som sto i ledetog for utviklingen og samorganiseringen av LCA som rammeverk, verktøy og begrep (Klöpffer, 2014).

Standarder og rammeverk

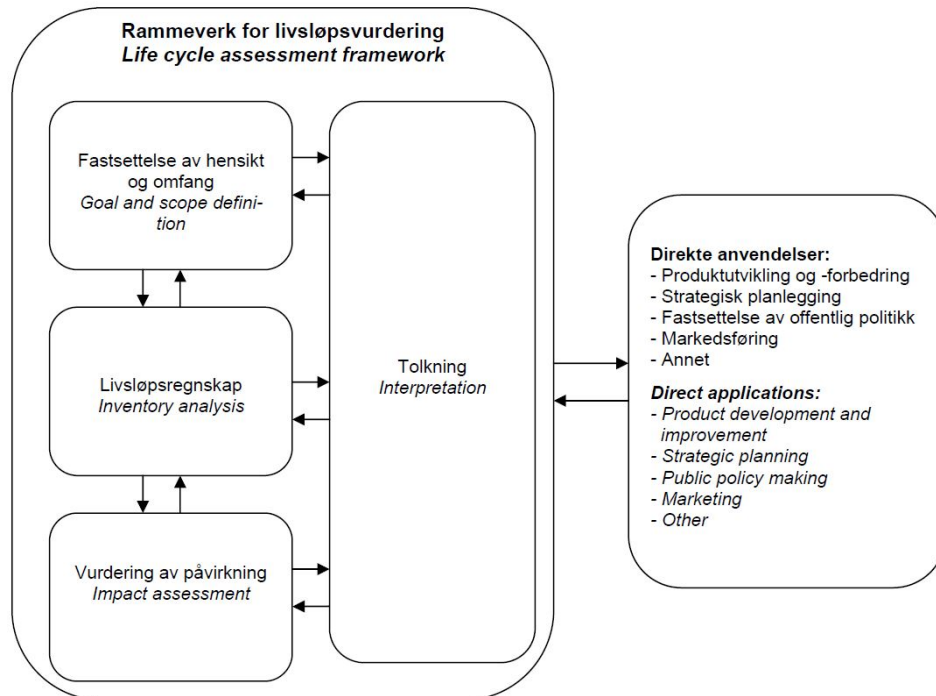
Samtidig som SETAC, ISO og UNEP arbeidet med en felles serie med standarder på 90-tallet tok Nordisk råd initiativ til et prosjekt omhandlende LCA. Dette prosjektet skulle resultere i "Code of Practice" for LCA med de nordiske landene som målgruppe, og "Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment" (Lindfors et al., 1995) ble utgitt for første gang i 1995.

Da SETAC m.fl. var ferdig med sitt arbeid ble det i 2006 utgitt en serie standarder; NS-EN ISO 14040 (2006) og NS-EN ISO 14044 (2006) som er gyldige den dag i dag. Standardene er kjernestandardene for hele LCA-området. Disse standardene overtok for Nordic Guidelines og andre nasjonale standarder utviklet før den tid (Klöpffer, 2014). Standarden 14040 er en veiledningstandard og et rammeverk, mens 14044 inneholder alle de tekniske kravene.

Etter at kjernestandardene ble utgitt har det blitt utarbeidet såkalte "spinn-off"-standarder. En av disse er NS-EN 14025 (2010) som stammer fra standardserien ISO 14020, en serie miljømerkingstandarder. Et eksempel på Type I miljømerking er det norske Svanemerket og har forbrukere som målgruppe uten tredjepartsverifikasjon. ISO 14025 omhandler miljømerking type III der forhåndsbestemte parametere har rot i ISO 14040. ISO 14025 gir en standard utarbeidelse for disse miljødeklarasjonene, EPDer, som er en minirapport av en LCA. Mer om EPD senere i dette delkapittelet.

Krav til en LCA

En LCA har en struktur med fire trinn som illustrert i figuren under. Disse er definert i NS-EN ISO 14040 (2006).



Figur 3.15: Sammenhengen mellom trinnene i en LCA. Fra *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipp og rammeverk* (NS-EN ISO 14040, 2006, figur 1).

De fire trinnene består av:

1. *Fastsettelse av hensikt og omfang:* Som enhver annen studie må det på forhånd fastslås hensikt og omfang før gjennomføring. Her fremgår informasjon om hvorfor studien gjennomføres og til hvilken hensikt. Det kan variere i stor grad hvilke sett med retningslinjer som legges til grunn for den videre LCAen. Disse kriteriene fremkommer i spinn-off standardene. Eksempelvis NS-EN 15804 (2012) som inneholder *Product Category Rules (PCR)* for produktkategorien byggevarer.
2. *Livsløpsregnskap (LCI)* er den mest vitenskapelige delen av en LCA. Her er det viktig å kjenne til hele produktets livsløp. Kunnskap om hvilke stadier og prosesser som produktet skal gjennom må frembringes. De grunnleggende kravene for en god LCI er sitert fra Klöpffer (2014) og oversatt fra engelsk:
 - Systemdefinisjoner, inkludert en grafisk representasjon av produkttrærne.
 - Definisjon av den funksjonelle enhet og referansestrømmen.
 - Datainnsamling (input og output).
 - Implementering av dataene i systemet, anvendelse av forhåndsbestemte grensekriterier og tildelingsregler, hvis relevant.
 - Utføre beregningene.

3. *Livsløpseffektvurdering (LCIA)* inneholder hvilken virkning produktet har på miljøet. Disse påvirkningene kategoriseres i såkalte effektkategorier. Eksempler på slike kategorier er *Global Warming Potential (GWP)*, *Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer (ODP)*, vannforbruk etc.
4. *Tolkning*: Denne delen inneholder eventuelle kommentarer til analysen, om det er gjort noen spesielle valg eller antakelser som kan ha innvirkning på resultatet.

Funksjonell- og deklarerert enhet

Et av kravene nevnt over, er definering av funksjonell enhet. Enheten brukes ved innsamling av inngang- og utgangsdata når varen eller tjenesten analyseres i en LCA (Klöppfer, 2014). Enheten definerer de funksjonene som varen eller tjenesten har. Et eksempel på en funksjonell enhet er ”Produksjon av en sofaløsning gitt og vedlikeholdt i 15 år” (Sætre, 2019, sitat). Ulike materialer og materialsammensetninger kan ha lik funksjon. Den funksjonelle enheten gjør at sammenligning mellom ulike LCAer kan gå på tvers av materialene som er brukt. Enheten skal inneholde referanselevetiden til produktet, *Reference Service Life (RSL)* (NS-EN ISO 14040, 2006). Under samme punkt må også referansestrømmen defineres, dette er ”mengden produkter som trengs for å oppfylle funksjonen” (NS-EN ISO 14040, 2006, sitat). Ulike funksjonelle enheter vil gi ulike resultater for samme produkt, det kan derfor være enklere å bruke *deklarerert enhet*.

Er det flere ulike bruksområder for varen eller ikke mulig å fastslå funksjonen til varen, er det deklarerert enhet som skal brukes (NS-EN 15804, 2012). Et eksempel på en deklarerert enhet er ”1 m³ B20 M90 D22, 205000, Vibrerbar betong” (Marstrander, 2014, sitat). Hvis ikke produktet er definert i en bygningsmessig sammenheng ennå, er deklarerert enhet et godt alternativ til den funksjonelle enheten. Selv om bruksområdet kan variere stort, kan EPDen til enheten dekke alle modulene i livsløpet. Da må den referere til typiske bruksområder for produktet og RSL. Det stilles også krav til hvilke deklarererte enheter som er tillatt å bruke for byggevarer, og disse skal samkjøre med enhetene som allerede brukes i bransjen. Disse er: én stk, *kg*, *m*, *m²* og *m³* (NS-EN 15804, 2012). Deklarerert enhet brukes ofte for betong, da betong kan ha mange ulike funksjoner etter herding.

Livsløpsstadier

Et av LCA-kravene er å definere grensekriteriene og systemgrensene. NS-EN ISO 14040 (2006) setter krav til hva som bør hensyntas når systemgrensene skal defineres. Dette være seg ”anskaffelse av råmaterialer”, ”distribusjon” osv. I tillegg er det krav om at slike systemgrenser omfattes i EPDer. Disse er tydelig definert i en PCR for byggevarer, (NS-EN 15804, 2012).

Livsløpet til en enhet deles inn i ulike stadier. Fra produksjonsstadiet, til stadiet etter systemets grenser. Innenfor disse stadiene inndeles livsløpet i ulike moduler, produksjonsstadiet deles f.eks. inn i modulene *A1*, *A2* og *A3*. Dette illustreres i figuren under. Klimapåvirkningen fra de ulike modulene oppgis i effektkategorier som tidligere beskrevet. Det er viktig å plassere klimapåvirkningene i de riktige modulene etter hvilken tid påvirkningen skjer. Alt utslipp pga f.eks. vedlikehold skal føres inn under *B2: Vedlikehold*, selv om det utføres transport ifb. vedlikeholdet.

Informasjon om vurdering av byggverk																			
Informasjon om byggearbeidetslivssyklus																	Tilleggsinfo utover byggearbeidetslivssyklusen		
A1-A3			A4-A5		B1-B7							C1-C4				D			
Produksjonsstadie			Byggestadie		Bruksstadie							Avhending				Fordeler og ulemper utenfor systemgrensen			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	D	D	
Råvarer - utvinning og bearbeiding	Transport av råvarer til produksjon	Produksjon	Transport til byggeplass	Bygging/innstallering	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Erstatning	Oppussing	Operativt energibehov	Operativt vannforbruk	Riving	Transport	Avfallsbehandling	Deponering	Ombruk	Gjenoppretting	Resirkulering	
Scenario			Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario
D*	Vugge-til-port + C1-C4 og D																		
D*/F*	Vugge-til-port + C1-C4 og D, med valg																		
D*/F*	Vugge-til-grav + D																		
D*	Vugge-til-port																		
D*/F*	Vugge-til-port med valg																		

D* Deklarert enhet F* Funksjonell enhet Påbudt Valgfri

Figur 3.16: Livssyklusstadier med moduler for byggematerialer (øverst) og ulike typer EPDer (nederst). Fra *Bærekraftige byggverk - miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler og byggevarer* (NS-EN 15804, 2012, Figur 1, redigert, oversatt fra engelsk).

Svakheter ved LCA

På lik linje med andre vitenskapelige arbeider har LCA svakheter og typiske feilkilder. Et eksempel på dette er LCI-trinnet, der utgangs- og inngangstrømmer fordeles og tilordnes produktet. Hvilke inngangstrømmer som skal tilordnes produktet, og i hvor stor grad, er ikke basert på vitenskap og vurderes av de som gjennomfører analysen Klöpffer (2014). Grunnen er at det er svært komplisert å gjøre dette etter en vitenskapelig metode (Klöpffer, 2014). Denne metoden gjør at vurderingen i stor grad er preget av de ansvarlige for LCAen.

Metoden for LCIA er mindre streng fordi vitenskapen om økosystemer, og hvordan menneskelige utslipp påvirker disse, er usikker (Klöpffer, 2014; NS-EN ISO 14040, 2006). Effektkategoriene som brukes i LCIA-delen er ikke alltid like godt utviklet, da flere fortsatt er i en tidlig utviklingsfase. I følge NS-EN ISO 14040 (2006) er det usikkerhet rundt hvordan man skal knytte LCI-resultatene til konkrete miljøpåvirkninger. Det er heller ikke enighet om en felles, standard metode.

LCA-rammeverket tillater ikke å fokusere analysen kun på spesifikke utslipp NS-EN ISO 14040 (2006); NS-EN ISO 14044 (2006). I de senere årene har det kommet forenklede metoder som kun tar i bruk begrensede deler av rammeverket (Klöpffer, 2014). Det er derfor viktig å begrunne produktvalg med LCAer som følger både NS-EN ISO 14040 (2006), NS-EN ISO 14044 (2006) og andre offisielle standarder.

LCAer begrenses til klima- og miljøpåvirkninger for produktet eller tjenesten som analyseres NS-EN ISO 14040 (2006). Denne begrensningen ble gjort for å forenkle bruken av LCA, i følge Klöpffer (2014). Et produktvalg vil også ta hensyn til økonomi og samfunns-kostnader. Det gjør at LCA ikke kan være det eneste vurderingsgrunnlaget. Hva som veier tyngst av miljø og økonomi er derfor opp til den enkelte forbruker eller forretning.

3.4.2 Miljødeklarasjoner

Når analysen er gjennomført i tråd med LCA-rammeverket utarbeides det såkalte deklarasjoner. Dette er en oppsummering av analysen og inneholder resultater, beskrivelser, ansvarlig produsent osv. Disse deklarasjonene kalles EPDer og har foretak og produsenter som målgruppe. EPDen er miljødeklarasjoner av type III og må derfor administreres av en programoperatør (NS-EN 14025, 2010). I Norge er dette ”The Norwegian EPD Foundation”, også kalt EPD-Norge (The Norwegian EPD Foundation/EPD-Norge, 2019). De finansieres gjennom avgifter for verifikasjon og publisering på www.epd-norge.no. EPD-Norge er medlem av den europeiske sammenslutningen Eco-platform, som har mye av det samme formålet som EPD-Norge, bare på europeisk og internasjonalt nivå.

Utarbeidelsen av EPDer gjøres for byggematerialer etter NS-EN 15804 (2012), som inneholder PCRer for byggematerialer og produkter. En PCR er forhåndsdefinerte mål og omfang for produkter. Disse PCRene brukes av EPD-Norge ved verifikasjon. PCRer sørger for at produktkategoriene blir utarbeidet og presentert på likt vis (Klöpffer, 2014). Før EPDer sammenlignes er det viktig å kontrollere at EPDene henviser til samme PCR, hvis ikke kan de ikke nødvendigvis sammenlignes på likt grunnlag. Resultatene fra modulene *A1-A3*, *C1-C4* og *D* er obligatoriske i utarbeidelsen av EPDer (NS-EN 15804, 2012). Unntaket er hvis materialet oppfyller unntakskravene i NS-EN 15804 (2012, pkt. 5.2). Kravene er gjengitt, og oversatt fra engelsk:

- Produktet eller materialet er fysisk integrert med andre produkter ved installasjon/montering som gjør at produktet ikke kan separeres fra de andre produktene ved slutten på livsløpet.
- Produktet eller materialet er ikke lenger identifiserbart ved slutten av livsløpet som et resultat av en fysisk eller kjemisk prosess.
- Produktet eller materialet inneholder ikke biogent karbon.

Er disse kravene oppfylt holder det å beregne modulene *A1-A3*. Unntaket skal begrunnes, og det skal henvises til der det finnes informasjon for de utelatte modulene.

Sement er et produkt som oppfyller alle unntakskravene, da det ikke er mulig å skille betong og sement etter herding. Informasjon om *D* modulen til sement innlemmes i samme modul til betong. Treverk er et produkt som ikke oppfyller kravet om fravær av biogent karbon. Resultatet av disse unntakene er at det finnes ulike sett av moduler. Disse utgjør forskjellige typer EPDer, avhengig av hvilke stadier og moduler som er inkludert (NS-EN 15804, 2012). Dette kan eksempelvis være *A1-A3*: *vugge-til-port* eller *A1-C4*: *vugge-til-grav*, og er illustrert i nederste del av figur 3.16.

3.4.3 Bundet energi

Bundet energi er et begrep som ofte benyttes når det er snakk om klimagassregnskap til bygg. Bundet energi defineres i denne sammenheng som den energien som går med til materialutvikling og transport av et materiale eller produkt. I dag bygges det flere såkalte ”Powerhouse” i Norge. Disse vil gjennom sin levetid produsere mer energi enn det bruker. I denne sammenheng er bundet energi et sentralt begrep. Det er viktig å velge materialer og produkter med så lav bundet energi som mulig, da dette påvirker energiregnskapet negativt.

Eksempelvis ble det i 2016 ferdigstilt et kontorbygg ved navn Powerhouse Brattørkaia i Trondheim. Dette produserer strøm ved bruk av strategisk plasserte solceller. Det er også energigjerrig i oppvarming og ventilasjon ved å bl.a. utnytte betongens termiske egenskaper, som er beskrevet videre i avsnitt 3.5.1. Bygget starter etter bygging med et stort, negativt energiregnskap, og bruker hele sin 60 års levetid på å komme på plussiden. Her er den bundne energien tatt med for alle materialer i bygget, inkludert f.eks. gulvtepper og himlinger, og en eventuell utskifting av disse (Powerhouse, 2018). Slike prosjekter er absolutt aktuelle framover i dagens klimafokuserede samfunn, og termer som bundet energi vil benyttes mer og mer.

3.5 Miljøegenskaper til betong og massivtre

Massivtre og betong er to mye brukte materialer i bæresystem til bygg. Begge har positive miljøegenskaper, og begge bidrar til utslipp av CO_2 . I dette avsnittet beskrives noen av disse egenskapene. Hvilket materiale som passer best til et gitt prosjekt med tanke på utslipp er individuelt og ikke mulig å generalisere til et entydig svar (Bygg uten grenser, 2019).



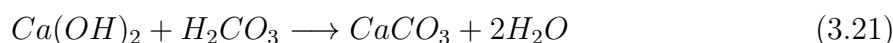
Figur 3.17: Betong og tre kan fint kombineres i samme bygg. Fra *Concrete and Wood Summer House in South Iceland* (Springer, 2017).

3.5.1 Betong

Videre nevnes ulike miljøegenskaper til betong, og i hvilken fase av en LCA disse kan medregnes. Noen av disse kan være vanskelig å inkludere i en LCA, da de f.eks. kan påvirke positivt i sluttfasen av levetiden til bygget. Karbonatisering er et eksempel på dette. Et klimagassregnskap er i dag ofte kun fokusert på de tidlige fasene, typisk fase A1-A5. Det er derfor ønskelig å utvide fokuset til å ta med utslipp i sluttfasene. Dette er under utvikling og det er håp om at hele levetiden til et bygg blir inkludert som en standard (Røine, 2020).

Karbonatisering

Karbonatisering er prosessen der karbon fra luften bindes til betongen. Denne prosessen starter i aldringsstadiet til betongen. Ved sementdannelse skjer såkalt kalsinering, der CO_2 drives vekk for at betongen skal herde og oppnå ønsket fasthet. Under karbonatisering reverseres dette, og det skjer en kjemisk prosess som kan beskrives slik (Engelsen, 2018):



Denne formelen viser at klimagassen CO_2 må være løst i vann for at den skal reagere med kalk og karbonatisere. Karbonatisering kan derfor ikke skje i tørre miljø, og foregår stort sett utendørs, eller steder med tilstrekkelig luftfuktighet. En forutsetning for at formelen over skal gjelde er altså følgende:



Karbonatiseringen skjer på overflaten til betongen og inn til en viss dybde. Det er ikke ønskelig at denne prosessen når armeringen pga. fare for korrosjon. Å forhindre karbonatisering inn til armeringen kan sikres med betongens bestandighet, i form av lavt masseforhold og ved økt overdekning (Røine, 2020). Det antas at potensialet for karbonbinding ligger på omtrent 250 – 300 kg CO_2 – *ekv.* pr. tonn sement gjennom hele tykkelsen. Tallfesting av potensialet til karbonatisering som et positivt klimabidrag utvikles stadig. For resirkulert betong vil potensialet øke da betongen blir knust og får økt overflate (SINTEF Byggforsk, 2015). Dette gjelder også ved å bruke knust betong som tilslag i ny betong, da dette også kan karbonatisere videre. NS-EN 16757 (2017) tillater å ta med karbonatisering etter riving (fase *D*) i klimagassberegninger. Ved å se på utslippene i et livsløpsperspektiv vil karbonatiseringen binde opp igjen mesteparten av kalsineringsutslippet (Røine, 2020).

Termisk masse

Betongen virker som et lager av varmeenergi når overskuddsvarme produseres i et bygg. Denne varmen frigjøres når temperaturen i bygget synker. Dette skjer under levetiden til bygget og inngår dermed i fase *B* i en LCA. Alle materialer har termiske egenskaper, men de fleste klarer enten ikke holde på varmen, lede varmen videre, eller slippe den ut til ”rett tid”. Betong har god termisk kapasitet og gjennomsnittlig varmeledningsevne, noe som gjør den godt egnet til lagring av varmeenergi (Kjellmark et al., 2018). Denne evnen gjør at kostnadene og energibruken ifb. oppvarming av et bygg kan reduseres betraktelig. Dette utnyttes best i bygg der det er en naturlig døgnsyklus av temperaturforandringer, som skole- eller kontorbygg, og ved at inneluft kommer i direkte kontakt med betongens overflate. Den besparende effekten av termisk masse kan være vanskelig å beregne nøyaktig, men ulike sammenligninger har vist at det kan oppnås 5 – 15% og 20 – 50% redusert energibehov for henholdsvis oppvarming og kjøling (Høseggen et al., 2013; Murphy, 2012).

Resirkulering og gjenbruk

70% av bygge- og anleggsavfall skal i dag gjenbrukes iht. nasjonal plan for bygge- og anleggsavfall (NHPs Sekretariat, 2017). Betong kan resirkuleres og brukes videre i såkalt ubundet- og bundet bruk. Ubundet bruk står for omtrent 90% av den resirkulerte rivningsbetongen, og brukes til bl.a. tilslag i grøfter, bærelag eller forsterkningslag (Jacobsen, 2018). De resterende 10% brukes som betongtilslag og betegnes som bundet bruk. I et klimagassregnskap inngår denne effekten i fase *D*. Prosjektering av resirkulerte masser betegnes gjenbruk, og det motsatte kalles deponering. Begge deler vil bidra til opptak av CO_2 om den knuste betongen får karbonatisere fritt, som tidligere beskrevet.

3.5.2 Tre

Massivtre som byggemateriale har flere positive miljøegenskaper. Her fokuseres det på enkelte egenskaper omhandlende klimagassutslipp. I likhet med betong kan det være vrient å få med effektene av de ulike egenskapene i et klimagassregnskap, og en fullstendig forståelse av totaleffekten er vanskelig å oppnå.

Lagring og opptak av karbon

Gjennom fotosyntesen tar skog opp CO_2 . Denne karbonen lagres i trærne og senere i treprodukter som brukes i bygg. Ved at trevirket brukes i bygg forlenges tiden karbonen

er bundet (Treindustrien, 2013). I en LCA inngår denne positive virkningen i fase *A1*. Tre har dermed en positiv innvirkning på klimagassutslipp i sin naturlige form. Dette ligger lagret helt til treet enten råtner eller blir brent. Da slippes karbonen ut i atmosfæren og bifaller fase *C* i en LCA. Det er uvisst akkurat hvor mye av karbonen som lagres i røttene, og hvor mye i trestammene. Ulike tresorter tar opp ulik mengde CO_2 . Av de norske treslagene er det bjørk som er mest effektivt og tar opp 920 kg/m^3 (Aarø & Bøhn, 2018).

Fornybart og naturlig

Tre er et fornybart og naturlig materiale såfremt skogen ikke avskoges. Ved skogruk vil det automatisk starte en tilskoging etter hugging. Dette er unikt for trevirke, ved at ingen kjemikalier e.l. blir benyttet i produksjonen, og dermed ingen negativ innvirkning på klimagassregnskapet. I limtrebjelker brukes lim med negativ miljøpåvirkning. Mer miljøvennlige alternativer er dog under utvikling. Det er uansett mulig å unngå limet og oppnå 100% treverk uten miljøskadelige kjemikalier med dagens alternativer.

Brensel og gjenvinning

Som tidligere nevnt vil den lagrede karbonen i trevirket bli frigitt ved brenning. Dersom dette treverket erstatter fossile brennstoff vil det ha en direkte effekt på atmosfæren ved å redusere CO_2 -utslippet. Ved å gjenbruke og gjenvinne trevirket oppnår man en lengre lagringsperiode i produktene. De største besparelsene får man ved å først bruke trevirke til gjenvinning før det blir til energi (Treindustrien, 2013).

3.6 Laster

Kontorbygget utsettes for permanente og variable laster som påvirker dimensjoneringen av alle konstruksjonsdeler. Lastvirkningen på delene kommer fra en dimensjonerende *lastkombinasjon (LK)* som vil ha størst virkning på bygget. Lastkombinering utføres etter reglene i NS-EN 1990 (2002).

Videre i dette delkapittelet beskrives de ulike påførte lastene som virker på bygget, og hvordan de er definert. De aktuelle størrelsene på de påførte lastene er definert i tabell C.1, i vedlegg C. Disse er hentet fra FEM-design-modellen. De dimensjonerende kreftene er kun beregnet i FEM-design, og disse er beskrevet nærmere i tabell 4.3.

3.6.1 Permanente laster

Permanente laster er, som navnet tilsier, laster som har en tilnærmet konstant størrelse i en tidsperiode. Disse omhandler i dette tilfellet egenlast, oppspenningskraft og en skjevstillingslast. I tillegg er det lagt til en såkalt "permanent tilleggslast".

Oppspenning av spennarmering krever en stor strekkraft, som påfører betongelementene en tilsvarende trykkraft. Skjevstillingslaster påvirker de avstivende veggene i bygget. Denne lasten skyldes geometriske avvik under støping og montasje.

Egenlast

Egenlasten til et kontorbygg kommer av alle byggets bygningsdeler; hulldekker, bjelker og søyler. Vekten beregnes ved bruk av betongens tyngdetetthet med armering, $\rho_c =$

25,0 kN/m³ (NS-EN 1992-1-1, 2004). Fordelingen av egenvekten er ulik gjennom bygget avhengig av hvilke konstruksjonsdeler som bærer hvilken last. Eksempelvis vil det oppstå et moment midt på et hulldekkeelement fra dens egen vekt, samtidig som vekta også virker på bjelkene som bærer dekkeelementene.

Skjevlaster

Ved støping og montasje er det vanskelig å oppnå perfekt geometri mellom elementene. Det geometriske avviket som oppstår vil påvirke konstruksjonens lastfordeling. Dette vil gi horisontale krefter på konstruksjonen og avstivningsveggene må dimensjoneres for dette. Det tas hensyn til avvikene ved å enten legge inn det geometriske avviket i beregningsmodellen eller ved å pålaste ekstra horisontale laster. Det geometriske avviket, θ , og virkningen på avisningssystemet, H_i , beregnes etter NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 5.2).

$$H_i = \theta_i(N_b - N_a) \quad : \quad \theta_i = \theta_o \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (3.23)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad : \quad \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}} \quad (3.24)$$

Der l er byggets høyde og m er antall vertikale elementer som gir krefter i horisontal retning på avisningssystemet, i dette tilfellet antall søyler. I tillegg brukes konstanten $\theta_o = 1/200$ som finnes i NS-EN 1992-1-1 (2004, Nasjonalt tillegg). I tabell C.1 er skjevlasterne for bygget tabellert. Disse er ikke beregnet, men hentet direkte fra FEM-design-modellen tilhørende referansebygget (Rønning et al., 2019).

Permanent tilleggslast

Det er i tillegg til de øvrige lastene pålastet en permanent tilleggslast på 1,2 kN/m² i 1., 2., og 3. etasje. Denne lasten tar hensyn til egenvekten til bevegelige skillevegger (NS-EN 1991-1-1, 2002). For skillevegger med egenvekt mindre enn 3,0 kN/m skal det legges til en permanent tilleggslast på 1,2 kN/m². Denne vurderingen er gjort av Arcon.

Spennkrefter

Ved oppspenning av spennarmeringen påføres betongelementet store krefter. Spennkabelene spennes opp med jekk og låses på plass. Dette gir en stor trykkkraft i underkanten av elementet. Da kraften ikke virker i nøytralaksen til tverrsnittet vil et moment påføres konstruksjonen. Dette momentet er grunnen til at spennarmering brukes, da det senere motvirker en momentbelastning fra de øvrige lastene.

Det skilles mellom maksimal spennkraft, initiell forspenningskraft og spennkraft etter en bestemt tid, avhengig av de tidsavhengige tapene beskrevet i 3.2, *Tidsavhengige effekter og -tap*. Den maksimale spennkraften, P_{max} , er kraften som overføres til den aktive enden under oppspenning gitt ved NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 5.41):

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} \quad (3.25)$$

der A_p er spennarmeringens tverrsnittareal og $\sigma_{p,max}$ er største spenning som påføres spennkabelen, gitt ved:

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}) \quad (3.26)$$

Initiell forspenningskraft, P_{m0} , er kraften som påføres betongen umiddelbart etter oppspenning og låsing. Denne tilsvarer den maksimale spennkraften, P_{max} , fratrukket de umiddelbare tapene, og er gitt ved NS-EN 1992-1-1 (2004, formel 5.43):

$$P_{m0} = A_p \cdot \sigma_{pm0} \quad (3.27)$$

$$\sigma_{pm0} = \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}) \quad (3.28)$$

Ettersom tiden går og de tidsavhengige tapene virker vil spennkraften være lik den maksimale forspenningskraften fratrukket både de umiddelbare, ΔP_i , og de tidsavhengige tapene, ΔP_{c+s+r} :

$$P_t = P_{max} - \Delta P_i - \Delta P_{c+s+r} \quad (3.29)$$

Disse tapene er nærmere beskrevet i 3.2, *Tidsavhengige effekter og -tap*.

3.6.2 Variable laster

Variable laster varierer i styrke og intensitet over tid. Plasseringene til lastene kan og være ulike. For referansebygget i denne masteroppgaven er de variable lastene nyttelast, vindlast og snølast.

Nyttelast

Nyttelasten i et bygg avhenger av type bygg og er oppgitt i NS-EN 1991-1-1 (2002). Lasten tar hensyn til flyttbart inventar, installasjoner, personer osv. I følge NS-EN 1991-1-1 (2002, tabell NA 6.1) er kontorlokaler i kategori B, og nyttelastens karakteristiske verdi finnes da som en jevnt fordelt last; $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ (NS-EN 1991-1-1, 2002, tabell NA 6.2). Pga valg av hulldekke skal det ikke brukes arealreduksjonsfaktor for den fordelte lasten. Nyttelasten som virker fra flere etasjer på søyler og vegger kan reduseres med en etasjereduksjonsfaktor, α_n (NS-EN 1991-1-1, 2002, formel 6.2).

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\psi_0}{n} \quad (3.30)$$

der n er antallet etasjer (>2) over de belastede, bærende delene fra samme kategori. $n = 3$ i referansebyggets tilfelle. ψ_0 hentes fra NS-EN 1990 (2002, tabell A1.1), og er lik 0,7 for kontorer. Nyttelasten i første etasje blir dermed redusert og settes til $q_{k,red} = \alpha_n \cdot q_k = 0,9 \cdot 3,0 = 2,7 \text{ kN/m}^2$.

Vindlast

Vind vil skape en betydelig last på et bygg med flere etasjer. Beregninger av vindlaster gjøres i henhold til NS-EN 1991-1-4 (2005). I denne masteroppgaven er størrelsene på lastene hentet fra den dimensjonerende LK i FEM-Design, detaljert beregningsmetodikk blir dermed ikke presentert her.

Vindlast er en naturlast og derav uforutsigbar. Den vil variere over høyden til bygget. En konservativ antakelse er at den fordeles jevnt over lo og le side. NS-EN 1991-1-4 (2005, Veiledning- forenklet beregning av vindkasthastighetstrykket) gir en forenklet metode for å regne ut vindkasthastighetstrykket, $q_p(z)$:

$$q_p(z) = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot c_{dir}^2 \cdot c_{alt}^2 \cdot c_{season}^2 \cdot c_{prob}^2 \cdot q_{p0}(z) \quad (3.31)$$

Denne beregningsmetoden kan benyttes dersom bygget ligger i omtrent samme terrengruhetskategori innen en radius på 10 km og ikke ligger spesielt utsatt til i noen retning. De ulike parametrene avhenger av ulike faktorer som: vindakselerasjon, vindkastøkning på leside, vindretning, osv. De fleste faktorer kan ofte settes lik 1, slik at $q_p(z)$ kan settes lik grunnverdien, $q_{p0}(z)$. Denne bestemmes ved å lese av grafene i NS-EN 1991-1-4 (2005, V.3), som er funksjoner av høyden over terreng, z , terrengruhetskategori i NS-EN 1991-1-4 (2005, Tabell NA.4.1), og referansevindhastigheten, $v_{b,0}$, som er avhengig av geografisk plassering.

Snølast

Snølasten vil variere etter plassering i landet og beregnes etter NS-EN 1991-1-3 (2003). Størrelsen på lasten er hentet fra FEM-Design for dimensjonerende LK. Som vindlast er også snølast en uforutsigbar naturlast, avhengig av geografisk plassering og antall meter over havet. Snølast på tak for vedvarende eller forbigående dimensjonerende situasjoner er gitt etter NS-EN 1991-1-3 (2003, pkt. 5.2(3)a):

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3.32)$$

Parametrene bestemmes med utgangspunkt i bl.a takvinkel, skjerming av bygg og reduksjon av varmegjennomgang. Karakteristisk snølast, s_k , avhenger av geografisk plassering og høyde over havet.

3.6.3 Lastkombinering

Flere ulike laster påvirker en konstruksjon til samme tid, og kombinasjonen av lastene gir ulike lastkombinasjoner. Kombineringen gjøres iht. NS-EN 1990 (2002), der en metode kalt partialfaktormetoden benyttes. Dimensjoneringsprogrammet FEM-Design som er benyttet til å finne laster i denne masteroppgaven bruker samme metode. Det er lite sannsynlig at alle laster påvirker konstruksjonen med største verdi på samme tidspunkt, og dette tas hensyn til med en kombinasjonsverdifaktor, ψ . I metoden tas det hensyn til usikkerhetsmomenter ved å skalere lastene med en lastfaktor, γ , som gir tilstrekkelig sikkerhet. Dette er fordi lastene ofte avviker fra de representative verdiene som finnes i deres respektive deler av NS-EN 1991. Denne kombineringen øker i omfang etterhvert som antall lastkategorier øker og konstruksjonens geometri kompliseres. Av den grunn er det vanlig å overlate denne jobben til analyseprogrammer som Robot av Autodesk eller FEM-Design.

Lastene i tabell C.1 er et resultat av analysen gjort i FEM-Design. Denne gir de dimensjonerende lastene for de ulike elementene i bygget. De dimensjonerende kreftene ved en gitt LK for én elementtype er ulik en annen. Det er derfor nødvendig å finne den dimensjonerende LKen som gir de største dimensjonerende kreftene for hvert enkelt element. Variasjonen i laster i de ulike etasjene gjør at søyler i samme etasje kan analyseres sammen, men ikke søyler i ulik etasje. Ved bruk av klimagasskalkulatoren vår er én av de nødvendige parameterne dimensjonerende krefter. Det er resultatet av den dimensjonerende LKen som brukes som input der. De dimensjonerende kreftene til elementene som optimaliseres oppgis i tabell 4.3 i neste kapittel.

4 Klimagasskalkulator

4.1 Forutsetninger

Kalkulatoren som benyttes til klimagassberegninger i denne masteroppgaven ble utarbeidet i Microsoft Excel. Formålet dens er å beregne antall $kg CO_2 - ekv.$ ved en gitt mengde betong og armering. Den ble videreutviklet til å beregne kapasitet, og dermed nødvendig armeringsmengde, samt å sjekke deformasjonskrav, avhengig av elementtypen. De ulike optimaliseringspunktene kalkulatoren er tilpasset etter blir beskrevet i neste kapittel.

Enkelte forutsetninger ble gjort tidlig i utarbeidelsen. Tallene brukt til å beregne utslippet er hentet fra lavkarbonbetong-publikasjonen, NB37 (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1). I kalkulatoren ble det valgt å fokusere på tre ulike karbonklasser. Betongen med lavest utslipp, karbonklasse Ekstrem, er mulig kun for fastheter mellom B30-B55. Ved lavere fastheter er karbonklasse A beste alternativ. Det ble gjort beregninger for de mulige fasthetene i klasse B, A og Ekstrem. Verdiene brukt er gitt i tabellen under.

Tabell 4.1: $kg CO_2 - ekv.pr. m^3$ betong brukt i klimagasskalkulatoren, fordelt etter fasthet (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1).

Karbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55
B	190	210	230	280	290	300
A	170	180	200	210	220	230
Ekstrem	-	-	110	120	130	140

Disse verdiene gjelder for fase *A1-A3* i en LCA. Det er valgt å ikke bruke en betongelementprodusents utslippsverdier, men heller kravene satt i NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Det er valgt i samråd med veileder å ikke ha med B65 i beregningene da dette anses som lite aktuelt.

I tillegg til utslippet fra betong er det beregnet utslipp fra nødvendig slakk- og spennarmering. Verdiene for $kg CO_2 - ekv. pr. kg$ stål er funnet i EPDer og er de laveste verdiene som er mulig å benytte i Norge i dag (Kermit, 2020). Tilnærmet all slakkarmoring har høy resirkuleringsgrad ($> 99\%$) og har dermed relativt lave utslipp. Nivået på resirkulering er pr. i dag ikke like høyt for spennarmering. Den valgte leverandøren har høyest resirkuleringsgrad i Norge på omtrent 86% (Block Berge, u.å.). Som for betong gjelder også stålverdiene for fasene *A1-A3* i en LCA. Følgende utslippsverdier gjelder i kalkulatoren:

Tabell 4.2: $kg CO_2 - ekv. pr. kg$ slakk- eller spennarmering brukt i klimagasskalkulatoren.

Type	Leverandør	kg. CO_2 ekv. pr. kg stål	EPD
Slakkarmoring	Celsa*	0,36	NEPD-434-305-EN
Spennarmering	Tycsa**	0,5986	AENOR EDP 001-001

* = *Almemark (2015)*

** = *Global Steel Wire S.A., Celsa Group (2013)*

For å tilpasse klimagasskalkulatoren til optimalisering av referansebygget ble den justert etter de ulike elementene som benyttes. Senere i dette kapittelet vil det beskrives nærmere hvordan dette ble utført, og hvordan kalkulatoren brukes for å optimalisere elementene.

Dimensjonerende krefter

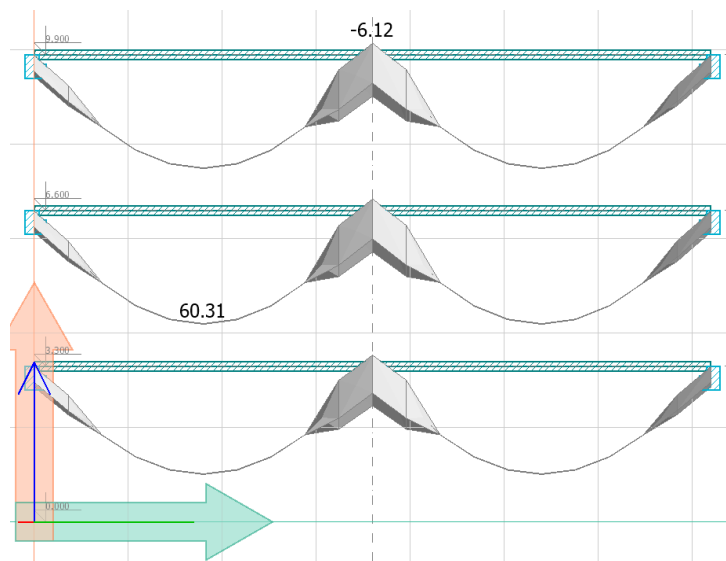
De dimensjonerende lastene er hentet fra FEM-design og listet opp i tabellen under. Lastene tar hensyn til egenlasten fra elementene som er brukt i Rønning et al. (2019) og i FEM-design-modellen.

Tabell 4.3: Dimensjonerende krefter for de ulike elementene som optimaliseres. Hentet ut fra FEM-design-modellen produsert av Arcon.

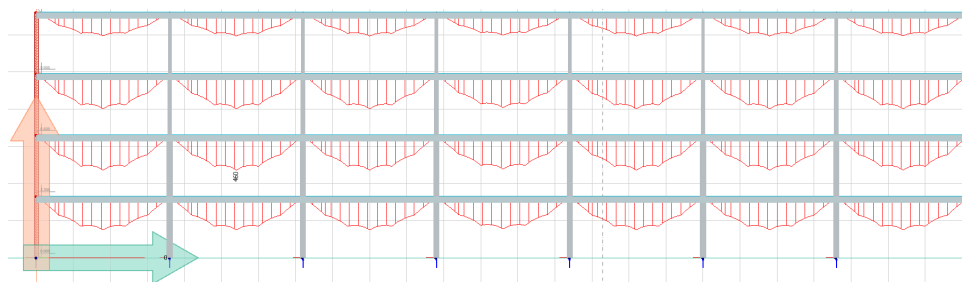
Element	Størrelse	Forklaring	Retning
Hulldেকে	<i>2.etasje, LK35ULS</i>		
$M_{x'}$	60,52 kNm/m	Bøyemoment	σ i x-aksen
$M_{y'}$	-0,0261 kNm/m	Bøyemoment	σ i y-aksen
$M_{x'y'}$	2,23 kNm/m	Torsjonsmoment	
$N_{x'}$	-3,26 kN/m	Aksialkraft	x-akse
$N_{y'}$	-103 kN/m	Aksialkraft	y-akse
$N_{x'y'}$	-1,21 kN/m	Membranskjærkrefter	
$T_{x'z'}$	17,7 kN/m	Skjærkraft	x-akse
$T_{y'z'}$	0,135 kN/m	Skjærkraft	y-akse
Midtbejelke	<i>2.etasje, LK38ULS</i>		
N'	460 kN	Aksialkraft	x-akse
$T_{y'}$	0,287 kN	Skjærkraft	lokal y-akse
$T_{z'}$	136 kN	Skjærkraft	lokal z-akse
$M_{t'}$	0,00 kNm	Torsjonsmoment	
$M_{y'}$	459,6 kNm	Bøyemoment	om lokal y-akse
$M_{z'}$	-0,436 kNm	Bøyemoment	om lokal z-akse
Ytterbejelke	<i>3.etasje, LK38ULS</i>		
N'	315 kNm	Aksialkraft	x-akse
$T_{y'}$	0,262 kN	Skjærkraft	lokal y-akse
$T_{z'}$	31,3 kNm	Skjærkraft	lokal z-akse
$M_{t'}$	0,00 kNm	Torsjonsmoment	
$M_{y'}$	265 kNm	Bøyemoment	om lokal y-akse
$M_{z'}$	-49,6 kNm	Bøyemoment	om lokal z-akse

Det er valgt å bruke lastene i tabellen over som dimensjonerende for alle tverrsnittene i denne masteroppgaven. Det vil si at M_{Ed} ikke vil variere med tverrsnittet. Årsaken til dette er en stor grad av usikkerhet som følger med lastene hentet fra FEM-design. Det er forsøkt å etterregne lastene på hhv. midt- og ytterbejelken med last fra hulldেকে, og dette resulterer i betydelig lavere laster enn de i tabellen over. Den resterende lasten kommer trolig fra andre laster som gjør det vanskelig å kontrollregne for hånd. Andre usikkerheter i tallene innebærer egenlastfaktorer, lastplasseringer og en samlet dimensjonerende last.

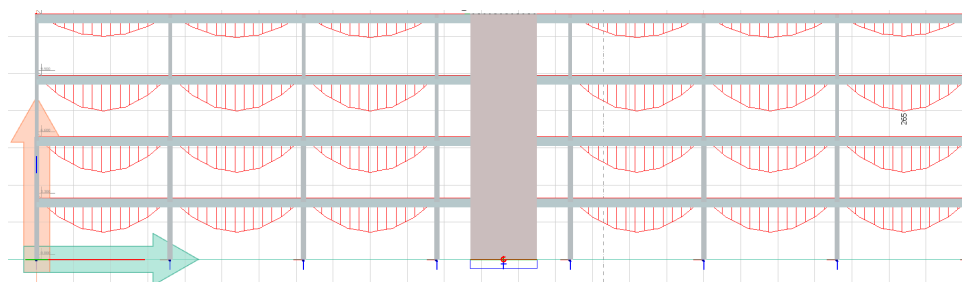
I tabell 4.3 oppgis to ulike lastkombinasjoner som dimensjonerende for hhv. hulldekke og bjelkene. Disse er illustrert i figurne under for en visualisering.



Figur 4.1: Dimensjonerende krefter (LK35ULS) i et snitt i hulldekket. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.



Figur 4.2: Dimensjonerende krefter (LK38ULS) i et snitt i midtbejken. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.

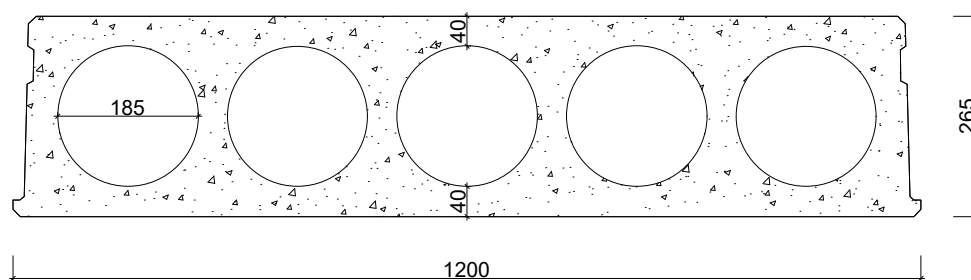


Figur 4.3: Dimensjonerende krefter (LK38ULS) i et snitt i ytterbejken. I midten vises den avstivende vegg som ikke inkluderes i optimaliseringen. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.

4.2 Hulldekkeelement

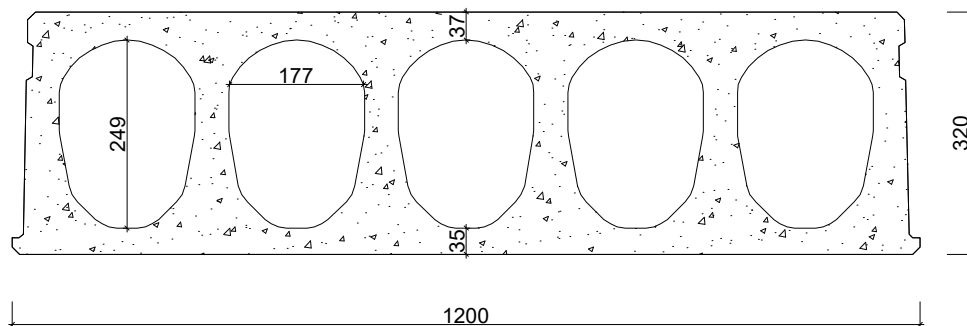
For å beregne totalt klimagassutslipp for ett hulldekkeelement er nødvendige inputverdier totalt betongvolum, betongfasthet og armeringsmengde. Denne masteroppgaven er begrenset til eksisterende tverrsnittdata. Det ble valgt data fra produsenten NOBI, da de hadde en oversiktlig og informasjonsrik samling av arbeidstegninger av de ulike tverrsnittene (NOBI Voss, 2016). Disse ligger i vedlegg B. Vanlig betegnelse på hulldekker er HDxxx, der xxx er tverrsnitthøyden i *mm*.

Et eksempel på hulldekketverrsnitt er gitt nedenfor i figur 4.4. Tverrsnittet har ikke rektangulære sider og det er hensynstatt i arealberegningene. Arbeidstegningene fra NOBI Voss (2016) ble lagt inn i tegneprogrammet AutoCAD for beregning av tverrsnittsareal.



Figur 4.4: Tverrsnittet til hulldekkeelementet, HD265, med sirkulære hull. Fra *Hulldekketyper, tverrsnittsdata* (NOBI Voss, 2016, Redigert).

For å forenkle deformasjonsberegningene noe ble hulldekkene med ikke-sirkulære hull beregnet med rektangulære hull. Et slikt tverrsnitt er vist i figuren under. Det er nødvendig å beregne tverrsnittets andre arealmoment, I , og her må bidragene fra hullene trekkes fra. De tilnærmede rektangulære hullene vil ha større areal enn de faktiske hullene, så dette er en konservativ forenkling. Faktisk deformasjon vil dermed være noe mindre enn den beregnede for tverrsnittene med de største byggehøydene. De endelige tverrsnittdataene brukt i kalkulatoren er listet i tabell 4.4.



Figur 4.5: Tverrsnittet til hulldekkeelementet, HD320, med tilnærmet rektangulære hull. Fra *Hulldekketyper, tverrsnittsdata* (NOBI Voss, 2016, Redigert).

Tabell 4.4: Beregnet tverrsnittdata brukt i klimagasskalkulatoren i Excel. Tverrsnitt fra NOBI Voss (2016).

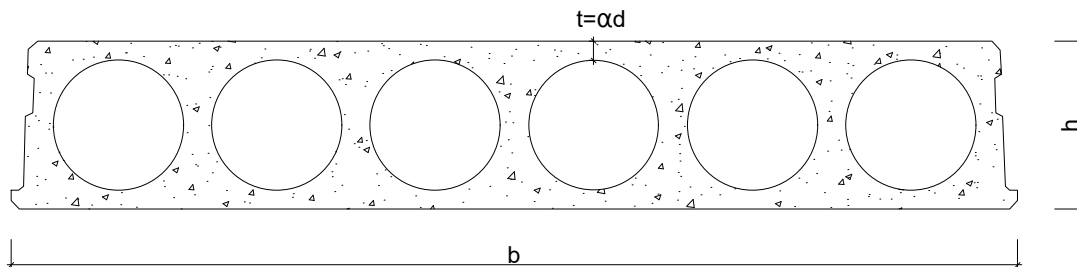
Hulldekke tverrsnittdata [mm]							
Høyde	Bredde	Areal [mm^2]	Flenstykkelse	d , hull	h , hull	b , hull	Ant. hull
200	1200	119 824	23	155	-	-	6
220	1200	142 348	23	155	-	-	6
265	1200	173 358	40	185	-	-	5
285	1200	198 704	40	185	-	-	5
320	1200	189 049	37	-	248	179	5
340	1200	212 695	37	-	248	179	5
400	1200	237 360	45	-	315	169	5
420	1200	260 074	45	-	315	169	5
500	1200	289 203	52	-	403	169	5
520	1200	312 886	52	-	403	169	5

4.2.1 Dimensjonering

For å beregne nødvendig armering til et hulldekketverrsnitt med en gitt fasthet, ble det utviklet et eget Excel-ark for kapasitetsberegning. I (Alexander & Vinje, 2010, Figur A 4.2, Tabell A 4.2) finnes det tabeller for dimensjonering etter kapasiteten til elementene. Disse tabellene har som forutsetning at det benyttes en B45 betong. Da det var ønskelig å kunne endre fasthet på elementene ble det nødvendig å implementere en egen beregning i kalkulatoren.

Kapasitetsarket tar som sagt tverrsnittdimensjoner og fasthet som input, samt et gitt dimensjonerende moment. I tillegg er det mulig å endre andre parametre, som spennvidde. I denne masteroppgaven er spennvidden fastsatt til 7,9 m og endres dermed ikke i optimaliseringen.

En forutsetning i disse beregningene er at trykksonehøyden skal være lik tykkelsen til toppflensen. Figur 4.6 illustrerer αd som er den nødvendige trykksonehøyden og beskrives senere. Ved å anta dette vil trykkresultanten angripe midt i toppflensen, og kapasiteten beregnes med en forenkling der toppflensen tar trykkraften og spennarmeringen tar strekkraften.

**Figur 4.6:** Hulldekkeelement med trykksonehøyden αd lik tykkelsen av toppflensen, t Fra *Hulldekketyper, tverrsnittdata* (NOBI Voss, 2016, Redigert).

Den effektive tverrsnitthøyden, d , er en geometrisk størrelse avhengig av høyden til tverrsnittet, overdekning og armeringsdiameter.

$$d = h - c_{nom} - \varphi/2 \quad (4.1)$$

For at tverrsnittet skal ha tilstrekkelig kapasitet må $d > d_{n\odot dv}$. Nødvendig effektiv høyde, $d_{n\odot dv}$, er avstanden fra toppen av dekkeelementet til tyngdepunktet til armeringen som behøves for at spennarmeringen skal ta hele strekkraften. Denne er gitt ved (Sørensen, 2017, Del 2, formel 7.12):

$$d_{n\odot dv} = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{0,8 \cdot \alpha(1 - 0,4 \cdot \alpha)f_{cd}b}} \quad (4.2)$$

Verdien til α kommer fra antakelsen om trykksonehøyde nevnt tidligere, $d \cdot \alpha = t$. Da vil betongtøyningen, ε_c , i toppen være lik bruddtøyningen, ε_{cu} , ved brudd. Ved beregning av nødvendig effektiv høyde vil det altså være to ukjente, $d_{n\odot dv}$ og α . Løsningen må dermed itereres frem. Dette gjøres ved bruk av *Problemløser*-funksjonen i Excel. Der settes $\alpha \cdot d_{n\odot dv}$ lik tykkelsen ved å endre på α . Denne iterasjonen må gjennomføres for hver endring av tverrsnitthøyde eller fasthet.

Videre beregnes momentkapasiteten til trykksonen, og kontrolleres mot dimensjonerende moment, M_{Ed} . Da et hulldekkeelement ikke trykkarmeres, må kravet $d > d_{n\odot dv}$ oppfylles for å beregne momentkapasiteten. Verdien til α funnet i (4.2) benyttes sammen med d fra (4.1) (Sørensen, 2017, del 2, formel 7.5):

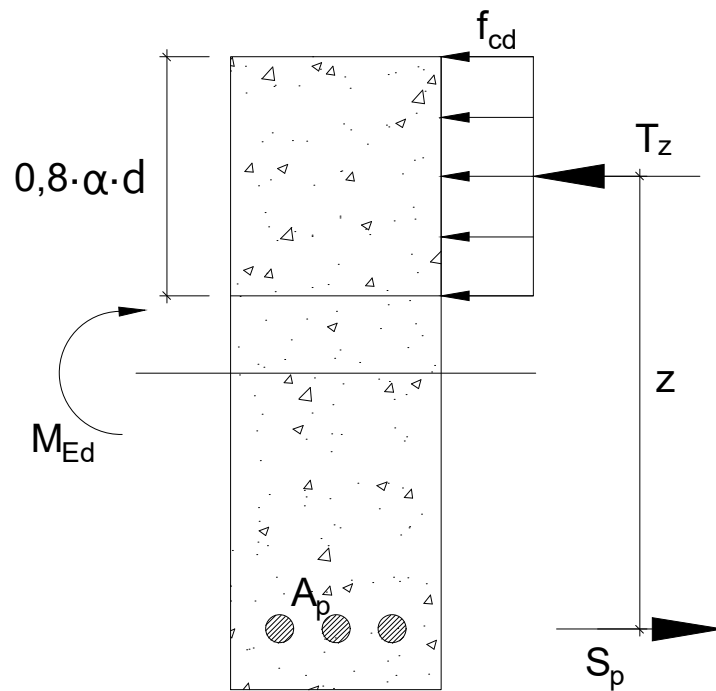
$$M_{Rd} = 0,8 \cdot \alpha(1 - 0,4 \cdot \alpha)f_{cd}bd^2 \quad (4.3)$$

Ved tilstrekkelig kapasitet armeres tverrsnittet med spennarmering etter momentlikevekt om trykkresultanten:

$$A_p \geq \frac{M_{Ed}}{f_{pd} \cdot z} \quad (4.4)$$

der den indre momentarmen, z , er avstanden mellom trykk- og strekkresultanten, se figuren under. Uttrykket for den indre momentarmen, $z = (1 - 0,4\alpha)d$, gjelder når det antas en betongfasthet $\leq 50 \text{ MPa}$ (Sørensen, 2017, formel 7.4, del 2). Disse er de mest vanlige fasthetene og antas å gjelde i klimagasskalkulatoren.

Spennarmeringen har en effektiv diameter $D_{eff} = 11,3 \text{ mm}$ og et effektivt areal $A_{p,eff} = 100 \text{ mm}^2$. Ut fra disse verdiene beregnes nødvendig antall spenntau i hulldekkeelementet.



Figur 4.7: Figuren viser den indre momentarmen z , i et tverrsnitt påført et moment M_{Ed} .

4.2.2 Deformasjonskontroll

Etter nødvendig armering er beregnet etter lastvirkningene sjekkes den valgte armeringsmengden opp mot deformasjonskravene gitt i Betongelementboken Bind C (Vinje et al., 2013, tabell C.1.6). De aktuelle kravene gitt for kontor og hulldekker er samlet i tabellen under. Situasjonstallene står for ulike lastsituasjoner, og disse forklares nærmere i tabellen. All deformasjon kontrolleres i midtsnitt.

Tabell 4.5: Krav til deformasjoner for hulldekkeelementer i et kontorbygg. Positive verdier er oppbøyning, negative er nedbøyning og L er spennvidden (Vinje et al., 2013, Tabell C.1.6).

Situasjon	Krav	Forklaring
1)	$\leq L/500 \leq 20$	Oppbøyning ved montasje, egenlast & spennkraft
2)	$\geq -L/400 \geq -25$	Nedbøyning etter lang tid med full nyttelast
3)	> 0	Nedbøyning etter lang tid med liten nyttelast (10%)

I alle tilfeller er det et ønskelig å unngå bruk av avrettingsmasse under bygging. Dette brukes for å rette ut dekkeflaten ved store deformasjoner. Klimagassutslippet på dette produktet er relativt stort i forhold til fortjenesten med å bruke en høyere fasthet, evt. et høyere tverrsnitt og mer betong. Det er dermed antatt at oppfyllelse av disse kravene ikke gir behov for avrettingsmasse.

Antakelser

Enkelte antakelser må foretas i forkant av deformasjonsberegningene. Disse omhandler bl.a. betongen, armeringen, og lastene. Hva gjelder betongen innebærer disse antakelsene sementklasse og den relative luftfuktigheten i omgivelsene. Disse faktorene kan endres på som optimaliseringspunkter, men i disse beregningene er det antatt faste verdier. Den relative luftfuktigheten, RH , oppgis i % og antas å være lik 40%, da det for kontorbygg anses som mest behagelig med luftfuktighet mellom 30 – 40% (NS-EN ISO 7243, 2017).

For å beregne svinntøyninger er det nødvendig å vite sementklassen. I disse dager (vår 2020) er en ny Eurokode 2 under utarbeidelse, og det er valgt å følge veiledningen i denne for valg av sementklasse, gitt i prEN 1992-1-1 (2020, tillegg B.1). Klasse L er for betong med sakte fasthetsutvikling, og benyttes for betong med $> 35\%$ FA. Contiga har bl.a støpt hulldekker med 35% FA, og hybridbetongen i Powerhouse Brattøra har 50% FA (Kermit, 2020; Powerhouse, 2018). Det antas derfor at dette er en mulighet også i disse beregningene. I tillegg er faktorene α_{ds1} og α_{ds2} omdefinert noe sammenlignet med dagens regelverk (NS-EN 1992-1-1, 2004; prEN 1992-1-1, 2020).

Effektiv spenning i spennarmeringen må bestemmes for å beregne spennkraften. Etter oppspenningen vil spennkraften tape seg umiddelbart fra låsetap. Over lang tid vil den i tillegg tapes ytterligere som følge av kryp, svinn og relaksasjon. Låsetap og relaksasjon bestemmes for å beregne aktuell spennkraft. Tapet fra relaksasjon indikerer et spenningsfall som følge av at armeringen utsettes for konstant tøyning over tid, som beskrives tidligere i delkapittel 3.6.1, *Spennkrefter*. Den initiale forspenningen etter umiddelbare tap beregnes ved bruk av formel (3.27) og blir:

$$\sigma_{p0} = \min(0,75 \cdot 1860; 0,85 \cdot 1636) = 1391 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

For å beregne det endelige spenningstapet fra relaksjon antas relaksasjonsklasse 2, lav relaksasjon. Formel (3.18) gir

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,75} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,75)} \cdot 10^{-5} \cdot 1391 = 67,8 \cdot 0,8 = 54,2 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Dette gir et prosentvis tap i spennkraften pga relaksasjon (med $\sigma_{p,max} = 1488 \text{ MPa}$):

$$\frac{54,2}{1488} \cdot 100 = 3,65\% \quad (4.7)$$

Effektiv spenning etter relaksasjon og låsetap blir da beregnet, samt en effektiv forspenningskraft, P'_{m0} . Det antas at spennkraften kan påføres elementet etter ett døgn, som er vanlig i hulldekkeproduksjon. Ved bruk av de strengeste karbonklassene øker mulig liggetiden før oppspenning noe.

Laster

Flere ulike laster kan gi deformasjon på hulldekkeelementene. Disse er oppsummert i tabellen under med påføringstidspunkt og andel som antas som langtidslast. Egenlasten og spennkraften avhenger av valgt tverrsnitt, og beregnes etter prinsippene vist i delkapittel 3.6, *Laster*. Nyttelast finnes i tabell C.1.

Tabell 4.6: Oppsummering av laster benyttet i deformasjonsberegningene.

Lasttype	Påføringstidspunkt	Andel langtidslast
Nyttelast, p	28 døgn	30%
Egenlast, g	3 døgn	100%
Spennkraft, P	1 døgn	100%

Egenvekten og nyttelasten antas jevnt fordelt over hele lengden til dekket. Hulldekket anses som fritt opplagt og det dimensjonerende momentet er gitt ved:

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} \quad (4.8)$$

Spennkraften er en aksialkraft som virker i tverrsnittet til hulldekket. Momentet fra denne kraften blir den effektive spennkraften multiplisert med eksentrisiteten, e , fra midtsnitt. Spennarmeringen ligger i underkanten av tverrsnittet og gir strekk på oversiden (negativt moment etter dagens notasjon).

Beregninger

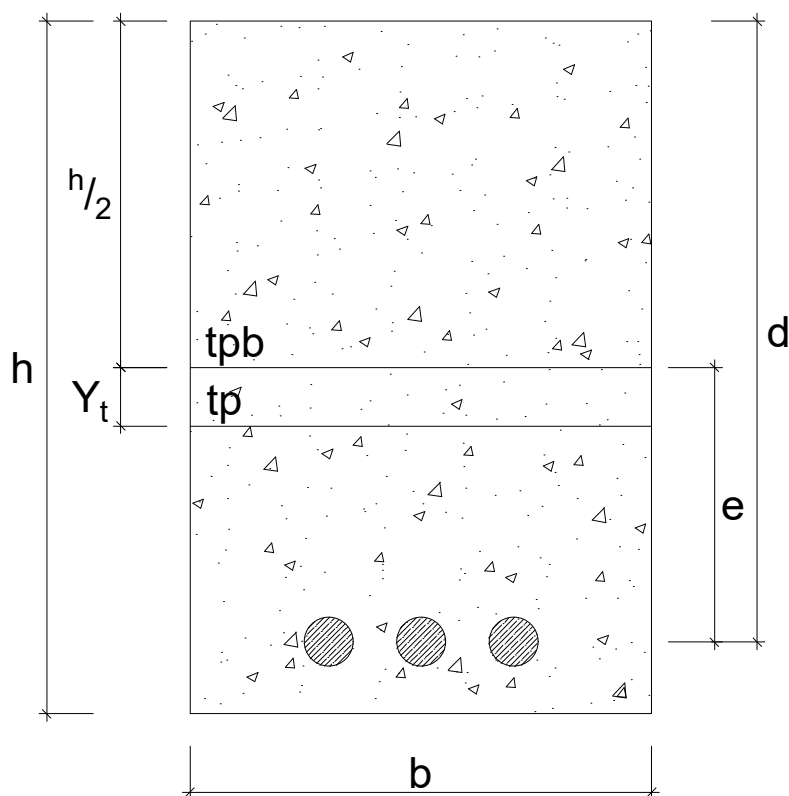
For å beregne opp- og nedbøyning for de tre ulike lastsituasjonene brukes E_{middel} . Denne inkluderer alle lastvirkninger samtidig, både kort- og langtidslast, og beregnes etter formel (3.11). For å beregne E_{cL} (formel (3.10)) må kryptallene, $\varphi(t, t_0)$, bestemmes. Dette gjøres for tre ulike kryptilfeller, avhengig av lastpåførselstidspunktet, t_0 , og på hvilket tidspunkt, t , deformasjonen sjekkes. Disse tre er:

- Lastpåføring: $t_0=3$ døgn, sjekkes: montasje ($t=28$ døgn).
- Lastpåføring: $t_0=3$ døgn, sjekkes: lang tid ($t=100\ 000$ døgn $\approx \infty$).
- Lastpåføring: $t_0=28$ døgn, sjekkes: lang tid ($t=100\ 000$ døgn $\approx \infty$).

Kryptallene beregnes etter reglene i NS-EN 1992-1-1 (2004, tillegg B), for hvert kryptilfelle og for alle lastene i tabell 4.6. Videre bestemmes E_{cL} for disse lastene før E_{middel} beregnes etter formel (3.11) for lastsituasjonene nevnt i tabell 4.5. Momentene som oppstår utgjør $\Sigma|M|$ for lastsituasjonene:

- 1) Ved montasje: $\Sigma|M| = M_P + M_g$
- 2) Lang tid, full nyttelast: $\Sigma|M| = M_P + M_g + M_p$
- 3) Lang tid, liten nyttelast: $\Sigma|M| = M_P + M_g + 0,1 \cdot M_p$

Videre er det nødvendig å beregne det armerte tverrsnittets arealtrehetsmoment om tverrsnittets tyngdepunktsakse. Da tverrsnittet har hull, og dermed ikke er massivt, må det trekkes fra bidrag fra hullene i beregningene. Disse bidragene er forenklet slik at hullene enten er sirkulære, eller rektangulære. Styrketyngdepunktet til det armerte tverrsnittet, tp , vil ikke være det samme som for et rent betongtverrsnitt, tpb . Dette kalles et transformert tverrsnitt, og er illustrert i figur 4.8. Flere parametre må beregnes for dette transformerte tverrsnittet for å kunne beregne arealtrehetsmomentet, I_t .



Figur 4.8: Figuren viser tyngdepunktet til et betongtverrsnitt, tpb , og til det transformerte tverrsnittet, tp , og avstanden mellom dem, Y_t .

Oppbøyning ved montasje

Montasje antas å finne sted etter 28 døgn og da neglisjeres svinn, da bidraget vil være svært lite. Den totale deformasjonen vil dermed komme fra oppspenning og egenvekt. I de følgende formlene henviser 1) til lastsituasjon 1), som beskrevet tidligere. Oppbøyningsbidraget fra spennkraften kommer fra et tilnærmet konstant moment over hele spennvidden. Bidraget beregnes etter prinsippet om enhetslast og hurtigintegrasjon:

$$\delta_P = \int_L \frac{M_P}{E_{middel}^{(1)} \cdot I_t^{(1)}} \cdot M_1 dx = \frac{1}{24} \frac{L^2}{E \cdot I_t} M_P \quad (4.9)$$

Egenvekten vil være tilnærmet lik en jevnt fordelt last på en fritt opplagt bjelke, og nedbøyningsbidraget bestemmes ved enkel formelbruk:

$$\delta_g = \frac{5}{384} \frac{gL^4}{E_{middel}^{(1)} \cdot I_t^{(1)}} \quad (4.10)$$

Langtid, full og liten nyttelast

Ved langtidsberegninger vil svinntøyninger gi et nedbøyningsbidrag som ligner på det fra spennkraften, bare motsatt rettet. Formelbruket er tilsvarende og momentbidraget, M_s , er gitt under

$$M_s = \varepsilon_{cs} \cdot E_p \cdot A_p \cdot (e - Y_t) \quad (4.11)$$

Der ε_{cs} beregnes etter regler i NS-EN 1992-1-1 (2004, pkt. 3.1.4 og tillegg B), og Y_t er avstanden mellom tyngdepunktsaksene tpb og tp , se figur 4.8. Mer om effekten av svinntøyninger i delkapittel 3.2.2, *Svinn*.

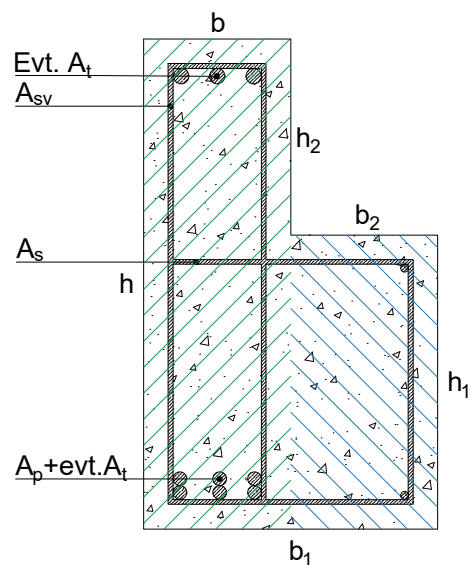
Nedbøyningsbidraget fra nyttelasten beregnes på samme måte som for egenvekten, da også denne forenkles til en jevnt fordelt last på et fritt opplagt hulldekke. Forspenningsmomentet blir beregnet for hvert tilfelle da verdiene for Y_t endres for de ulike lasttilfellenes transformerte tverrsnitt. Antakelsen om at hulldekket er fritt opplagt benyttes i beregningene da dette stemmer for lastpåføringstidspunktet til spennkraften og egenlasten. Senere i kapittelet vil hulldekket bli tilnærmet som fast innspent, noe som er riktig for fastmonteringen av elementene.

Avslutningsvis summeres bidragene og sjekkes opp mot kravene beskrevet i tabell 4.6 for å sjekke om valgt armering er tilstrekkelig.

4.3 Ytterbjelke

Referansebygget består av ytterbjelker og midtbjelker som betegnes hhv. LB- og LFB-bjelker. Disse bjelkene er de eneste horisontale elementene i bygget sett bort fra hulldekkene. Bjelkenes funksjon er opplegg for hulldekkene og har derfor et L-formet tverrsnitt. Den kan og ha andre former med samme funksjon. Først vil LB- bjelken bli nærmere beskrevet.

Det er tatt utgangspunkt i standardbjelker beskrevet med dimensjoner i (Alexander & Vinje, 2010, tabell A 4.10 og A 4.11). Generelt finnes det to hovedtyper av LB-bjelker. Den ene har minste tverrsnittsbredde b , lik søylebredden, og den andre har største bredde, b_1 lik søylebredden. Dette illustreres i figur 4.9. LB-bjelker betegnes $LB\ b/h/L$, med bjelkehøyden h og bjelkelengden L . Hyllehøyden h_1 kan varieres slik at høyden på dekkelementet og høyden h_2 kan samsvare. Valget av LB-tverrsnitt påvirker opplegget for dekkeelementene og plassering av armering. Alexander & Vinje (2010) inneholder grafer og tabeller over kapasiteten til bjelkene, dog er kapasiteten av LB-bjelkene antatt med en B45 betong i disse. Det er derfor nødvendig å gå mer i detalj i dimensjoneringen for å kunne variere fastheten i optimaliseringen.



Figur 4.9: Generell utforming av en LB-bjelke med mål. Hovedbjelke (venstre) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre) skravert i blått.

4.3.1 Dimensjonering

Ved dimensjonering av en LB-bjelke deles tverrsnittet inn i en hovedbjelke og en sekundærbjelke, som vist i figur 4.9 med skraverte områder. Dimensjoneringen utføres ved å armere utstikket med armeringsbøyler, A_s , som overfører de horisontale kreftene fra dekket inn i hovedbjelken. I tillegg armeres hovedbjelken med bøylearmering, A_{sv} , som opptar vertikallasten fra dekket. Hovedbjelken dimensjoneres med strekk-, A_p , og trykkarmering, A_t , hvis nødvendig. Det antas at tverrsnittet er opprisset.

Armeringsbøyler

Sekundærbjelken opptar lasten fra hulldekkeelementet. Dimensjoneringsprinsippet er beskrevet i Vinje et al. (2013). Kreftene det tas hensyn til er oppleggkraften, N_{Ed} , fra hulldekkene i tillegg til skivekrefter og volumkrefter, H_{Ed} (se figur 4.10). Oppleggskraften beregnes ved å gjøre om det dimensjonerende momentet fra tabell C.1 til en jevnt fordelt last.

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} \cdot L^2}{8} \Rightarrow N_{Ed} = \frac{M_{Ed} \cdot 8}{L^2} \quad (4.12)$$

I tillegg antas den horisontale lasten å være $H_{Ed} = 20\text{ kN/m}$ som er et minimum som beskrevet i Vinje et al. (2013, pkt. 8.4).

skal dimensjoneres for skjærkraften pga N_{Ed} . For normale tverrsnitt kan denne armeringen beregnes ut fra størrelsen på N_{Ed} alene.

$$A_{sv} = \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \quad (4.18)$$

Lengdearmering i hovedbjelken

Når sekundærbjelken overfører kreftene til hovedbjelken skal hovedbjelken dimensjoneres tilsvarende en rektangulær bjelke. For å øke kapasiteten armeres denne med spennarmering. Dimensjoneringen gjøres i bruddgrensetilstand med et dimensjonerende moment, M_{Ed} . Egenvekten varierer ikke etter valgt tverrsnitt for bjelken, som tidligere beskrevet i 4.1, *Forutsetninger*.

Dimensjoneringen av tverrsnittet gjøres ved momentlikevekt av ytre påført moment og indre motstandsmoment, M_{Rd} . Den indre momentarmen for tverrsnittet, z , defineres ut fra trykksonehøyden αd . Definisjonen av trykksonehøyden beregnes ved aksiell likevekt mellom trykksonerresultanten, T_c , og kraften i spennarmeringen, S_p . Størrelsen på S_p påvirkes av om spennarmeringen flyter eller oppfører seg elastisk. Da mengden armering ikke er kjent ved dimensjonering kan ikke denne kraften beregnes. Det må derfor antas en verdi for α . For å oppnå et duktilt tverrsnitt armeres bjelken underarmert tilsvarende slakkarmerte tverrsnitt. Av erfaring viser det seg at $\alpha = 0,4$ vil gi tilstrekkelig duktilitet før brudd (Sørensen, 2017). Fra tverrsnittets momentkapasitet, formel (4.3), $M_{Ed} = M_{Rd}$ og $\alpha = 0,4$ gis $d_{n\odot dv}$.

$$d_{n\odot dv} = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{0,269 f_{cd} b}} \quad (4.19)$$

Da betongtverrsnittet er kjent i dette tilfellet, er også d kjent. For tverrsnitt med $d > d_{n\odot dv}$ vil nødvendig spennarmering utledes ved momentlikevekt om trykksonerresultanten. Da vil ikke tverrsnittets trykksone være fullt utnyttet, men delvis.

$$A_p \cdot f_{pd} \cdot z = M_{Ed} \quad \Rightarrow \quad A_p = \frac{M_{Ed}}{f_{pd} \cdot z} = \frac{M_{Ed}}{f_{pd} \cdot 0,84d} \quad (4.20)$$

$$z = (1 - 0,4\alpha)d \quad \Rightarrow \quad z = 0,84d \quad (4.21)$$

Det kan oppstå situasjoner der $d < d_{n\odot dv}$, da tverrsnittet er kjent, og betongen vil da knuse på trykksiden. Dette løses ved å øke trykksonekapasiteten med trykkarmering med høyere fasthet enn betongen.

Trykkarmering

For å øke trykkkapasiteten til tverrsnittet armeres trykksonen med slakkarmering, A_t . Trykksonen vil få økt kapasitet da armeringen har høyere fasthet enn betongen. Økes trykksonekapasiteten må strekksonen økes tilsvarende for å beholde momentlikevekt. Slakkarmeringen legges derfor også i strekksonen. Trykkarmeringen skal oppta momentet som overskrider momentkapasiteten, ΔM_{Ed} . Den indre momentarmen for slakkarmeringen, h' , er avstanden mellom tyngdepunktene til A_p og A_t .

$$A_t = \frac{M_{Ed} - M_{Rd}}{f_{yd}h'} = \frac{\Delta M_{Ed}}{f_{yd}h'} \quad (4.22)$$

Den totale armeringen på trykksiden, A_t , og strekksiden, A_s , blir da:

$$A'_s = A_t : \quad A_s = A_p + A_t \quad (4.23)$$

4.3.2 Antakelser**Generelt**

LB-bjelker kan variere i høyden, som nevnt innledningsvis, og variasjonen i h_1 kan gjøres uavhengig. I beregningene er h_1 avhengig av hulldekketykkelsen slik at elementene flukter i overkant. Det kan og dimensjoneres med en høyere LB-bjelke (h_2) for senere påstøp av hulldekke.

I tillegg antas det at LB-bjelkens hovedbjelke kan dimensjoneres som en rektangulær bjelke. Den sekundære bjelken vil påvirke kapasiteten til tverrsnittet, men det er ikke hensyntatt. Dette er antas å være konservativt da et større tverrsnitt vil gi høyere kapasitet.

Ved behov for trykkarmering må det være tilstrekkelig plass til både bøyler og slakkarmering i hovedbjelken, i tillegg til tilstrekkelig avstand mellom armeringstengene for å oppnå god heft. Det er derfor kontrollert manuelt at det ikke blir for mange lag med armering. Plassering av armeringen løses ved bunting.

Deformasjonsberegning

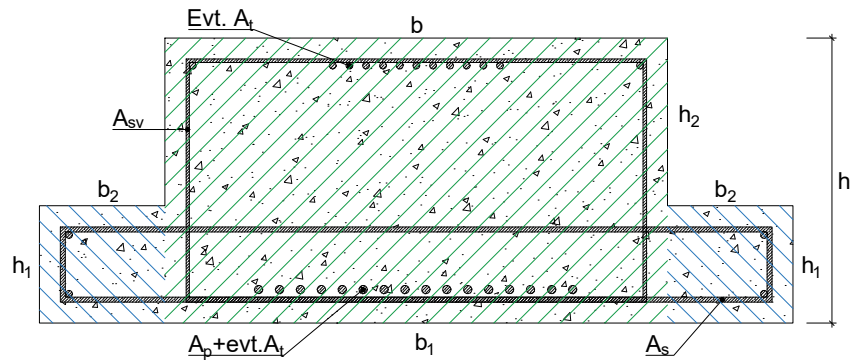
Standardbjelkene nevnt i Alexander & Vinje (2010) beregnes ikke for deformasjon. Det antas, i samsvar med veilder, at deformasjon av bjelken ikke er dimensjonerende og at kravene oppfylles.

Momentstiv forbindelse

For en oppleggsbjelke vil lasten fra dekkeelementene angripe eksentrisk i forhold til tyngdepunktet til bjelken. Valget av forbindelse vil påvirke om bjelken må dimensjoneres for torsjonskrefter, og dette påvirker igjen om LB-bjelke/søyle-forbindelsen kan oppta torsjon. Om søylene kan oppta momenter og da må dimensjoneres for horisontale krefter påvirker også valget. I følge Vinje et al. (2013) vil vurderingen av konsekvensene gjøre at bjelke/dekke-forbindelsen som oftest utføres momentstiv, og torsjonskreften kan derfor neglisjeres. Dette resulterer i at spennvidden til dekkeelementet utvides til bjelkens tyngdepunkt.

4.4 Midtbjelke

Midtbjelken kan den enten dimensjoneres som en dobbel LB-bjelke, kalt DLB, eller som en lav-flens-bjelke, LFB. Den har dobbelt opplegg, illustrert i figuren under, og følgelig dobbel last. LFB-bjelken har svært lav hyllehøyde og må derfor dimensjoneres ved prøving (Alexander & Vinje, 2010). En LFB-bjelke kan derimot dimensjoneres som en DLB-bjelke hvis hyllehøyden er større enn 140 mm , og det er derfor valgt å kun bruke dette. Dimensjoneringen av bjelkene gjøres på tilsvarende måte som LB-bjelken og det er derfor valgt å henviser til forrige delkapittel for dimensjoneringen av midtbjelken.



Figur 4.11: Generelle utforming av en midtbjelke/DLB-bjelke. Hovebjelke (midten) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre/venstre) skravert i blått.

5 Optimalisering

Klimagasskalkulatoren dimensjonerer de aktuelle betongelementene basert på ulike inputverdier som fasthet, armeringsdiameter, last osv. I tillegg er det ulike kvaliteter og egenskaper som elementene skal tilfredstille, slik som duktilitet, bestandighet og geometri. Disse ulike parameterne vil påvirke mengden CO_2 -utslipp i varierende grad. Flere av parameterne vil ikke kunne varieres enkeltvis uten å påvirke andre parametere, ettersom en endring må kompenseres for gjennom ulike sammenhenger. Dette kapittelet er bygget opp slik at dette skal komme tydelig frem. Optimaliseringspunktene det er fokusert på vil bli presentert, samt enkelte som er valgt bort. Som nevnt i kapittel 1, *Innledning* vil ikke kostnader bli hensyntatt i optimaliseringen. Først beskrives mengdeberegningene fra Rønning et al. (2019) som finner betongvolum og armeringsmengde.

5.1 Mengdeberegning

Ved kalkulering av antall $kg CO_2$ – *ekv.* er to av inputverdiene antall spenn og meter hulldekke. Denne beregningen er uavhengig valget av tverrsnitt og armeringsmengde. Resultatet av klimagassberegningene vil være avhengig av hvilken spennlengde som antas for de ulike elementene. I dette delkapittelet vil mengdene oppgitt i Rønning et al. (2019) bli presentert. Det var viktig å kontrollere disse for å oppnå sammenlignbare resultater.

Bygget har en grunnflate på $15,9 \times 50,4 m^2$ der hulldekkene har to spenn over kortsiden. Lengden til hulldekke vil være avhengig av toppbredden på ytterbjelken og midtbjelken. Armeringen til dekket beregnes etter Rønning et al. (2019, Tabell 2-6 og 2-7), i tillegg til Arcon Prosjekt AS (2019, Tabell 10.1). Disse tabellene er gjengitt under. Mengdeberegningen vil gi en oversikt over hvor de ulike betong- og armeringsmengdene befinner seg i bygget og hvor det lønner seg å optimalisere.

	Dimensjon		Slakkarmering	Spennarmering	Bøylearmering
Hulldekker	HD200	B45	-	5 spenntau	-
Ytterbjelker	LB 300x500	B45	4ø16	5 spenntau	39 ø6/210
Midtbjelker	LFB 600x200	B45	3ø16	20 spenntau	60 ø8/120
Gjennomgående stålarmoring i fuge				2ø16 + 1ø20	
Samlet stålmengde pr etasje (uten søyler)				5545 kg pr etasje	

Figur 5.1: Tverrsnittsdimensjoner og armeringsmengde av forspente betongelementer brukt i referansebygget. Fra *Klimagass-regnskap av tre- og betongkonstruksjoner* (Rønning et al., 2019, tabell 2-6).

Plassering	Dimensjon		Slakkarmering	Bøylearmering
4 etg	200x200	B30	4ø16	19 ø8/180
4 etg midtakse	200x200	B45	4ø16	14 ø8/240
3 etg	200x200	B45	4ø16	20 ø10/170
3 etg midtakse	250x250	B45	4ø20	14 ø12/240
1-2 etg	275x275	B45	4ø20	16 ø10/210
1-2 etg midtakse	325x325	B45	4ø25	16 ø10/210
Skive i langvegg	3,6 x 13,2 x 0,200	B30	6,5 kg stål/m ²	
Skrive i kortvegg	4,0 x 13,2 x 0,200	B30	7,3 kg stål /m ²	

Figur 5.2: Tverrsnittsdimensjoner, betongkvalitet og armeringsmengde etasjevis brukt i referansebygget. Fra *Klimagass-regnskap av tre- og betongkonstruksjoner* (Rønning et al., 2019, tabell 2-7).

Betongbygg				Armering				
Bertong Etasjer	Veggskive [m3]	Totalt volum [m3]	Volum/etg. [m3/etg]	Total tyngde [t]	Tyngde/etg. [t]	Slakkarm. Totalt [t]	Spenntau Totalt [t]	
4	40,1	480	120	27,32	6,83	13,04	14,28	
8	160,5	1051	131,4	70,98	8,87	42,41	28,57	
16	507	2408	150,5	155,55	9,72	98,41	57,14	

Figur 5.3: Totale mengder betong over marknivå, og armering for byggene på 4, 8 og 16 etasjer i Rønning et al. (2019) i m^3 . Total tyngde armering inkluderer både slakk- og spennarmering og oppgis i tonn. Fra *Oppdragsrapport rev b - eksempelbygg Namsos* (Arcon Prosjekt AS, 2018, Tabell 10.1, redigert)

5.2 Optimaliseringspunkter

Dette delkapittelet tar for seg de ulike parameterne det er mulig å variere i klimagasskalkulatoren. Variering av disse parametrene vil påvirke klimagassregnskapet og her utforskes virkningene av dette. I tillegg blir det presentert en øvelse utført i Excel der klimagassutslipp ble beregnet for ulike α -verdier.

Karbonklasse

Variasjon av karbonklasse innenfor samme fasthet vil gi direkte virkning, da en strengere karbonklasse gir reduksjon i utslippene per m^3 . Å velge høyere fasthet innen samme karbonklasse gir større utslipp, men å velge en strengere karbonklasse kan kompensere for dette. Dette kan observeres i figuren under. Variasjonen av fasthet innad en karbonklasse beskrives i et senere avsnitt.

Behovet for høyere fasthet kan oppstå når det er behov for trykkarmering, da en høyere fasthet kan kompensere for dette. Utslipet fra trykkarmeringen må da være større enn differansen i utslipp mellom de to alternative fasthetene.

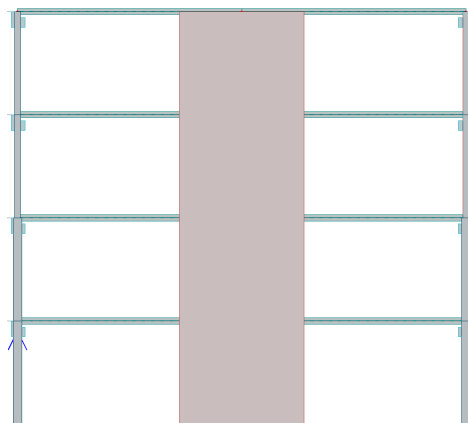
Fasthetsklasse og lavkarbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
Bransjereferanse	240	260	280	330	360	370	380
Lavkarbon B	190	210	230	280	290	300	310
Lavkarbon A	170	180	200	210	220	230	240
Lavkarbon Pluss	-	-	150	160	170	180	190
Lavkarbon Ekstrem	-	-	110	120	130	140	150

Figur 5.4: Gjentakelse av tabell 3.13. Maksimale tillatte klimagassutslipp, $kg CO_2 - ekv. pr. m^3$ betong angitt etter fasthet. Fra *Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong* (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1, redigert).

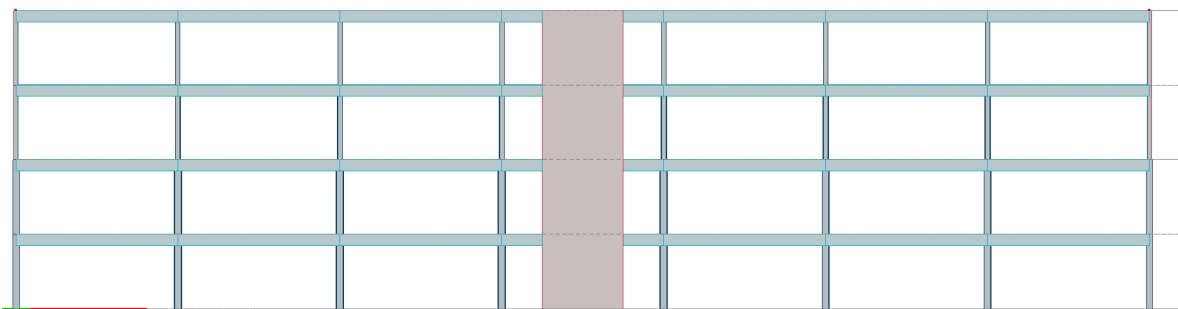
Geometri

Bygget består av 2×7 spenn, som vist i figurene 5.5 og 5.6. Romprogrammet er det hovedsakelig arkitekten som har ansvar for og søyleplasseringen følger dette. Arcon har i tidligere prosjekter konkludert med at to spenn er mer gunstig enn ett, og derfor er dette valgt.

Klimagasskalkulatoren dimensjonerer etter standard tverrsnitt beregner nødvendig armeringsmengde. Alt av armering må derfor plasseres innenfor tverrsnittets geometri. Behovet for større tverrsnitt vil oppstå når det ikke er plass til armering eller nødvendig overdekning ikke overholdes. Det er antatt at armeringsplasseringen i tverrsnitt med mye armering kan løses ved bunting.



Figur 5.5: Snitt av kortsiden som viser 2 spenn. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.



Figur 5.6: Snitt av langsiden som viser 7 spenn. Fra FEM-design-modellen laget av Arcon.

Betongfasthet

Variasjon av fasthet vil påvirke utslippet, da økt fasthet isolert sett vil gi høyere utslipp, som vist i figur 5.4. Trykkfastheten til betongen avgjør trykksonekapasiteten og mengden trykkarmering. For tverrsnitt med $d > d_{n\ddot{o}dv}$ vil det ikke være behov for trykkarmering, da tverrsnittets trykksone ikke vil være fullt utnyttet.

I Arcon Prosjekt AS (2019) nevnes endring av betongkvalitet fra B45 til B30 i de horisontale elementene som et utslippsreducerende tiltak. Dette endrer ifølge Arcon Prosjekt AS (2019) ikke armeringsmengden i hulldekkene og LB-bjelkene. LFB-bjelkene må derimot 550 kg ekstra armering med denne endringen. Dette kan komme av at hulldekkene og LB-bjelkene i utgangspunktet hadde lite utnyttet trykksone og en reduksjon av fastheten ikke vil gi trykkarmering, mens det motsatte gjelder for LFB-bjelkene. Rønning et al. (2019) bruker kun EPD-er for fasthet B45 for de horisontale elementene, så fasthetsendringen er ikke gjennomført.

Armeringsdiameter φ

Endring av armeringsdiameter til skjærbøylene, φ_v , vil gi store variasjoner i kg armering for ytterbjelken. Dette skyldes anbefalingen om senteravstanden mellom bøyene, c , ikke overskrider største tillatte senteravstand $c_{max} = \min(h_1; 500mm)$. Ved å velge φ_v slik at c blir større enn anbefalingen, vil det legges inn for store armeringsbøyler med $c = c_{max}$. Dette fører til at disse ikke blir fullt utnyttet. Klimagasskalkulatoren varsler når $c > c_{max}$ og φ burde reduseres. Det er valgt å ha dette som en varierende parameter selv om det kan gi økt armeringsarbeid på fabrikk.

Variasjon av armeringsdiameter til lengdearmeringen, φ_l , antall stenger og hvordan disse plasseres i tverrsnittet vil gi utslag på beregningene. Nødvendig armeringsareal gir nødvendig antall stenger ved å runde opp. Denne økte armeringen vil muligens gi et høyere antall kg armering og dermed økt utslipp.

Diameteren til spennarmeringen varierer mellom hulldekke- og bjelkeberegningene. Spennarmering har generelt lavere resirkuleringsgrad enn slakkarmering, og dermed høyere utslipp pr. kg. Økt spennarmering kan derimot lønne seg da effekten gjerne er større enn økt slakkarmering.

Tverrsnitt, med fokus på høyden h

Å variere tverrsnittshøyden påvirker den indre momentarmen til tverrsnittet direkte. Det er valgt å ha dette som en varierende parameter, selv om LFB-bjelker ofte velges for å begrense byggehøyden. Dette vil enten gi tverrsnittet større kapasitet med samme lengdearmering, eller redusere nødvendig lengdearmering. Nedgangen i utslipp fra mindre lengdearmering som følge av økt høyde, må være relativt høyere enn økt utslipp fra mer lengdearmering for et lavere tverrsnitt, skal det lønne seg å øke høyden.

Et høyere tverrsnitt vil påvirke bøylearmeringen i LB-bjelken. Største tillatte senteravstand vil øke proporsjonalt med hyllehøyden, som vil redusere antall armeringsbøyler. Da tverrsnittet har større omkrets ved en høydeøkning vil også bøyene bli lengre, som fører til større armeringsmengde og større utslipp. Reduksjon av armeringsdiameteren som et kompenserende tiltak er beskrevet tidligere.

5.3 Variasjon av trykksonehøydefaktor α

Variasjon av trykksonehøyde varierer mengden armering i tverrsnittet. Som en øvelse ble det utført en enkel beregning av utslipp til en bjelke der verdien for α varierte fra 0,3–0,6. Valget av α påvirker seigheten i tverrsnittet, og kravet til tilstrekkelig seighet må defineres ved prøving og erfaring. Det ble tatt utgangspunkt i en normalarmert bjelke med følgende forutsetninger:

- $\alpha = 0,412$
- $h = 400 \text{ mm}$
- $b = 300 \text{ mm}$
- $f_{cd} = 35 \text{ MPa}$

For disse parametrene ble momentkapasiteten, M_{Rd} , beregnet, og tilsvarende nødvendig armeringsmengde. Dette momentet ble videre brukt som dimensjonerende moment for

varierende α -verdier. Dette ga tilhørende tverrsnitt og armeringsmengde med $d = d_{n\odot dv}$. Total mengde betong og armering ble beregnet for bjelken pr. meter, og utslippet ble bestemt deretter.

Formålet med øvelsen var å undersøke hvor stor effekt på utslippet en høyere eller lavere verdi av α ville ha, sammenlignet med den normalarmerte verdien som ofte benyttes i dagens dimensjonerings situasjoner. Ved å fortsatt holde tverrsnittet underarmert vil det være seighet i tverrsnittet før brudd, og om det kan redusere utslippet vil det være en endring verdt å vurdere.

Resultatet av øvelsen presenteres i kapittel 6, *Resultat* og en kort diskusjon av temaet finnes i kapittel 7, *Diskusjon*.

5.4 Andre optimaliseringspunkter

Formålet med masteroppgaven er beskrevet i kapittel 1, *Innledning* og dette gir begrensninger på hvilke parametere det er valgt å variere i beregningen av utslippet. I dette delkapittelet nevnes kort enkelte parametere som kan være viktige, men som ikke er hensyntatt i denne masteroppgaven.

Last

Variasjon av laster vil påvirke utslippet i form av økt eller redusert dimensjonerende last, og tilsvarende for nedbøyning. Den dimensjonerende lasten vil gi endret $d_{n\odot dv}$ og dermed behov for et annet tverrsnitt, og eventuelt trykkarmering. Hvordan et høyere tverrsnitt eller tilsatt trykkarmering vil påvirke utslippene er beskrevet i forrige delkapittel.

Spennvidde L

Variasjon av spennvidde, L , vil påvirke flere av parametere, slik som nedbøyning, egenlast, dimensjonerende krefter og kapasitet. Som nevnt i kapittel 2.1, *Begrensinger* er det valgt å ikke variere spennvidden.

Eksponering- og bestandighetsklasse

Som beskrevet i teorikapittelet vil valg av eksponering- og bestandighetsklasse påvirke masseforholdet i betongblandingen, som henger sammen med fasthetsklasse. Denne sammenhengen vil dermed påvirke klimagassberegningene på samme måte som det tidligere ble beskrevet for betongfasthet. En høyere bestandighetsklasse som M90 vil gi et masseforhold som passer best til en B20 betong, for eksempel.

6 Resultat

I dette kapitlet presenteres resultatene av beregningene utført i klimagasskalkulatoren. Det innledes med en mengdeberegning der betong- og armeringsmengdene benyttet i beregningene blir presentert. Videre fremgår klimagassutslippene til hele bygget som en total, og elementvis for hhv. hulldekke, midt- og ytterbjelkene. Til slutt presenteres resultatene oppnådd ved variasjon av α .

6.1 Mengdeberegning

Som tidligere nevnt har mengdeberegningene i Rønning et al. (2019) og Arcon enkelte ulikheter for både betong og armering. De oppgitte mengder ble det etterstrebet å etterligne i Excel slik at beregningene utført i klimagasskalkulatoren kunne anses validerte i størst mulig grad. I dette delkapitlet presenteres resultatene av mengdeberegningene utført i Excel. Siste avsnitt omhandler 8 ulike caser, disse presenteres og beskrives nærmere i neste delkapittel.

Armering

Tabellen i figur 6.1 viser beregnet armeringsmengde for hver enkel konstruksjonsdel, og for bygget totalt. Sammenligningsgrunnlaget fra Rønning et al. (2019) ble oppgitt i *kg* armering for både spenn- og slakkarmeringen. Det er forsøkt å etterligne de oppgitte resultater med gitte mengder for hver del. Dette lyktes derimot ikke helt, som totalmengden viser, og dette diskuteres nærmere i kapittel 7, *Diskusjon*.

Armeringsmengderegnskap								
Horisontalt					Vertikalt			
Element	pr. plan [m ³]	pr. plan [kg]	Totalt [m ³]	Totalt [kg]	Søyler			
Ytterbjelker					Etasje	Totalt [m ³]	Totalt [kg]	
Slakkarm.	0,101	796	0,406	3 185	4.etasje	0,050	394	
Spennarm.	0,070	550	0,280	2 200	4.etasje	0,018	142	
Midtbjelker					3.etasje	0,055	433	
Slakkarm.	0,064	504	0,257	2 015	3.etasje	0,032	248	
Spennarm.	0,101	791	0,403	3 165	2.etasje	0,083	648	
Hulldekker					2.etasje	0,046	364	
Slakkarm.	-	-	-	-	1.etasje	0,083	648	
Spennarm.	0,332	2 605	1,327	10 419	1.etasje	0,046	364	
Sum					Sum	0,413	3 241	
Slakkarm.	0,166	1 300	0,663	5 201	Skivevegg			
Spennarm.	0,503	3 946	2,011	15 783	Element	Antall	Totalt [kg]	
					Langvegg	2	618	
					Kortvegg	2	771	
					Sum		1 389	
Beregnet total mengde								
	Kalkulator	Rønning						
Type	[kg]	[kg]	Diff. [kg]	Diff. [%]				
Slakkarm.	9 831	10 773	- 942	-9 %				
Spennarm.	15 783	14 280	1 503	11 %				

Figur 6.1: Armeringsmengder beregnet i Excel etter verdier fra Rønning et al. (2019). Total mengde sammenlignet med mengdene fra Rønning et al. (2019).

Betong

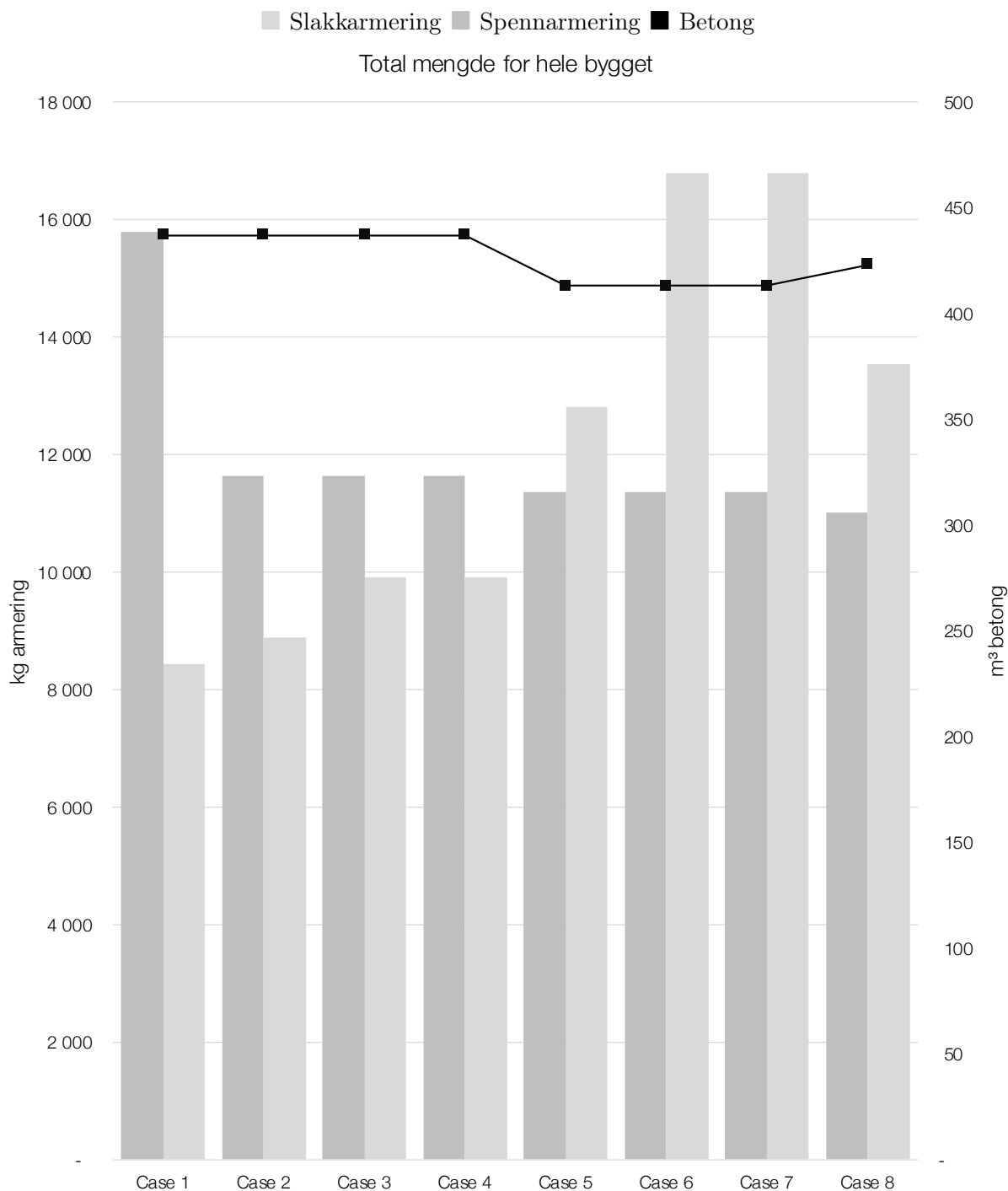
Total mengde betong beregnet i Excel er tabellert i figuren under. Målet var å oppnå lik mengde som Rønning et al. (2019), og verdiene for spennvidder, tverrsnitt o.l. ble hentet derfra.

Betongmengderegnskap					
Etasjehøyde, l	3,3 m	Antall spenn langside		7 stk	
Antall etasjer	4 stk	Antall spenn kortside		2 stk	
Hulldekke, L	7,9 m				
Ytterbjelke, L	7,2 m				
Midtbjelke, L	7,2 m				
Horisontalt					
Element	pr. plan [m]	Totalt [m]	[m ²]	Tv. snitt: [mm ²]	Totalt [m ³]
Ytterbjelker	100,8	403,2		120 000	48,4
Midtbjelke	50,4	201,6		245 982	49,6
Hulldekke	663,6	2654,4	3185	120 754	320,5
Sum					418,5
Vertikalt					
Søyler					
Etasje	Akse	Antall	pr. etasje [m]	Tv. snitt: [mm ²]	Totalt [m ³]
4.etasje	yttre x 2	16	52,8	40 000	2,1
4.etasje	midt	6	19,8	40 000	0,8
3.etasje	yttre x 2	16	52,8	40 000	2,1
3.etasje	midt	6	19,8	62 500	1,2
2.etasje	yttre x 2	16	52,8	75 625	4,0
2.etasje	midt	6	19,8	105 625	2,1
1.etasje	yttre x 2	16	52,8	75 625	4,0
1.etasje	midt	6	19,8	105 625	2,1
Sum					18,4
Skivevegg					
Element	Stk.	Høyde [m]	Totalt [m]	Tv. snitt: [mm ²]	Totalt [m ³]
Langvegg x 2	2	13,2	26,4	720 000	19,0
Kortvegg x 2	2	13,2	26,4	800 000	21,1
Sum					40,1
Beregnet total mengde					
	<u>Kalkulator</u>	<u>Rønning</u>			
	[m ³]	[m ³]	Diff. [m ³]		
Betong	477,1	477,0	0,1		

Figur 6.2: Betongmengder beregnet i Excel etter verdier fra Rønning et al. (2019). Total mengde sammenlignet med mengdene fra Rønning et al. (2019).

6.1.1 Mengdeberegning caser

For hver av de 8 casene som beskrives i neste delkapittel ble det beregnet total mengde betong i m^3 og slakk- og spennarmering i kg . Dette ble gjort for å studere sammenhengen mellom redusert utslipp og en evt. mengdereduksjon. Resultatet fra mengdeberegningen er presentert i figur 6.3.



Figur 6.3: Figuren viser kg armering (stolper) og m^3 betong (linje) for de 8 ulike casene beskrevet i kapittel 6.2, *Klimautslipp for hele bygget*.

6.2 Klimautslipp for hele bygget

Det ble opprettet 8 ulike tilfeller for utslippsberegning i Excel, heretter kalt caser. Casene er alle ulike ved at det inngår ulike parametre og data i beregningene. I tillegg skiller case nr. 1 seg ut ved at dette er en referansecase. Det vil si at dataen benyttet er den som ble brukt i Rønning et al. (2019), for 4 etasjers kontorbygg, for alle konstruksjonsdeler. Dette for å verifisere klimagasskalkulatoren vår. Resultatene fra disse casene vil bli beskrevet videre i dette delkapittelet.

Skilnaden mellom casene er input av tverrsnittsareal og CO_2 -data. Tverrsnittene som brukes skiller mellom betong og armering, der det kun brukes armeringstverrsnittet til Rønning et al. (2019) i referansecasen. De resterende bruker de beregnede, klimagassoptimaliserte, tverrsnittene våre.

Hva gjelder CO_2 -data skiller det og mellom betong og armering. I Rønning et al. (2019) brukes to ulike datakilder. Enten en gjennomsnittsverdi av 4 leverandører, eller en klimaoptimalisert variant, for både betong- og armeringsdataen. Andre datakilder er grenseverdiene oppgitt i NB37 (Norsk Betongforening, 2019) for betong, og EPDer fra leverandørene Celsa og Tyrsa (C&T) for armering (Global Steel Wire S.A., Celsa Group, 2013; Almemark, 2015). Hvilke verdier som brukes i hver case er oppsummert i tabell 6.1.

Tabell 6.1: De 8 forskjellige casene det er beregnet klimagassutslipp for i klimagasskalkulatoren vår med tilhørende CO_2 - data benyttet. Forklaring av de ulike komponentene i avsnittet over.

Case	Tverrsnitt		CO ₂ -data			
	Betong	Armering	Betong		Armering	
			Kilde	Alternativ	Kilde	Alternativ
1: Ref.	Rønning*	Rønning*	Rønning*	Gjennomsnitt	Rønning*	Gj.snitt
2	Rønning*	Våre	Rønning*	Optimal	Rønning*	Opt.
3	Rønning*	Våre	NB37**	Klasse A	C&T***	
4	Rønning*	Våre	NB37**	Klasse Ekstrem	C&T***	
5	Våre	Våre	Rønning*	Gjennomsnitt	Rønning*	Gj.snitt
6	Våre	Våre	NB37**	Klasse B	C&T***	
7	Våre	Våre	NB37**	Klasse A	C&T***	
8	Våre	Våre	NB37**	Klasse Ekstrem	C&T***	

* = Rønning et al. (2019)

** = Norsk Betongforening (2019)

*** = Almemark (2015) & Global Steel Wire S.A., Celsa Group (2013)

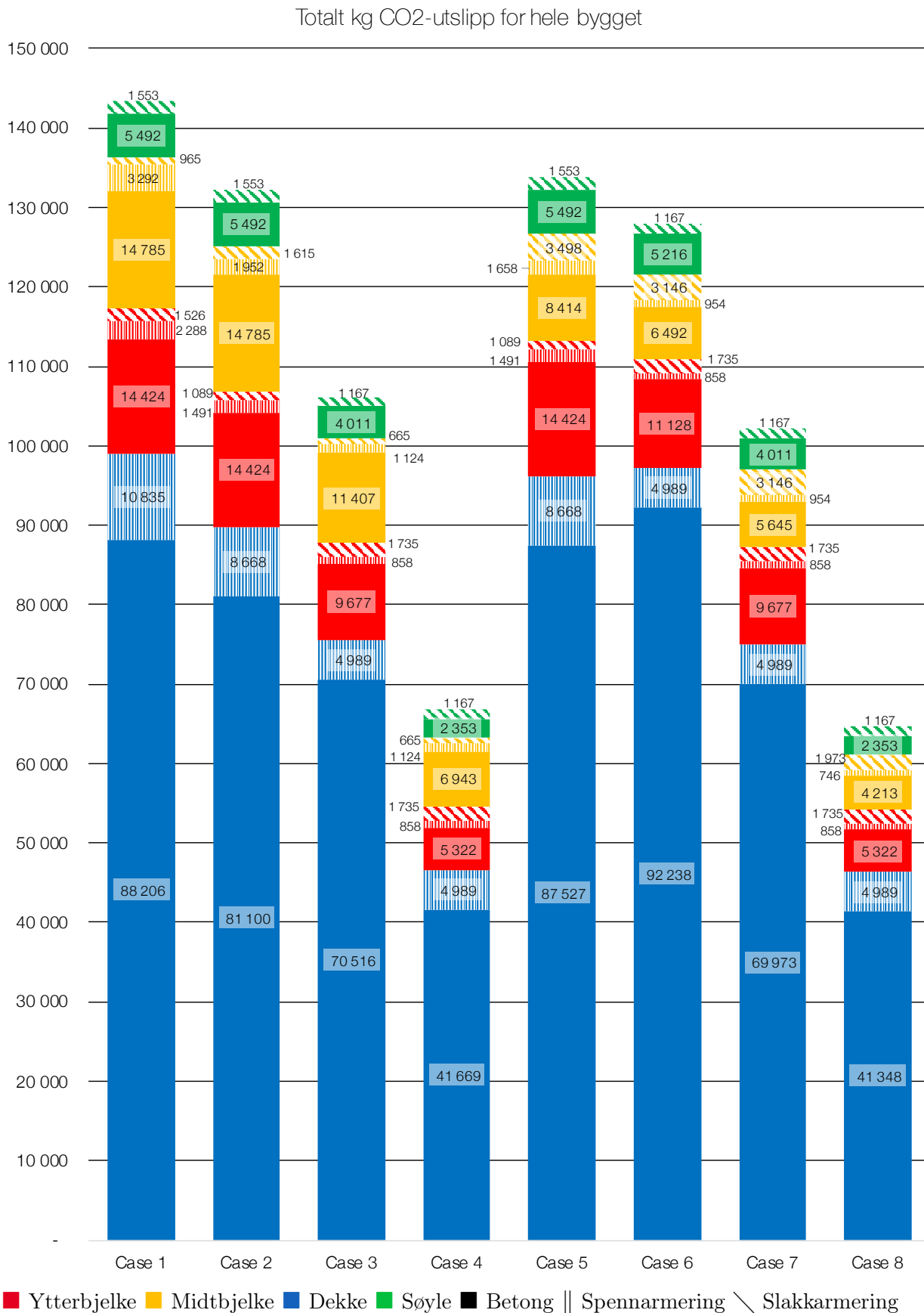
For alle casene gjelder følgende sammenligningsgrunnlag:

- Klimautslipp ble beregnet for fasene A1-A3: vugge-til-port i en LCA. Dette innebærer stadiene råmaterialeproduksjon, transport til fabrikk, og materialefremstilling.
- Veggskivene, fundamentet og fugene mellom dekkene ble utelatt i kalkulatoren og referansebygget. Dette gjelder både betong og aktuell armering.
- Konstruksjonsdelene som ble medregnet var da: hulldekker, ytterbjelker, midtbejelke, søyler, samt tilhørende slakk- og spennarmering.

- Totalt klimagassutslipp fra rapporten for overnevnte konstruksjonsdeler er 142 263 $kg CO_2 - ekv.$ for gjennomsnittsverdiene og 136 908 $kg CO_2 - ekv.$ for de optimerte verdiene.
- Alle casene sammenlignes med gjennomsnittsverdiene i Rønning et al. (2019).

Ved å gjennomføre beregningene i klimagasskalkulatoren vår sammen med inputverdiene i tabell 6.1 vil resultatene fordele seg som vist i figuren på neste side. Søylen er delt opp i de ulike hovedelementene og kodet med farger, nærmere beskrevet under figuren. Armeringen av de ulike elementene er fremstilt i stripete mønster, der slakkarmering er diagonale striper og spennarmering er vertikale. Fargekodene er gjennomgående for de resterende figurene og tabellene i dette delkapittelet.

Resultatene illustrert i figur 6.4 vil bli nærmere presentert. For hver case er det en kort beskrivelse av hensikten, samt de tilhørende resultatene. En kortfattet tabell viser totalt utslipp av $kg CO_2 - ekv.$ for hhv. betong, spenn- og slakkarmering, og totalt. De beregnede verdiene i Excel står under "Beregnet", og verdiene fra Rønning et al. (2019) står under "Rønning (2019)". Antall $kg CO_2 - ekv.$ i differanse oppgis under "Differanse". Til slutt summeres reduksjonen i %. Sirkeldiagrammet for hver case viser fordelingen av, og verdien til, utslippene fra de ulike konstruksjonsdelene, inndelt i betong- og armeringsbidrag.



Figur 6.4: Totalt utslipp for referansebygget fordelt på de ulike casene beskrevet i tabell 6.1 i *kg CO₂ – ekv.*. Figuren viser utslippet fordelt mellom de ulike elementene fra kapittel 4, *Klimagasskalkulator*.

Case 1: Gjenskaping av resultater fra sammenligningsgrunnlag

Hensikten med klimagassberegningne i case 1 var å gjenskape de resultatene oppnådd i Rønning et al. (2019) for å etablere et samsvar mellom rapporten og kalkulatoren. Bra samsvar her er en viktig forutsetning for videre resultater. Dette innebærer at tverrsnittene og armeringsmengden benyttet i Rønning et al. (2019) rapport ble lagt inn, samt rapportens CO_2 -data for de gjennomsnittlige verdiene fra fire leverandører.

Case 1				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	122 907	122 917	10	0,01 %
Spennarmering	16 415	14 851	-1564	-10,5 %
Slakkarmering	4 044	4 495	451	10,0 %
Totalt	143 365	142 263	-1102	-0,8 %

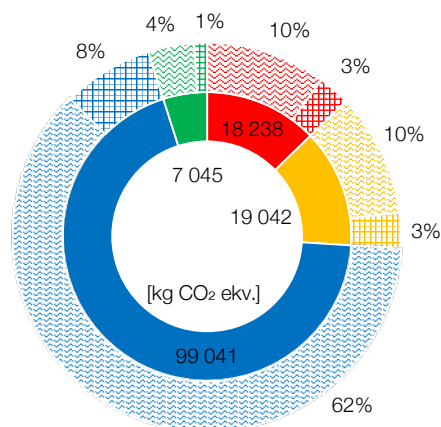
Figur 6.7: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 1. Negativ reduksjonsprosent indikerer økning i utslipp.

Case 2: Optimale CO_2 -data fra grunnlag

Hensikten med klimagassberegningne i case 2 var å bruke tverrsnittene for betong benyttet i Rønning et al. (2019), samt den optimaliserte CO_2 -dataen for betong og armering.

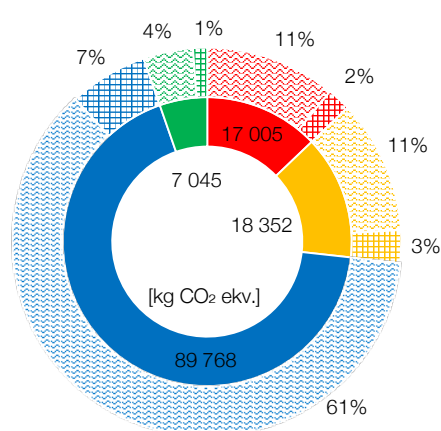
Case 2				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	115 801	122 917	7 115	5,8 %
Spennarmering	12 112	14 851	2 740	18,4 %
Slakkarmering	4 257	4 495	238	5,3 %
Totalt	132 170	142 263	10 093	7,1 %

Figur 6.8: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 2.



Figur 6.5: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 1. Tallene indikerer utslippsverdier.

Figur 6.5: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 1. Tallene indikerer utslippsverdier.



Figur 6.6: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 2. Tallene indikerer utslippsverdier.

Figur 6.6: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 2. Tallene indikerer utslippsverdier.

Case 3: Karbonklasse A, C&T armering og tverrsnitt fra grunnlag

Hensikten med klimagassberegningene i case 3 var å endre CO_2 -data for betongen til karbonklasse A (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1), og bruke en mer miljøvennlig armering hentet fra nye EPDer. Tverrsnittene er de samme som er brukt i Rønning et al. (2019).

Case 3				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	95 610	122 917	27 307	22,2 %
Spennarmering	6 971	14 851	7 880	53,1 %
Slakkarmering	3 567	4 495	928	20,7 %
Totalt	106 148	142 263	36 115	25,4 %

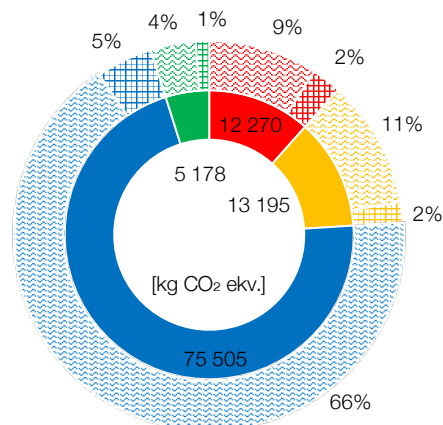
Figur 6.11: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 3.

Case 4: Karbonklasse Ekstrem, C&T armering og tverrsnitt fra grunnlag

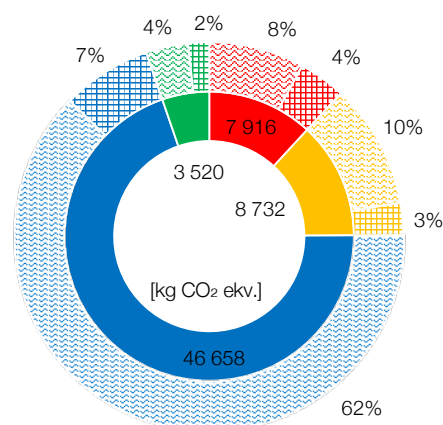
Hensikten med klimagassberegningene i case 4 var å endre CO_2 -data for betongen til karbonklasse Ekstrem (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1), og bruke en mer miljøvennlig armering hentet fra nye EPDer. Tverrsnittene er de samme som er brukt i Rønning et al. (2019).

Case 4				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	56 287	122 917	66 630	54,2 %
Spennarmering	6 971	14 851	7 880	53,1 %
Slakkarmering	3 567	4 495	928	20,7 %
Totalt	66 825	142 263	75 438	53,0 %

Figur 6.12: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 4.



Figur 6.9: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 3. Tallene indikerer utslippsverdier.



Figur 6.10: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 4. Tallene indikerer utslippsverdier.

Case 5: Gjennomsnitt CO_2 -utslipp med optimale tverrsnitt

Hensikten med klimagassberegningene i case 5 var å bruke de klimaoptimaliserte tverrsnittene fra Excel med CO_2 -data fra Rønning et al. (2019). Dataene som ble brukt var gjennomsnittsverdiene for både betong og armering.

Case 5				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO_2 ekv.]			
Betong	115 857	122 917	7 060	5,7 %
Spennarmering	11 817	14 851	3 034	20,4 %
Slakkarmering	6 140	4 495	- 1 645	-36,6 %
Totalt	133 815	142 263	8 449	5,9 %

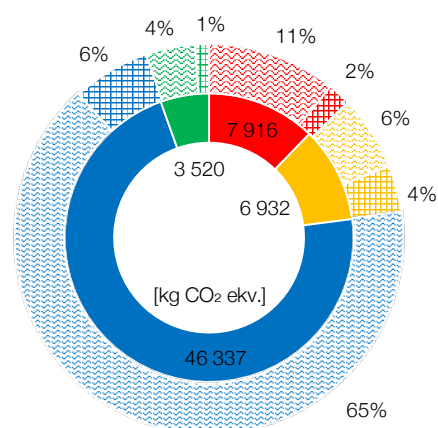
Figur 6.15: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 5.

Case 6: Karbonklasse B, C&T armering og optimale tverrsnitt

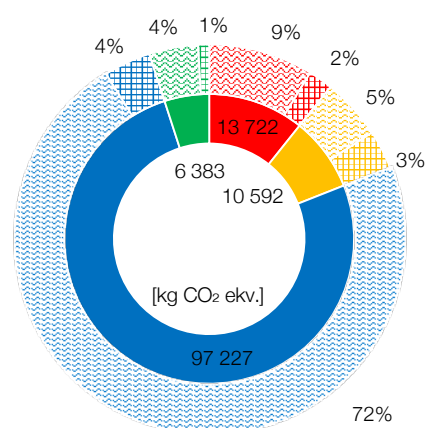
Hensikten med klimagassberegningene i case 6 var å endre CO_2 -data for betongen til karbonklasse B (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1), og bruke en mer miljøvennlig armering hentet fra nye EPDer. Klimaoptimale tverrsnitt fra Excel.

Case 6				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO_2 ekv.]			
Betong	115 073	122 917	7 844	6,4 %
Spennarmering	6 802	14 851	8 049	54,2 %
Slakkarmering	6 048	4 495	- 1 553	-34,5 %
Totalt	127 923	142 263	14 340	10,1 %

Figur 6.16: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 6.



Figur 6.13: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 5. Tallene indikerer utslippsverdier.



Figur 6.14: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 6. Tallene indikerer utslippsverdier.

Case 7: Karbonklasse A, C&T armering og optimale tverrsnitt

Hensikten med klimagassberegningene i case 7 var å endre CO_2 -data for betongen til karbonklasse A (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1), og bruke en mer miljøvennlig armering hentet fra nye EPDer. Klimaoptimale tverrsnitt fra Excel.

Case 7				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	89 306	122 917	33 611	27,3 %
Spennarmering	6 802	14 851	8 049	54,2 %
Slakkarmering	6 048	4 495	- 1 553	-34,5 %
Totalt	102 155	142 263	40 108	28,2 %

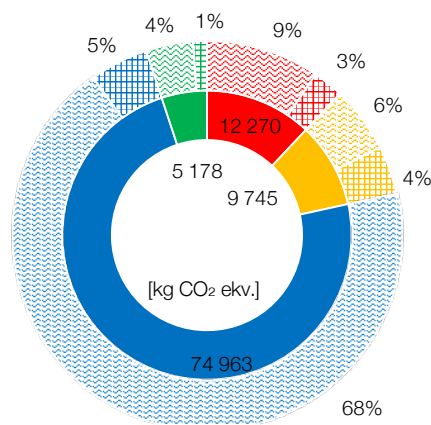
Figur 6.19: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 7.

Case 8: Karbonklasse Ekstrem, C&T armering og optimale tverrsnitt

Hensikten med klimagassberegningene i case 8 var å endre CO_2 -data for betongen til karbonklasse Ekstrem (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1), og bruke en mer miljøvennlig armering hentet fra nye EPDer. Klimaoptimale tverrsnitt fra Excel.

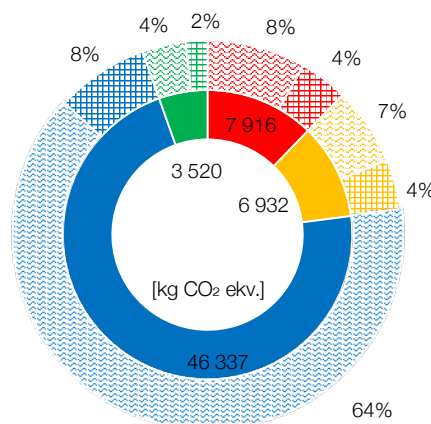
Case 8				
	Beregnet	Rønning (2019)	Differanse	Reduksjon
	[kg CO ₂ ekv.]			
Betong	53 236	122 917	69 681	56,7 %
Spennarmering	6 593	14 851	8 258	55,6 %
Slakkarmering	4 875	4 495	- 380	-8,5 %
Totalt	64 705	142 263	77 558	54,5 %

Figur 6.20: Resultater fra Excel med samlet reduksjon av CO_2 -utslipp for case 8.



Figur 6.17: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 7. Tallene indikerer utslippsverdier.

Figur 6.18: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 8. Tallene indikerer utslippsverdier.



Figur 6.18: Fordelingen av utslipp mellom de ulike elementene for case 8. Tallene indikerer utslippsverdier.

6.3 Elementvise resultater

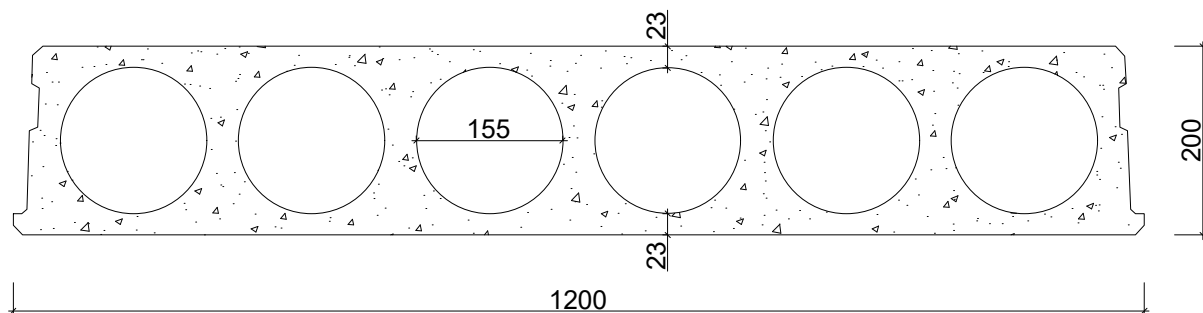
I dette delkapittelet deles resultatene beskrevet i forrige delkapittel opp i konstruksjonsdelene hulldekke, midt- og ytterbjelke. Parametrene som brukes er listet i tabeller og tallfestet for de ulike delene og casene. Utslippene er delt inn i andelen fra betong og armering. For bjelkene spesielt, varierer de forskjellige parametrene for de ulike casene etter den løsningen med minst utslipp.

6.3.1 Hulldekke

Ved bruk av metodene i klimagasskalkulatoren beskrevet i de foregående kapitlene, ble det bestemt et tverrsnitt for hulldekkeelementene med lavest utslipp for de gitte forutsetningene. En sammenslåing av disse forutsetningene og det resulterende tverrsnittet er oppgitt i tabell 6.2, og en tegning av tverrsnittet i figur 6.21. Det bestemte tverrsnittet gjelder for case 5-8 beskrevet tidligere i dette kapittelet. For de resterende gjelder tverrsnittet i Rønning et al. (2019) som har et noe større areal.

Tabell 6.2: Forutsetninger og Excel resultater for hulldekkeelementet med lavest utslipp og tilstrekkelig kapasitet.

Hulldekke	Verdier
Høyde h	200 mm
Bredde b	1200 mm
Spennvidde L	7,9 m
Areal tverrsnitt A	119 824 mm ²
Karbonklasse	Ekstrem
Armeringsdata	C&T
Fasthet betong	45 MPa
Flytespenning spennarmering f_{pd}	1488 MPa
Dimensjonerende moment M_{Ed}	72,6 kNm
Overdekning	35 mm
Effektiv armeringsdiameter φ_{eff}	11,3 mm
Effektivt armeringsareal $A_{p,eff}$	100 mm ²
Nødvendig armeringsareal A_p	327 mm ²
Antall spenntau	4
Totalt spennarmering	24,8 kg
Totalt betong	0,947 m ³
Utslipp armering	14,8 kg CO ₂ – ekv.; 11%
Utslipp betong	123 kg CO ₂ – ekv.; 89%
Totalt utslipp	138 kg CO ₂ – ekv.



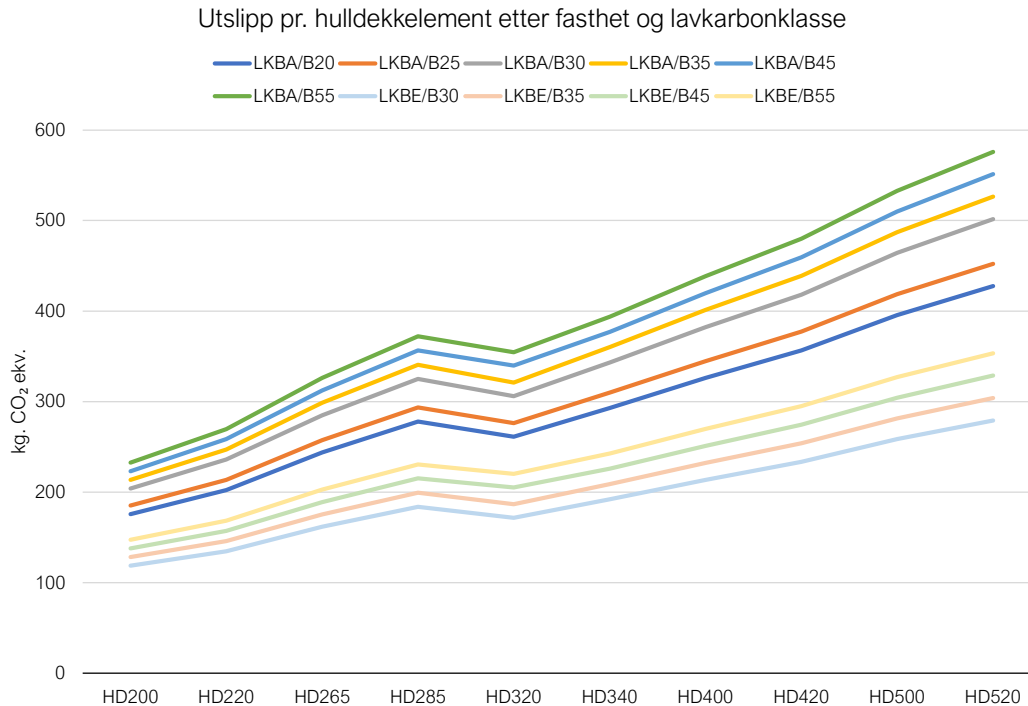
Figur 6.21: Det optimaliserte tverrsnittet for hulldekkeelementene. Fra *Hulldekketyper, tverrsnittsdata*. (NOBI Voss, 2016, redigert).

Som beskrevet i kapittel 4.2, *Hulldekkeelement* beregnes både deformasjoner og kapasitet i klimagasskalkulatoren. Da antall $kg CO_2 - ekv. pr m^3$ betong øker, i verdi ettersom fastheten øker var det ønskelig å oppnå en lavere fasthet enn den benyttet i Rønning et al. (2019), som var $45 MPa$. Dette var mulig å oppnå ved å gå opp i tverrsnittshøyde. HD220 var brukbar mtp. deformasjon og kapasitetskrav med fasthet $35 MPa$, men grunnet den økte betongmengden ville det totale utslippet bli større. Ved bruk av HD265 kunne til og med en B20 betong brukes, i det minste teoretisk. Dette ville derimot også gitt høyere utslipp enn valgt løsning. Da det i tillegg til den økte betongmengden heller ikke vil være mulig å bruke karbonklasse Ekstrem, som kun eksisterer for en fasthet over $30 MPa$. Grunnet dette var $30 MPa$ et mer miljøvennlig valg for HD265. Enkelte ulike kombinasjoner og deres totale utslipp er oppgitt i tabell 6.3.

Tabell 6.3: Ulike kombinasjoner av hulldekkehøyder i ulike fastheter og karbonklasser med tilhørende totalt utslipp beregnet i Excel. klimagassutslipp pr. dekkeelement med bredde $1,2 m$ og lengde $7,9 m$.

Høyde [mm]	Fasthet [MPa]	Karbonklasse	Utslipp [kg $CO_2 - ekv.$]
200	45	Ekstrem	138
220	35	Ekstrem	146
265	30	Ekstrem	162
265	20	A	244
320	30	Ekstrem	172

Det er verdt å bemerke kombinasjonen HD320 B30. Her er utslippet bare $10 kg$ mer enn for HD265 med samme fasthet, og er et bra alternativ skulle et høyere dekke være nødvendig. Grunnen til det relativt lave utslippet er behovet for ett mindre spenntau. Denne effekten er også synlig i figur 6.22 som viser utslippene for de ulike hulldekkene og fasthetsklassene grafisk.



Figur 6.22: Figuren viser utslipp i $kg\ CO_2 - ekv.$ for alle de vurderte hulldekketverrsnittene i to ulike karbonklasser; klasse A og klasse Ekstrem (Norsk Betongforening, 2019, tabell 1) i forskjellige fastheter. Gjelder for hulldekke med bredde 1, 2 m og lengde 7, 9 m.

Generelt fra resultatene kan det bemerkes at kapasitetskravet stort sett er et problem for de lavere fasthetene. Dette kommer fra kravet om at den effektive høyden, d , ikke kan være større enn den beregnede, nødvendige effektive høyden, $d_{n\ddot{o}dv}$, som forklares nærmere i kapittel 4.2, *Hulldekkeelement*.

Utslippstallene beskrevet så langt omhandler kun de laveste verdiene og casene med det optimaliserte tverrsnittet i forrige delkapittel. Klimagassutslippet beregnes med ulike datamateriell og dette påvirker naturligvis utslippene. I tabellen under listes de ulike utslippene for ett hulldekkeelement for de 8 casene.

Tabell 6.4: Utslipp for et enkelt hulldekkeelement for de 8 ulike casene. Høyest og lavest verdi er markert i hhv. rødt og grønt.

Case	Utslipp [$kg\ CO_2 - ekv.$]		
	Betong	Spennarmering	Totalt
1	263	32	295
2	241	26	267
3	210	15	225
4	124	15	139
5	260	26	286
6	274	15	289
7	208	15	223
8	123	15	138

6.3.2 Ytterbjelke

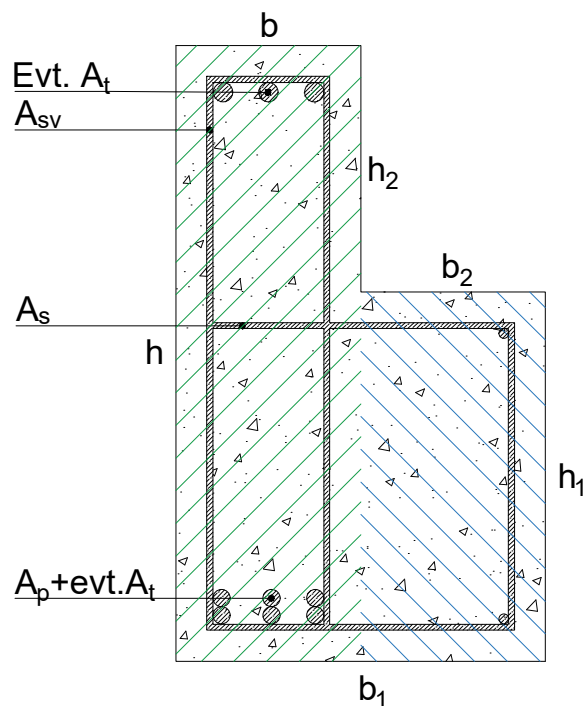
Resultatene fra klimagasskalkulatoren beskrevet i kapittel 4, *Klimagasskalkulator*, for ytterbjelken er presentert i tabell D.1, i vedlegg D. Det totale utslippet er oppgitt for en LB-bjelke med spennvidde 7,2 m. Resultatene er noe ulike for de 8 casene, men inneholder mye av de samme betong- og armeringsmengdene. Kalkulatoren beregner utslippet for gitte inndata for alle standard tverrsnitt, samt tar hensyn til at redusert fasthet kan kompenseres med trykkarmering. Tabellen er bygget opp slik at de vertikale strekene skiller egenskaper og mengder som er ulike for de andre casene. Tverrsnittet er likt for alle de 8 casene.

I tabellen er Case 1 og 2 utført i B45. Det samme gjelder case 5, da tallene til Rønning et al. (2019) kun gjelder for B45. For alle casene er det behov for trykkarmering. Det er antatt at spennarmeringen beregnet av Arcon i case 1 inkluderer andelen armering som legges i strekksonen når det trykkarmeres. Selv om økt armering gir høyere utslipp, vil reduksjonen av $kg/CO_2 - ekv. pr. m^3$ betong være relativt større enn det økte utslippet for caser med B45. Derfor er utslippet konsekvent større for B45 alternativene kontra B30. Case 3, 4, 6, 7 og 8 er helt identiske bortsett fra karbonklassene.

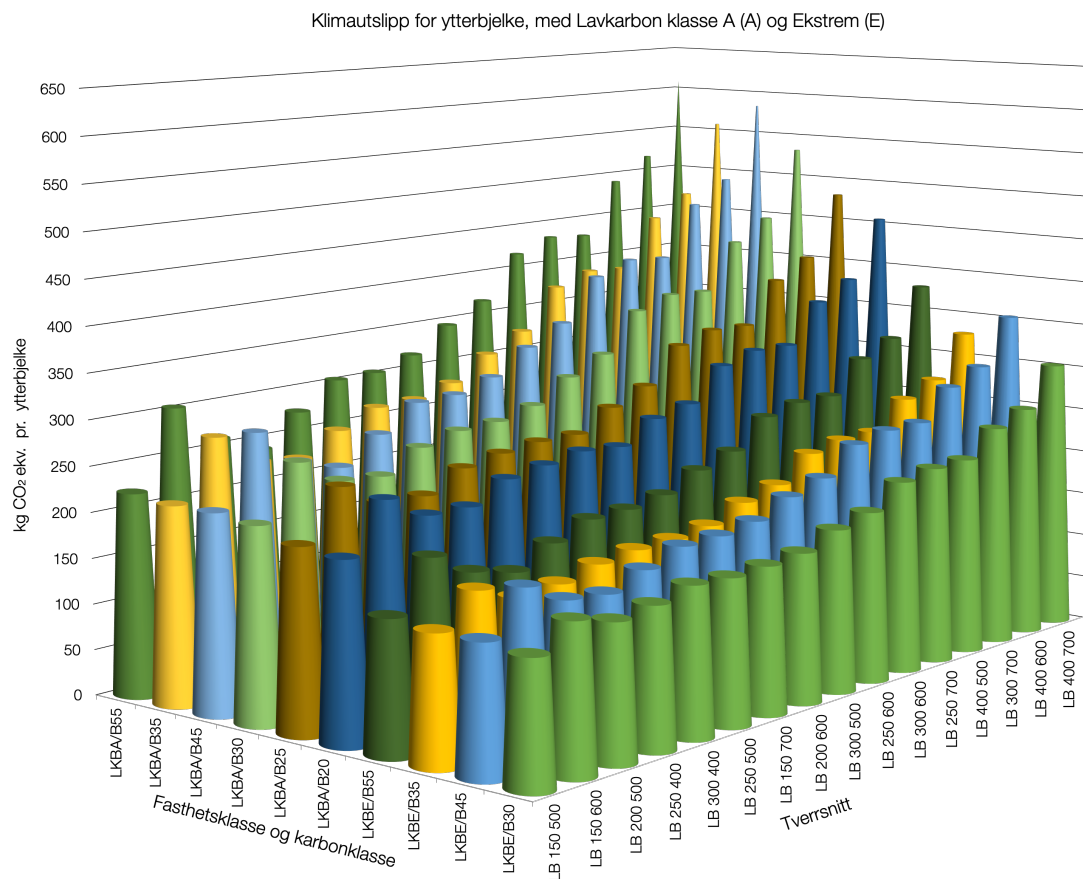
Klimagasskalkulatoren vår har beregnet at det er lønnsomt å gå ned i fasthet, og kompensere for dette ved trykkarmering. Lengdearmeringen i hjørnene er også avhengig av om tverrsnittet har trykkarmering, da trykkarmeringen kan brukes i hjørnet for stabilitet ved armeringsarbeidet. Hjørnearmeringen er antatt ikke medregnet i mengdeberegningen til Rønning et al. (2019). Den oppgir bare én type bøyer for hovedbjelken og det er derfor ukjent hvilke bøyer som ligger i sekundærbjelken. Bøylearmeringen har en senteravstand som ikke overskrider h_1 , med begrunnelse beskrevet i 5, *Optimalisering*.

Figur 6.23 er en gjentakelse av figur 4.9 og viser de ulike geometriparameterne for LB-bjelken.

Variasjonen i utslipp for de ulike ytterbjelkene er illustrert i figur 6.24. Diagrammet viser klimagassutslippet for ytterbjelken ved ulike tverrsnitt og fasthetsklasser. Dette er vist for karbonklasse A (LKBA/Bxx) og ekstrem (LKBE/Bxx). Tverrsnittene er sortert i stigende areal fra venstre til høyre. De laveste utslippene finnes i de minste tverrsnittene. Fasthetsklassene er sortert etter utslipp og viser at utslippet er lavest for klasse E30. Resultatet viser også at utslippet ikke korrelerer med fasthetsklassen, men at det for eksempel er lavere utslipp for E45 enn E35.



Figur 6.23: Gjentakelse av figur 4.9. Generell utforming av en LB-bjelke, med mål og parametere som finnes igjen i tabell D.1. Hovedbjelke (venstre) skravert i grønt og sekundærbjelke (høyre) skravert i blått.



Figur 6.24: Klimautslippet for én LB-bjelke med spennvidde 7,2 m, variert over; karbonklasse A og Ekstrem, fasthetskasse, og tverrsnitt.

6.3.3 Midtbjelke

Resultatene fra klimagasskalkulatoren for midtbjelken er presentert i tabell E.1, i vedlegg E. Det totale utslippet er oppgitt for en bjelke med spennvidde 7,2 m. Tilsvarende for LB-bjelken i forrige kapittel er resultatene noe ulike for de 8 casene, men tverrsnittet varierer her i større grad. Utslippet beregnes for alle tverrsnitt og tar hensyn til at armering kan kompensere for lavere fasthet. Tabellen er bygget opp slik at de vertikale strekene skiller egenskaper og mengder som er ulike de andre casene.

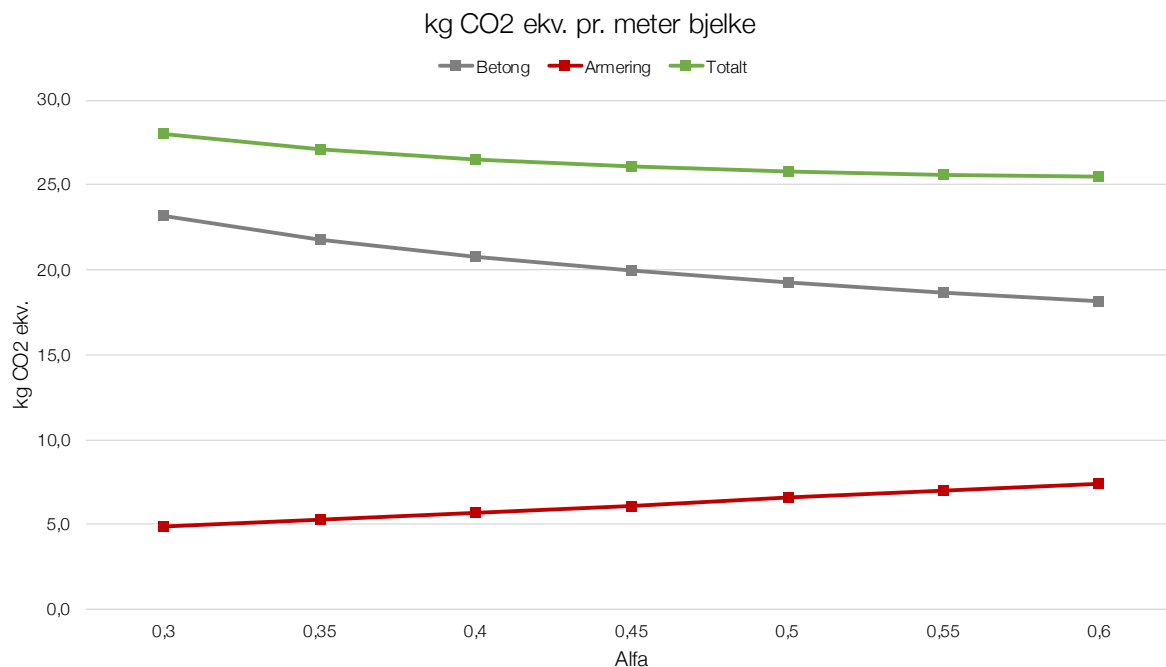
Case 1-4 har samme tverrsnitt, men Case 3 og 4 har B55 betong uten trykkarmering. Case 1, 2, 5, og 6 har tvungen B45 betong da Rønning et al. (2019) kun hadde CO_2 -data for denne fastheten. Case 5, 6 og 7 har samme tverrsnitt, men fastheten reduseres og kompenseres for med trykkarmering. Utslippet blir likevel lavere for case 6 og 7 med B30.

I case 8 benyttes karbonklasse ekstrem og tverrsnittet øker i høyde. Dette gir økt hylletykkelse og reduserer trykkarmeringen og antall bøyler, som er avhengig av hhv. fasthet og hylletykkelse. Kalkulatoren vår beregner at det er lønnsomt å bruke mer betong for å redusere mengden armering da mengden $kg CO_2 - ekv. pr. m^3$ betong er relativt lav for karbonklasse ekstrem.

Hjørnearmeringen er antatt ikke medtatt i mengdeberegningen av armeringen i Rønning et al. (2019). Den oppgir bare én type bøyler for hovedbjelken og det er derfor ukjent hvilke bøyler som ligger i sekundærbjelken. Bøylearmeringen har en senteravstand som ikke overskrider h_1 , med begrunnelse beskrevet i 5, *Optimalisering*.

6.4 Variasjon av trykksonehøydefaktor α

Øvelsen beskrevet i 5.3, *Variasjon av trykksonehøydefaktor α* oppnår resultatene vist i figur 6.27 for spennet $0,3 \leq \alpha \leq 0,6$.



Figur 6.27: Resultat av øvelsen utført i Excel der verdien for α varierer fra 0,3 til 0,6 for å undersøke endringen i klimagassutslipp. Verdiene gjelder for en LKBA/B35 betong og én meter bjelke.

Resultatet gjelder for en enkel, rektangulær bjelke, med lengde én meter, med et kjent moment påsatt, og for forutsetningene beskrevet i kapittel 5.3, *Variasjon av trykksonehøydefaktor α* . Som figuren over viser, synker totalutslippet ettersom α øker. I tillegg synker verdien for $d_{n\ddot{o}dv}$, noe som fører til redusert betongbehov da verdien for d er satt lik $d_{n\ddot{o}dv}$. Det er dermed ikke ønskelig i et bærekraftperspektiv å velge en d som er mye større enn den beregningsmessig nødvendige verdien. Gjøres dette blir α -verdien lavere, og utslippene øker.

7 Diskusjon

I dette kapitlet blir resultatene oppsummert og diskutert mot det eksisterende data-grunnlaget presentert i 2, *Beregningsgrunnlag*. Videre blir det sett på problemstillingen rundt klimagassutslipp og betongelementproduksjon i et større perspektiv. Til slutt blir usikkerhet rundt klimagasskalkulator, datagrunnlag og resultat vurdert. Målet for arbeidet har vært å se på muligheten for å redusere klimagassutslipp med ytteligere tiltak i prosjekteringsfasen.

7.1 Vurdering av resultater

Videre kommenteres hvert enkelt resultat av de 8 casene beskrevet i delkapittel 6.2, *Klimautslipp for hele bygget*. Det ble tidlig tatt et valg på å kun vurdere bygget bestående av fire etasjer, og optimaliseringen som er gjort for elementene vil være overførbart til 8 og 16 etasjer. Case 1 er som nevnt en referansecase, som skal gi et godt grunnlag for sammenligning med de øvrige casene. Selv om mengdene beskrevet i 6.1, *Mengdeberegning* avviker noe fra Rønning et al. (2019), vil den relative endringen i $kg CO_2 - ekv$. fortsatt være relevant. Mengdeoversikten i figur 6.2 viser hvilket element det lønner seg å redusere utslippet til. Hulldekkene utgjør den største mengden betong og en reduksjon her vil ha størst effekt. Det er fokusert på å beskrive hva reduksjonene kommer av, samt andre observasjoner som vises ut fra resultatene. Videre diskuteres resultatene elementvis for de aktuelle casene, og til slutt variasjonen av trykksonehøydefaktoren,

7.1.1 Hele bygget

Case 1 gjenskaper utslippsresultatene fra Rønning et al. (2019) for å verifisere kalkulatoren vår. Da CO_2 -tallene er de samme, kommer differansen fra mengdeberegningene. Dette stemmer bra for betongen, men armeringsmengden har et noe større avvik. Spennarmeringsmengden er $1503 kg$ for høy sammenlignet med Rønning et al. (2019). Dette kommer av usikkerhet rundt diameteren på spennarmeringen til både hulldekkene og bjelkene, i tillegg til usikkerhet rundt regnemethodene i Rønning et al. (2019). Slakkarmeringen er beregnet $942 kg$ for lav, og dette kommer av inkonsekvitheter i armeringsmengdetabellene fra Arcon. Bøylearmeringen i ytterbjelkene oppgis med ett antall bøyer med en ikke-samsvarende senteravstand. I beregningene benyttes 39 bøyer, som gir en senteravstand på $210 mm$. Flere inkonsekvitheter i 2, *Beregningsgrunnlag*.

Case 2 bruker CO_2 -data som Rønning et al. (2019) betegner som klimaoptimalisert. Her benyttes betongtverrsnittene til Rønning et al. (2019), mens armeringsmengden er optimalisert. Bjelker og hulldekke har nå kun nødvendig spennarmering, beregnet i klimagasskalkulatoren vår, og dette gir en betydelig reduksjon av total mengde, som vist i figur 6.3. For hulldekke er dette kun 4 spenntau, sammenlignet med case 1 som har 5 spenntau, og da hulldekket utgjør en stor del av totalmengdene betyr dette en stor reduksjon. Slakkarmeringen øker for midtbjelken, og reduseres for ytterbjelken, noe som fører til at totalutslaget på utslipp og mengde av slakkarmering ikke er stort.

Case 3 benytter en annen CO_2 -data for betong og armering enn i Rønning et al. (2019). Ved å gå bort fra disse verdiene oppnås en betydelig reduksjon i utslipp. Spennarmeringsmengden er uendret fra case 2, mens slakkarmeringsmengden stiger noe pga. redusert fasthet, som blir mulig etter ny CO_2 -data for betongen. Mengden slakkarmering i midtbjelken forsvinner, pga økt fasthet, mens den stiger i ytterbjelken. Dette gjør

at den totale armeringsmengden blir tilnærmet lik. Likevel synker utslippene for begge armeringstypene ved å benytte et mer klimavennlig armeringsprodukt. For den uendrete spennarmeringsmengden reduseres utslippet med over halvparten av den i case 2. En solid reduksjon i utslipp oppnås for betong ved å benytte grenseverdiene for karbonklasse A sammenlignet med de klimaoptimale produktene benyttet i Rønning et al. (2019). Selv om betongmengden er identisk med case 1 og 2.

Case 4 har de samme mengdene betong og armering som case 3, og her demonstreres tydelig CO_2 -reduksjonen som kan oppnås ved å bruke karbonklasse Ekstrem. T.o.m. case 4 benyttes de betongmengdene brukt i Rønning et al. (2019). Virkningen av en mengdeendring av betong på totalutslippet har ikke blitt vist. Dette vil derimot bli observert nøyer i de kommende casene.

Case 5 er første case med tverrsnittene våre beregninger mener er de mest miljøvennlige. CO_2 -dataen er den samme som benyttes i case 1, så reduksjonen av klimagassutslipp er en direkte reduksjon fra optimaliseringen av tverrsnitt. I figur 6.3 bemerkes det at spennarmeringsmengden er redusert, mens mengden slakkarmering har økt. Ved å bruke mindre betong i bjelkene brukes mer trykkarmering, noe som gir denne økingen. Det vil derimot lønne seg i følge kalkulatoren vår med de gitte CO_2 -dataene, da det sparer miljøet for nesten 10 000 kg $CO_2 - ekv.$

Case 6 har en betydelig økning av slakkarmeringsmengde, mens mengden betong og spennarmering er den samme som i case 5. Denne økingen kommer fra endring av betongfasthet i bjelkene, samt betydelig lavere utslippstall på armeringen. I CO_2 -dataen i Rønning et al. (2019) oppgis kun utslippstall for B45 (case 5) i bjelkene, mens det i de optimaliserte tverrsnittene benyttes en B30 betong. Denne reduksjonen i fasthet krever mer trykkarmering, og mengden slakkarmering øker. Den totale reduksjonen her kommer av både optimaliserte betongtverrsnitt, og bedre CO_2 -data på armering. Dataen til betong er nokså lik den som ble brukt i Rønning et al. (2019), og er grenseverdiene for karbonklasse B. Det bemerkes derimot at utslippet fra betongen i hulldekkene stiger sammenlignet med case 5. Dette kommer av at utslippstallene for karbonklasse B er høyere for en B45 betong, enn gjennomsnittsverdien som brukes i Rønning et al. (2019).

Case 7 er identisk med case 6 i mengde, og den ytteligere reduksjonen kommer av en strengere karbonklasse.

Case 8 viser et interessant resultat. Her øker nemlig betongmengden, samtidig som totalutslippet reduseres betraktelig. Slakkarmeringen reduseres med 20% sammenlignet med case 7. Ved å benytte den strengeste karbonklassen i NB37 (Norsk Betongforening, 2019), Ekstrem, blir utslippene kraftig redusert, t.o.m. med økt betongmengde. Sammenlignet med casene 5,6 og 7 er det 10 m^3 økt betongmengde i midtbejelken. Dette er fordi det lønner seg å øke betongmengden i bejelketverrsnitt mot at det brukes mindre trykkarmering. Gevinsten av å gå ned i betongfasthet og øke trykkarmeringsmengden gjelder altså bare med en relativt moderat karbonklasse.

Videre listes noen generelle observasjoner om resultatene fra klimagassberegningene for hele bygget:

- Reduksjonen mellom casene 4 og 8, og 3 og 7 er liten. Dette vitner om generelt liten gevinst i de optimaliserte tverrsnittene når de sammenlignes med betongmengden i Rønning et al. (2019).
- Den store reduksjonen mellom case 1 og 5 på ca. 10 000 kg $CO_2 - ekv.$ $\simeq 9\%$ skyldes en stor forskjell i armeringsmengde. I følge kalkulatoren vår er det behov for mindre

armering enn den brukt i rapporten og case 1.

- Ved en generell rangering av casene med totalt utslipp viser et forventet resultat: rangeringen matcher rekkefølgen av CO_2 -data fra høy til lav; fra Ekstrem, klasse B, A og de klimaoptimale- og gjennomsnittsverdier fra Rønning et al. (2019) . Dette vitner om at valg av karbonklasse er det viktigste for å redusere utslipp.
- Andre generelle observasjoner om sammenheng mellom parametre og resultatene:
Ikke høy korrelasjon mellom mengde betong og totalt utslipp betong. Karbonklassen har mest å si.
Fullstendig korrelasjon mellom karbonklassen og utslipp for betong.
Svak sammenheng mellom mengden armering og totalt utslipp, da spesielt mengden spennarmering. Fortsatt karbonklassen som teller mest.

Alle observasjoner gjelder dog for tilfellet i denne masteroppgaven, og med de gitte forutsetninger beskrevet i kapittel 2, *Beregningsgrunnlag*. Ved en endring i, eksempelvis, spennvidde vil disse observasjonene muligens bli ugyldige.

7.1.2 Elementvis

De ulike parameterne varierer, avhengig av hverandre, innenfor elementtypene. Variasjonen i armering er avhengig av fasthet, og spennarmeringen varierer etter høyden. For hulldekke er det samme tverrsnitt og fasthet for alle 8 caser. Ytterbjelken har også samme tverrsnitt for alle casene, men fasthet og armeringsmengde varierer. Midtbjelken varierer både tverrsnitt og fasthet i mye større grad enn for de andre elementene. Hvorfor dette skjer beskrives i dette kapitlet.

Hulldekke

Generelt varierer armeringsmengden og tverrsnittet lite for alle casene. I case 1-4 benyttes tverrsnittet som brukes i Rønning et al. (2019). Dette er oppgitt til å være på $120\,754\text{ mm}^2$, 930 mm^2 større enn det optimaliserte tverrsnittet på $119\,824\text{ mm}^2$. I case 1 brukes armeringsmengden til rapporten på 5 spenntau. I de resterende casene brukes kun nødvendig armering, som er beregnet til være 4 spenntau.

Felles for alle 8 casene er fastheten som benyttes. B45 er foretrukket i alle tilfeller, også der en lavere fasthet er mulig med et høyere tverrsnitt. I Rønning et al. (2019) antydes det at de horisontale konstruksjonsdelene kunne endre fasthet til B30, noe Arcon har bekreftet er mulig for bjelkene. For hulldekket er det mulig å redusere fastheten, men ikke for det valgte tverrsnittet, HD200. Å gå opp i tverrsnittshøyde for å redusere fastheten er ikke lønnsomt som vist i 6.3.1, *Hulldekke*.

Sammenligningen mellom utslipp i case 4 og 8 viser kun forskjell i betongtverrsnitt, da både fasthet, karbonklasse og armeringsmengde er identisk. Dette viser hvor lite som kan hentes på et optimalisert hulldekketverrsnitt, da et hulldekkeelement allerede er å anse som optimalisert hva gjelder betongbesparelse. En måte å optimalisere disse enda mer er å lage lavere tverrsnitt. Ofte vil dette bety å måtte gå opp i fasthet. Det man derimot kan se er hvor mye som kan spares ved å bruke en strengere karbonklasse, og høyere grad av armeringsgjenvinning, sammenlignet med referansecasen, case 1. I tillegg viser våre beregninger et behov for mindre mengde spennarmering, som og bidrar til en betydelig reduksjon. Det kan altså være en gevinst i å bruke mer tid på armeringsberegninger i prosjekteringsfasen.

Ytterbjelke

Generelt for casene er at alle bruker det minste, av de vurderte, tverrsnittet, LB 150/500. Derfor er spennarmeringsmengden den samme for alle caser. Dette tverrsnittet er det samme som i Rønning et al. (2019). For alle caser bortsett fra case 1, 2 og 5 er det benyttet en B30 betong. B45 velges bare når det er det eneste tilgjengelige.

Bøylearmeringen har en senteravstand som ikke overstiger kravet på $c < c_{max} = \min(h_1; 500)$. Senteravstanden er likevel relativt lav i forhold til h_1 . Dette skyldes at det ikke er mulig å oppnå armeringskravet med en høyere diameter, uten å overskride c_{max} . I tillegg vil en høyere diameter gi mer kg pr. bøyler, som vil gi mer armeringsbinding av bjelkene. Dette er likevel den mest miljøvennlige løsningen. Alle tverrsnitt har trykkarmering. Selv om det er vurdert høyere tverrsnitt som ville gitt en større indre momentarm, blir utslippet lavere med mindre tverrsnitt og mer armering. Armeringsprosenten har høy korrelasjon med totalt utslipp og det er høy armeringsprosent for de mest miljøvennlige casene. Slakkarmeringen i strekksonen kan erstattes med mer strekkarmering, som ville gjort resultatet enda mer klimavennlig, da trykkarmering brukes til å kompensere for redusert trykkfasthet i betongen. De laveste utslippene oppnås i case 4 og 8, og skyldes bruken av karbonklasse ekstrem.

Case 1 gjensker resultatene fra Rønning et al. (2019). Den store armeringsmengden kan skyldes at noe av spennarmeringen utnyttes som tillegg i strekksonen for trykkarmering. Forskjellen i strekkarmering for case 1 og 2 er 210 mm^2 og omgjøring til slakkarmering i trykksonen blir dette 718 mm^2 . Det er fortsatt mye mer trykkarmering enn de andre casene. I tillegg er det kun oppgitt én type bøylearmering, mens de andre casene bruker to bøyler. Derfor er ikke forskjellen i slakkarmering like stor.

For *Case 1-4* beregner klimagasskalkulatoren vår at det ikke er behov for like mye armering som i case 1. For case 3 og 4 er fastheten redusert til B30 og armeringen i trykksonen kompenserer for den reduserte trykksonekapasiteten. Selv om mengden slakkarmeringen er nesten dobbelt så høy sammenlignet med case 2, er utslippet så og si det samme. Dette skyldes at utslippet per kg armering er mye lavere for Almemark (2015) enn for verdiene fra Rønning et al. (2019).

I *Case 5-8* er det mulig å velge andre tverrsnitt enn LB 150/500, men tverrsnittet er fortsatt det samme. Case 5 er låst til B45 og har derfor mindre trykkarmering. Den samme reduksjonen til B30 som i case 3 og 4 oppstår i case 6-8, med økt trykkarmering. Disse tverrsnittetene er identiske, og utslippsreduksjonen kommer av variasjon i CO_2 -dataen. Denne reduksjonen viser at det lønner seg å bruke mer armering og en redusert fasthet. Spennarmeringen påvirkes ikke i case 5-8, da den kun er avhengig av høyden på tverrsnittet.

Midtbjelke

Generelt varierer tverrsnitt, fasthet og armeringsmengde i mye større grad for midtbjelken enn for ytterbjelken og hulldekkene. Midtbjelken brukt i Rønning et al. (2019) er en lav-flens-bjelke (LFB) med en hylletykkelse på 140 mm . Bjelken som kalkulatoren vår bruker er en dobbel-LB-bjelke (DLB) med en større og varierende hylletykkelse. Bøylearmeringen har en senteravstand som ikke overstiger kravet på $c < c_{max} = \min(h_1; 500)$. Senteravstanden er likevel relativt lav sammenlignet med h_1 . Dette skyldes at det ikke er mulig å oppnå armeringskravet med en større diameter, uten å overskride c_{max} . I tillegg vil en større diameter gi mer kg pr. bøyler. Slakkarmeringen i strekksonen kan erstattes

med mer strekkarmering, som ville gjort resultatet enda mer klimavennlig.

Case 1 har tverrsnitt LFB 600/200 og samme armeringsmengde som oppgitt i Rønning et al. (2019). Armeringsmengden ligger over de andre casene, selv om både tverrsnittsarealet er større og høyden er lavere. Noe av spennarmeringen kan brukes som kompensasjon til trykkarmeringen, og kan derfor være noe høyere. Dette fører til at det blir mindre slakkarmering i case 1. Det er også oppgitt kun en type bøylearmering i Rønning et al. (2019), så mengden er mindre enn andre caser.

Case 1-4 har låst tverrsnitt til LFB 600/200, det samme som oppgitt i Rønning et al. (2019). Case 1 har mer spennarmering enn case 2, selv om fastheten er B45 for begge casene. Trykkarmeringen er mer lik i case 1 og 2. I case 3 og 4 er fastheten B55, og uten trykkarmering. Siden tverrsnittet er låst er det ikke mulig å redusere betongmengden og kompensere med armering. Løsningen er derfor å redusere utslippet ved å fjerne behovet for trykkarmering ved å øke fastheten.

I *case 5-7* er det mulig å endre tverrsnitt og beregningene våre viser at å endre til DLB 200/400 vil gi et lavere utslipp. Dette tverrsnittet er 60 mm høyere enn LFB 600/200 og gir 60 mm større hylletykkelse. Tverrsnittsarealet er derimot 40% mindre enn LFB 600/200 og betongmengden utnyttes derfor på en bedre måte. Fastheten er låst til B45 i case 5 som gir mindre trykkarmering sammenlignet med case 6 og 7. Tverrsnittsendringen gir en forskjellig mengde bøylearmering da senteravstanden til bøylenes kan økes tilsvarende hylletykkelsen. For case 6 og 7 er det lønnsomt å bruke en B30 betong og kompensere med økt trykkarmering. En sammenligning mellom case 3 (B55) og 7 (B30) viser at et ikke-optimalisert tverrsnitt (case 3) må kompenseres med økt fasthet, da den eneste måten å redusere utslippet på i tvungen geometri, er å redusere armeringen. Dette gjøres ved å øke fastheten, som kun lønner seg når karbonklassen er moderat. Selv om behovet for trykkarmering forsvinner vil ikke dette kompensere for unødvendig mye betong(case 3). I case 7 er det benyttet karbonklasse A. Å bruke ekstrem i dette tilfelle vil gi et lavere utslipp for DLB 200/400, men det laveste utslippet for denne klassen blir uansett case 8.

I *case 8* endres tverrsnittet til DLB 200/500 som har mindre areal enn LFB 600/200, men større enn DLB 200/400. Hyllehøyden øker med 100 mm, men tverrsnittet forblir like bredt som case 5-7. Økningen av den indre momentarmen gir mindre spennarmering og større areal i trykksonen gir også behov for mindre trykkarmering. Da tverrsnittet utføres i karbonklasse ekstrem vil ikke betongbidraget øke mer enn den relative reduksjonen av armering. Dette viser at det kan lønne seg å bruke mer betong når karbonklassen er streng.

Generelt

I Arcon Prosjekt AS (2019) er det etterspurt muligheten for å endre fastheten fra B45 til B30 for de horisontale elementene. Arcon svarer med at dette er mulig, men at dette krever 550 kg armering ekstra pr. etasje for LFB-bjelken. Denne endringen gjøres ikke i Rønning et al. (2019), og fastheten beholdes til B45. Både ytterbjelken og midtbjelken ender opp med B30 som mest klimavennlige alternativ i vår klimagasskalkulator. Dette på tross av at armeringsmengden øker.

Valg av fasthet eller karbonklasse kan i noen tilfeller være av samme nytte. For ytterbjelken er det alltid bedre å velge karbonklasse ekstrem til fordel for karbonklasse A, som illustrert i figur 6.24. For midtbjelken er det ikke like stort forskjell mellom de ulike karbonklassene, illustrert i figur 6.26. Dette gjelder spesielt ikke for de største tverrsnittene eller LFB-alternativet. Sammenhengen mellom valg av fasthet og valg av karbonklasse isolerte sett, er ikke fokusert på i stor grad i denne masteroppgaven.

7.1.3 Variasjon av trykksonehøydefaktor α

I Norge dimensjoneres tverrsnittene som normalarmerte ($\alpha = 0,412$). Det er derimot mulig å øke α og fortsatt ha seighet i tverrsnittet. Som resultatene viser lønner det seg å øke α for å redusere utslippet. For eksempel ved å velge en $\alpha = 0,5$ i stedet for den normalarmerte verdien vil man spare $1,1 \text{ kg } CO_2 - \text{ekv. pr. m}$ bjelke, eller 3%, ved å ikke velge d mye større enn $d_{n\ddot{o}dv}$. Det kan muligens virke lite, men ved å endre praksis vil kloden spares for mye utslipp.

Det er krav og hensyn det ikke er nevnt i denne sammenheng så langt. Disse går spesielt på bruksgrensetilstand, og armeringsmengde. Ofte vil krav innen deformasjoner, duktilitet og riss være avgjørende. Ved valg av stor α vil gjerne dette bli avgjørende, da det betyr mindre betong og mer armering. Med mer armering kommer også et spørsmål om kvalitet på utførelse på byggeplass, og økonomi. En høyere α vil dermed ofte bety en mer kostbar løsning. Liten α betyr derimot mer betong, og mindre armering. Her kan kravet om minimumsarmering i NS-EN 1992-1-1 (2004) bli avgjørende, og ved å måtte øke mengden armering vil d bli større enn $d_{n\ddot{o}dv}$.

7.2 Betongelementer og klima

Klimapåvirkningene fra betongelementproduksjon er utforsket i denne masteroppgaven. Først og fremst i form av at utslippsberegninger for et kontorbygg, men og på en mer generell basis for de ulike elementene benyttet i vår klimagasskalkulator. I dette delkapitlet diskuteres det kort ulike klimaeffekter tilknyttet betongelementproduksjon. Mye av dette kan naturligvis kobles opp mot, og sammenlignes med, løsninger i plasstøpt betong. Da brukes det gjerne et høyere betongvolum, men er til gjengjeld enklere å bruke en bedre karbonklasse, slik dagens marked er.

7.2.1 Bruken av lavkarbonbetong

De strengeste karbonklassene i NB37 (Norsk Betongforening, 2019) er sjelden i bruk i dagens elementproduksjon. Dette er synlig i Rønning et al. (2019) der utslippstallene for det "klimaoptimale" betongproduktet kun tilfredsstillende en karbonklasse B i NB37 (Norsk Betongforening, 2019, Tabell 1). Disse verdiene er tatt fra produkter som eksisterer på markedet, og er en god gjenspeiling av situasjonen i markedet. I utarbeidelsen av en ny Eurokode 2, prEN 1992-1-1 (2020), virker fokuset å være mer rettet mot klimapåvirkninger og bruk av lavkarbonbetong. For å implementere mer naturlig bruk av lavkarbonbetong i dagens marked, vil det være viktig å ha fokus på dette gjennomgående i en ny standard.

Denne masteroppgaven viser potensialet som ligger i bruk av betong i elementproduksjon med strengere karbonklasser. Finner elementprodusentene ut hvordan de skal bruke karbonklasse ekstrem i produksjonen kan de så godt som halvere utslippene fra dette. Dette er fysisk mulig, men vil skape utfordringer for den praktiske gjennomføringen av produksjonen. Ulike tiltak kan være at lavkarbonbetong med sen fasthetsutvikling kan tilføres varme for å akselerere prosessen, spennkreftene kan påføres ved et senere tidspunkt eller elementene kan isoleres under herdeprosessen. Dagens miljøfokus tyder på at dette vil bli nødvendig i fremtiden, og en produsent som tar en sjans på dette og utvikler nye produksjonsmetoder vil mest sannsynlig oppnå en markedsfordel.

Som det fremkommer i denne masteroppgaven er hulldekkene desidert den største bidragsyteren av både utslipp og betongmengde. Produksjonen av dekkelementene utføres

med veletablerte metoder. Produksjonstid er et nøkkelord her, både mtp. praktisk gjennomføring og økonomi. Ved å f.eks. doble liggetiden før oppspenning og benytte halve produksjonskapasiteten av gangen vil produksjonen bli en god del dyrere, økonomi er derimot ikke et fokus i denne masteroppgaven og må veies mot de oppnådde miljøfordelene.

7.2.2 Andre løsninger

Beregningene gjort i denne rapporten tar for seg ulike parametre som påvirker resultatet i varierende grad. Gjennom arbeidet er det flere parametere som kunne hatt større fokus, men omfanget av rapporten har begrenset seg til de parametere som er beskrevet i kapittel 5, *Optimalisering*. Videre nevnes enkelte andre parametre som kan ha reduserende effekt på klimagassutslippet.

- **Spennvidde L** er utenfor begrensningene til masteroppgaven. I tillegg er **kostnader** holdt utenfor. Begge disse er ofte avgjørende faktorer i prosjektering, og en klimagassoptimalisering av disse vil høyst sannsynlig gi en betydelig reduksjon.
- **Transportfasen i en LCA, fase A4**. Avstand til betongelementfabrikk kan være avgjørende i en LCA om det lønner seg å benytte den spesifikke fabrikk. Forhåpentligvis vil alle fabrikker i Norge ha et fokus på lavkarbonbetong ved produksjonen i fremtiden.
- **Bruk av spennarmering** som kompensering i strekksonen av økt trykkresultant i trykksonen. Strekkkapasiteten økes tilsvarende ved bruk av trykkarmering. Ved å benytte spennarmering til dette trengs mindre mengde armering, og dette kan være klimagassbesparende.
- Sammenligning med **plastøpt betong**. Prosjekter med de strengeste karbonklassene i dag er gjerne med plastøpt betong og ofte med etterspente dekker. Se avsnittet om Powerhouse Brattøra 3.4.3, *Bundet energi* som et eksempel på dette.
- **Andre tverrsnitt** som I-bjelke, H-søyle etc.
- **Overdekning**: Mengden betong kan reduseres ved å redusere overdekningen. Dette spiller inn på levetiden til konstruksjonen, da denne masteroppgaven fokuserer på fasene A1-A3 i en LCA er ikke levetid vurdert.

7.2.3 Betong og massivtre

I sammenligningen mellom betong og massivtre som bærende konstruksjonsdeler er det ofte mange av de samme hovedargumentene som går igjen. Hvilke egenskaper som trekkes frem er i stor grad avhengig av hvilket lys diskusjonen settes i. Når det gjelder bruk av massivtre er det argumenter som gjenvinning, CO_2 -opptak og rask byggetid som går igjen. Massivtre er derimot ikke like anvendelig når det gjelder lange spenn, utsparinger, og utkrager. Der har betong en stor fordel, og er egenskaper som gjør betongen svært tilpassningsdyktig etter arkitekter og byggherrers ønske. Et eksempel på dette er Bacheloroppgaven til Utvær, Sætren og Dagsland som sammenligner byggematerialer og klimautslipp (Utvær et al., 2019). Der ble betong valgt over massivtre som konstruksjonsmateriale i et mediehus med en stor utkrager, da det arkitektoniske uttrykket ikke kunne gjenskapes i massivtre. Massivtre blir likevel brukt der miljøfokuset tillegges større

vekt enn det arkitektoniske uttrykket, eller der valget av massivtre utnytter inntrykket av at bygg i massivtre er mer miljøvennlig enn et betongbygg. Det sistnevnte argument er vanskelig å gjøre noe med på kort sikt.

I prosjekter der det arkitektoniske uttrykket må endres på for å redusere utslippene, kan dette enten gjøres ved å bruke massivtre eller betong. I resultatene fra delkapittel 6.3, *Elementvise resultater* for midtbjelke endres tverrsnittshøyden. Dette gir en en midtbjelke som bygger 160 mm lengre ned i rommet, men utslippet vil bli 60% redusert. Denne endringen kan være enklere å akseptere/løse enn overgangen til massivtre.

I delkapittel 3.5, *Miljøegenskaper til betong og massivtre* presenteres de ulike positive miljøegenskapene til betong og massivtre. Gjennom arbeidet med disse materialene og litteraturstudier kommer det derimot tydelig frem at det ikke er noe entydig svar på hvilket materiale som er å foretrekke i et miljøperspektiv. Det mest miljøriktige materialvalget er som oftest prosjektspesifikt, og bestemmes etter en anbudsrunde der økonomi ofte er en avgjørende faktor. Miljøegenskapene er ikke avhengig av et byggeprosjekt, men gjelder uansett prosjekttype- og plassering. Parameterene som bør sammenlignes i et valg mellom betong og tre er det ikke noe entydig svar på. Begge materialer kan brukes til det meste, og begge har noen spesifikke egenskaper. Resultatet beskrevet i kapittel 6, *Resultat* viser at det er mulig å redusere utslippet i betongkonstruksjoner, ved å legge ned en målrettet innsats i prosjekteringen.

7.2.4 Betongprosjektering og LCA

Korrekt gjennomføring etter fastsatte lover og regler av LCAer er viktig. Det er fortsatt en vurderingssak i hvor stor grad de ulike prosessene skal tilordnes de ulike produktene. Dette påvirkes i stor grad av de som gjennomfører LCAen. Regelen om at avfallsproduktet skal tilordnes hovedproduktet gjelder, og gjør tilsetningmaterialene i en lavkarbonbetong til nullutslipps-produkter.

De ulike settene av EPDer nevnt i 3.4.2, *Miljødeklarasjoner* viser at kravet til EPDen til betong skal inneholde fasene *A1-A3: vugge-til-port*. I våre beregninger er det valgt å kun ta hensyn til *A1-A3: vugge-til-port*, i motsetning til Rønning et al. (2019) som tar hensyn til fase *A4* i tillegg. Dette fordi transporten er ønsket utelatt for å kunne sammenligne de ulike utslippene på fabrikk, og ikke medta transporten som varierer avhengig av byggested. Fokuset på prinsippet om reduksjon i utslipp ved å bruke mer tid i prosjekteringen vil fortsatt være opprettholdt.

I en LCA vurderes ikke de økonomiske effektene av produktene, kun miljø- og klima-utslipp. Denne vurderingen er tatt for at LCAene ikke skal være for avansert. Kostnaden varierer ut fra flere parametre, og disse kan være omfattende. Det er utenfor denne masteroppgavens ramme å ta hensyn til de økonomiske effektene ved produkt- og dimensjoneringsvalg. I flere byggeprosjekter er ikke økonomi et like stort vurderingskriterie som det har vært tidligere, da fokuset på miljøvennlige løsninger blir viktigere. Her vises potensialet som ligger i bruk av strengere karbonklasser.

7.2.5 Sammenligning med rapport

I Rønning et al. (2019) påpekes det i deres konklusjon at tiltak som er rettet mot materialforbruk og optimalisering av løsningene vil være et minst like godt tiltak som å kun kreve en gitt karbonklasse. Gjennom arbeidet med klimagasskalkulatoren er det tydelig at dette er mulig. Ved å fokusere på de andre parameterne vil reduksjonen kunne bli minst

like stor som kun et enkelt krav. Dette avhenger av at produsentene og i dette tilfellet, de prosjekterende, bruker tid på å finne de optimale løsningene. Kostnader for økt prosjekteringstid i forhold til kostnader for strengere karbonklasse er også viktig å ta hensyn til. Vår klimagasskalkulator vil bidra med økt kunnskap om hvordan de miljøoptimaliserte tverrsnittene kan bli utformet.

7.3 Usikkerhet

Dette delkapittelet inneholder beskrivelser av de forskjellige usikkerhetsmomentene som kan oppstå i hhv. klimagasskalkulatoren vår, datagrunnlaget fra Rønning et al. (2019) og Arcon, samt resultatene oppnådd ved bruk av disse.

7.3.1 Klimagasskalkulator

Klimagasskalkulatoren vår dimensjonerer tverrsnitt og kontrollerer armering for for flere titalls tverrsnitt samtidig. Beregningene gjøres i samsvar med kapittel 4, *Klimagasskalkulator* og bruker mengdedata i samsvar med kapittel 6.1, *Mengdeberegning*. Disse beregningene inneholder antakelser og er av stor skala. De kan derfor være noe usikre eller inneholde regnefeil.

7.3.2 Datagrunnlag

Grunnlaget fra Rønning et al. (2019) som er brukt i beregningene kan inneholde regnefeil eller feiltolkninger. Dette innebærer den offentlige rapporten, samt utfyllende informasjon om prosjekteringen fra Arcon. Det er ikke tegnet armeringstegninger til bygget. Armeringen oppgis i tabeller, og disse inneholder enkelte motsetninger.

Bygget er modellert i programmet FEM-design, der modellen ikke samsvarer fullstendig med tabellene oppgitt i Rønning et al. (2019). Dette er beskrevet i kapittel 2.2, *Kommentarer til beregningsgrunnlaget*. Lasten brukt i dimensjoneringen av tverrsnittene i klimagasskalkulatoren vår har bl.a. ikke riktig egenlast. Andelen til egenlasten av den dimensjonerende lasten er likevel liten sammenlignet med de andre lastene. I tillegg er spennvidden lengre for hulldekket. For sammenlignbarheten er det valgt å bruke samme spennvidde som i Rønning et al. (2019).

Valget av karbonklassen til betongen har bakgrunn i potensialet til betong med karbonklasse ekstrem, og sammenligning med andre materialer og betongfastheter for klasse B. Rønning et al. (2019) inneholder betong med varierende CO_2 -utslipp avhengig av elementtype. Dette er noe denne masteroppgaven ikke har tatt hensyn til da det kun er brukt CO_2 -data fra NB37 (Norsk Betongforening, 2019). Dette kan gjøre de oppnådde resultatene både mer eller mindre miljøvennlige. Flere av prinsippene som er diskutert i denne masteroppgaven vil fortsatt være aktuelle, i tillegg til at konsekvensen av forskning på betongresepter vises i 6, *Resultat*.

7.3.3 Resultat

Resultatene beskrevet i kapittel 6, *Resultat* kan inneholde usikkerhetsmomenter med kilde i ulike parametere. Usikkerheten ligger i stor grad i CO_2 -inndata som beskrevet i forrige delkapittel. Mengden armering og hvordan denne armeringen skal plasseres i tverrsnittet, samt om det er mulig å armere de minste tverrsnittet med å høy armeringsmengde er og

usikkerhetsmomenter. Denne kunnskapen ligger stort sett hos de ulike produsentene og dette overlates til dem.

Produksjonen av betongelementer er avhengig av flere faktorer som ikke er hensyntatt i denne rapporten. Dette skyldes bransjeerfaring og løsninger som i stor grad ikke er litteraturfestet. Det var ønskelig med et fabrikkbesøk i forbindelse med utarbeidelsen av denne masteroppgaven for å tilegne oss kunnskap om dette, men dette ble vanskelig grunnet pandemien COVID-19, og de smittetiltakene som gjaldt våren 2020.

8 Konklusjon

Fokuset på global oppvarming og klimagassutslipp fremprovoserer nye løsninger i byggebransjen som har store utslipp. Innsparingspotensialet er enormt, og forskningen på området pågår for fullt. Bruken av lavkarbonbetong er et mulig tiltak med stort potensiale, spesielt i betongelementindustrien. Med en utbredt bruk av karbonklassene med de strengeste utslippskravene, kan kloden spares for store mengder klimagasser. Miljøet og økosystemene våre bør ivaretas på best mulig måte for kommende generasjoner, og det er viktig å ha et perspektiv rundt å ikke handle for sent når det kommer til miljøavtrykket vi etterlater oss.

Dette gjelder også i byggebransjen, og rapporten denne masteroppgaven har tatt utgangspunkt i, "Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner; Kontorbygning - 4, 8 og 16 etasjer" av Rønning et al. (2019), tar opp denne problemstillingen. Rapporten er grundig utført, og i arbeidet med denne reiste følgende spørsmål seg: Er det mulig å optimalisere deres betongløsninger til å være mer miljøvennlige ved å bruke mer tid i prosjekteringsfasen?

Denne masteroppgaven har forsøkt å gjennomføre sammenlignbare beregninger med resultatene gitt i rapporten nevnt ovenfor. I den forbindelse ble en klimagasskalkulator utarbeidet i Excel. Følgende konklusjoner kan bli gjort etter utført arbeid:

- Den største reduksjonen i utslipp sammenlignet med rapporten ble 54,4%. Alternativet med optimaliserte bjelker og hulldekker med karbonklasse ekstrem og de beste armeringsprodukter, ga den beste løsningen. Generelt viste det seg at valg av streng karbonklasse er det viktigste tiltaket for å redusere utslipp. I tillegg bør betongbruken minimeres, med høyere forbruk av armering for å opprettholde kapasiteten.
- Optimaliseringen av hulldekkene kom fra et mindre tverrsnitt og mer miljøvennlige armeringsprodukter. Hulldekkene utgjør 67% av betongmengden i kontorbygget. Det minste mulige hulldekket, HD200, var allerede brukt i rapporten, så optimaliseringen av dette gikk på å finne en produsent med mindre tverrsnitt, og dermed redusere betongmengden noe. HD200 fra produsenten NOBI ble valgt som var 930 mm^2 mindre enn det i rapporten.
- Bruk av lavkarbonbetong i betongelementer kan gi praktiske utfordringer i produksjonen. F.eks. forlenget liggetid, mer avansert armeringsbruk og betongresepter med spesielle sammensetninger av bindemidler med begrenset tilgjengelighet. Disse er stort sett løsbare, men kan innebære betydelige kostnader.
- Spennarmering har ca. 50% lavere utslipp pr. MPa enn slakkarmering. Ved å utnytte spennarmering til f_{pd} og bytte ut slakkarmering kan besparelsene bli store. Pga. den store forskjellen i styrke trengs mye mindre mengde spennarmering for å oppnå tilstrekkelig kapasitet.
- Ved å øke trykksonehøyden til en verdi av $\alpha = 0,5$ og kun bruke tverrsnitt med nødvendig effektive høyde, kan klimagassutslippet reduseres. Dagens praksis med å normalarmere tverrsnitt under dimensjonering er en praksis som ikke nødvendigvis tar hensyn til klimagassutslipp.

Resultatene er et produkt av det gitte datagrunnlaget og forutsetningene, og er sterkt knyttet til dette. Det er vanskelig å dra for mange generelle konklusjoner når beregningene

gjøres på ett bestemt bygg. I dette tilfellet er utslippstallene beregnet for LCA-fasene *A1-A3: vugge-til-port* og er dermed uavhengig av transport til byggested og lignende. Enhver bygning er unik når det gjelder sammensetning og oppbygging av elementer. Denne kompleksiteten bidrar til at diskusjonen i dag ofte er uklar når det gjelder utslipp, og sammenligningen mellom betong og massivtre som konstruksjonsmateriale.

LCA og dens rammeverk gir bransjen felles spilleregler i valg av klimavennlige løsninger og produkter. Å implementere LCA i en prosjektering er et utmerket verktøy for å oppnå klimabesparende tiltak, og dette er noe bransjen bør utarbeide videre ved å fortsette å generere spesifikke EPDer.

Økonomi er en særdeles viktig faktor når det skal prosjekteres nye bygg og konstruksjoner. Arkitektoniske utførelser er óg viktig, da spesielt spennvidder og utkrageringer. Slike hensyn er ikke tatt i denne masteroppgaven, noe som begrenser funnene i en større sammenheng. Hovedfokuset har vært å få frem *potensialet* i betong. Dette kan brukes i utførelsen av alle betongbygg.

Masteroppgaven har vist at ja, klimagassutslippet kan reduseres ved å bruke mer tid på optimalisering i prosjekteringsfasen, samt ved å ta i bruk de strengeste karbonklassene i betongelementproduksjon.

8.1 Videre arbeid

Til slutt nevnes anbefalinger til videre arbeid innen denne problemstillingen:

- Ytteligere arbeid med klimagasskalkulatoren. Denne kan gjøres mer brukervennlig og utvides til å gjelde for generelle tverrsnitt.
- Optimalisering av byggene på 8 og 16 etasjer.
- Kostnadsberegning av klimagassoptimaliseringen.
- Utforske muligheten til å bruke mer spennarmering sammenlignet med slakkarmering, og hvilken klimapåvirkning dette kan ha.
- Videre arbeid med α - verdien, og problematikken rundt dagens praksis ifb. dette.

Referanser

- Aarø, I., & Bøhn, N. (2018). *Bruk av tre i bygg- et klimavennlig valg*. Norges Skogeierforbund.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Å., S. S., Kirkegaard, K. H., Landrø, H., A., B., Glasø, G., & Aarstad, J. (2006a). *Håndbok - bygge med massivtrelementer, hefte 1, Generelt*, vol. 1. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Å., S. S., Kirkegaard, K. H., Landrø, H., A., B., Glasø, G., & Aarstad, J. (2006b). *Håndbok - bygge med massivtrelementer, hefte 4, Brann*, vol. 4. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Alexander, S., & Vinje, L. (2010). *Betongelementboken bind A; Bygging med betongelementer*, vol. A. Oslo: Betongelementforeningen, 4 ed.
- Almemark, M. (2015). *Steel reinforcement products for concrete*. Celsa Steel Service AS. NEPD-434-305-EN.
- Andrew, R. M. (2018). Global CO_2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217.
- Arcon Prosjekt AS (2018). Oppdragsrapport rev b - eksempelbygg namsos. Upublisert, Filnavn: 31-021 Oppdragsrapport Rev B.doc.
- Arcon Prosjekt AS (2019). Vedlegg v2 - eksempelbygg namsos. Upublisert, Filnavn: 18. jan - Eksempelbygg Namsos - Rev D.docx.
- Block Berge (u.å.). *Underleverandører 3 - armering*. Tilgjengelig fra: <http://blockberge.no/miljo/underleverandorer/article30742.ece>. (Hentet 25. Mars 2020).
- Bygg uten grenser (2019). *Har materialdiskusjonen kommet et skritt videre?* Tilgjengelig fra: <https://www.byggutengrenser.no/2019/08/26/har-materialdiskusjonen-kommet-et-skritt-videre/>. (Hentet 21. Februar 2020).
- Ekeløf, O., Larsen, A., & Landsforeningen for bygg og anlegg (1995). *Forskalingsboka*. Oslo: Landsforeningen for bygg og anlegg. S. 107-109.
- Engelsen, C. J. (2018). Betong og miljø - karbonatisering. *Byggeindustrien*, 10.
- European Commission (2019). Communication from the commission to the european parliament. *The European Green Deal*. COM(2019) 640.
- Finnesand, B. (1989). *Betongkonstruksjoner : dimensjonering av slakkarmerte betongkonstruksjoner etter NS 3473*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- FN-sambandet (2019). *Klimaendringer*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/Tema/Klima-og-miljoe/Klimaendringer>. (Hentet 2. april 2020).
- Global Steel Wire S.A., Celsa Group (2013). *Declaración Ambiental de Producto*. Asociación Sostenibilidad Siderúrgica. AENOR EPD 001-001.

- Håndbok N400 (2015). *Bruprosjektering*. Statens vegvesen - Vegdirektoratet, 2 ed.
- Høseggen, R., Holthe, K., Bjerger, L. H., Reiersen, J. E., Pessi, K., Krokstrand, O. H., & Flaata, M. (2013). *Energieffektive betongelementbygg - Utnyttelse av termisk masse*. Oslo: Betongelementforeningen.
- Jacobsen, S. (2018). Resirkulering og gjenbruk av betong. *Byggeindustrien*, 11.
- Kermit, P. H. (2020). Contiga presentasjon: Lavkarbonbetong. Presentasjon gitt under Betongindustridagene om miljøinnovasjon, 29-31 Januar.
- Kjellmark, G., Haase, M., & Homb, A. (2018). Utnyttelse av termiske egenskaper i betong for redusert energibruk. *Byggeindustrien*, 6.
- Klöpffer, W. (2014). *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment*, vol. 1. Springer Netherlands, 1 ed.
- Lindfors, L., Christiansen, K., Hoffman, L., Virtanen, Y., Juntilla, V., Rønning, A., Østfold Research Foundation, Ekvall, T., & Finnveden, G. (1995). *Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment*. København: Nordic Council of Ministers, 1995.
- Marstrander, B. (2014). *B20 M90 D22, 205000, Vibrerbar betong*. NorBetong AS. NEPD00283N.
- Miljøkomiteen i Norsk Betongforening (2018). *Betong og miljø - en artikkelsamling*. Norsk Betongforening.
- Murphy, M. (2012). Leco thermo-active ceilings & free cooling. Tech. Rep. 52, SINTEF, Forskningsveien 3B, POBox 124 Blindern, N-0314 OSLO.
- NHPs Sekretariat (2017). *Handlingsplan 2017-2020, Nasjonal handlingsplan for bygg og anleggsavfall (NHP4)*. Byggemiljø.
- NOBI Voss (2016). *Hulldekketyper, tverrsnittsdata*. Tilgjengelig fra: <https://www.nobi.no/wp/wp-content/uploads/2016/01/Tverrsnitt-Hulldekke-NOBI.pdf>. (Hentet 18. Mars 2020).
- Norsk Betongforening (2019). *Publikasjon nr. 37; Lavkarbonbetong*. Oslo: Norsk Betongforening.
- NS-EN 14025 (2010). *Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer*. Norsk standard.
- NS-EN 15804 (2012). *Bærekraftige byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer*. Norsk standard.
- NS-EN 16757 (2017). *Bærekraftige byggverk - Miljødeklarasjoner - Produktkategoriregler for betong og betongelementer*. Norsk standard.
- NS-EN 1990 (2002). *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Norsk standard.

- NS-EN 1991-1-1 (2002). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger*. Norsk standard.
- NS-EN 1991-1-3 (2003). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster*. Norsk standard.
- NS-EN 1991-1-4 (2005). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*. Norsk standard.
- NS-EN 1992-1-1 (2004). *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Norsk standard.
- NS-EN 206 (2016). *Betong; Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*. Norsk Standard.
- NS-EN ISO 14040 (2006). *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper og rammeverk*. Norsk standard.
- NS-EN ISO 14044 (2006). *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer*. Norsk standard.
- NS-EN ISO 7243 (2017). *Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index*. Norsk standard.
- Powerhouse (2018). *Powerhouse Brattørkaia*. Tilgjengelig fra: <https://www.powerhouse.no/prosjekter/brattorkaia/>. (Hentet 11. Mars 2020).
- prEN 1992-1-1 (2020). Eurocode 2: Design of concrete structures - part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Unpublished.
- Røine, S. (2020). Spenncon presentasjon: Betong og miljø. Presentasjon gitt under Betongindustridagene om miljøinnovasjon, 29-31 Januar.
- Rønning, A., Prestrud, K., Saxegård, S., Haave, S. S., & Lysberg, M. (2019). *Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner*. Østfoldforskning.
- Sellevold, E. J. (2008). *TKT4215 Concrete Technology 1; Chapter 7 - Pozzolana*. NTNU.
- SINTEF Byggforsk (2015). *Resirkulert tilslag av tegl og betong*. Byggforskserien byggdetaljer. Anvisning 572.111.
- Springer, N. (2017). *Concrete and Wood Summer House in South Iceland* [fotografi]. Tilgjengelig fra: <https://homeworlddesign.com/concrete-wood-summer-house-south-iceland/>. (Hentet 24. Februar 2020).
- Sætre, K. (2019). *Kove - 3-seats high back*. Fora Form AS. NEPD-1901-810-EN.
- Sørensen, S. I. (2017). *Betongkonstruksjoner - Beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Fagbokforlaget, 2 ed.
- The Norwegian EPD Foundation/EPD-Norge (2019). *General Programme Instructions for The Norwegian EPD Foundation/EPD-Norge*. Oslo: epd-norge.no, 3 ed.

Trefokus (u.å.). *Hva er massivtrelementer?* Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/a-bygge-med-tre/massivtreelementer>. (Hentet 4. Mars 2020).

Treindustrien (2013). *Treindustriens Lille grønne*. Treindustrien.

Utvær, A., Sætren, J., & Dagsland, K. A. (2019). *Dimensjonering og materialvalg med hensyn på miljøutslipp*. Ålesund: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Bacheloroppgave.

Vinje, L. (2018). *Betongelementboken bind D; Brannmotstand, bestandighet og tetting*, vol. D. Oslo: Betongelementforeningen, 1 ed.

Vinje, L., Wilberg, J., Alexander, S., Brekke, A., Hopp, J., & Fause, S. (2013). *Betongelementboken bind C; Elementer og knutepunkter*, vol. C. Oslo: Betongelementforeningen, 4 ed.

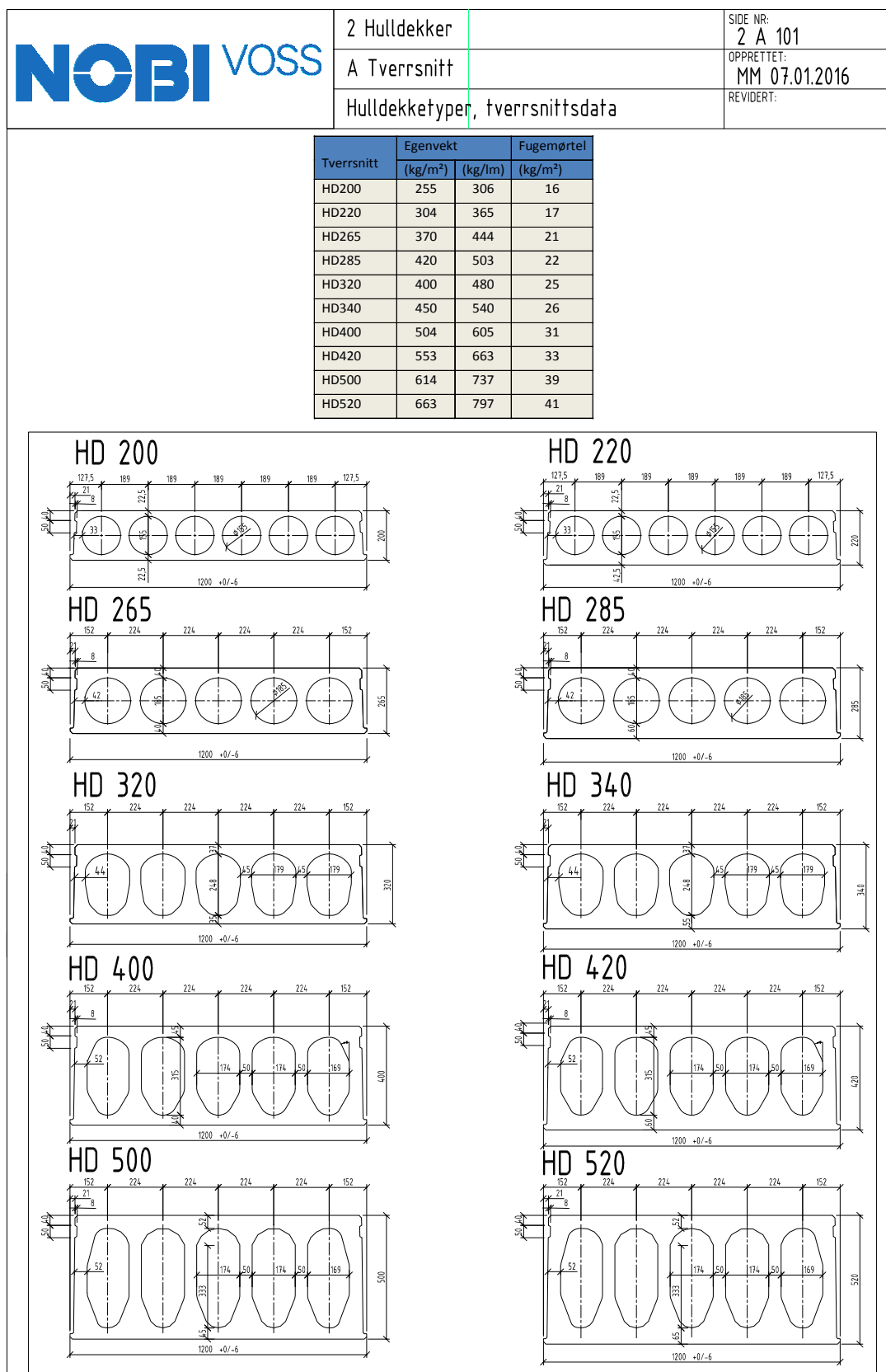
Vedlegg

A Tabell NA.12 fra NS-EN 206

Egenskap	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45 ^{a, b, c}	M40 ^d	MF40 ^{a, b, c, d}
Minste luftinnhold i fersk betong				4 %		4 %
Minste effektive bindemiddelmengde (kg/m ³) ^e	225	250	300	300	330	330
Sementtype	Største masseforhold ^{f, g, h}					
CEM I	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-S, 6-20 % slagg	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-S, 21-35 % slagg	0,90	0,55	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-D, 6-10 % silikastøv	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-V, 6-20 % flygeaske	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-V, 21-35 % flygeaske	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-L, 6-20 % kalkfiller L	0,90	0,50	- i	-	- i	-
CEM II/A-LL, 6-20 % kalkfiller LL	0,90	0,50	- i	-	- i	-
CEM II/A-M, 12-20 % diverse	0,90	- j, k	- j, k	- k	- j, k	- k
CEM II/B-M, 21-35 % diverse	0,90	- j, k	- j, k	- k	- j, k	- k
CEM III/A, 36-65 % slagg	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM III/B, 66-80 % slagg	0,90	0,45	0,45	-	0,40	-
^a	For bestandighetsklasse MF40 og MF45 skal det anvendes frostsikkert tilslag (se NA.5.1.3).					
^b	Standarden gir ikke regler for produksjon av frostsikker betong uten bruk av luftinnførende tilsetningsstoffer.					
^c	Standarden gir ikke anvendelsesregler for bestandighetsklassene MF45 og MF40 om den samlede mengden flygeaske og slagg (V + S) er større enn 20 vektprosent i forhold til bindemiddelmengde. Tilfredsstillende frostbestandighet kan likevel dokumenteres iht. NA.5.3.2(902) for sement eller bindemiddelkombinasjoner der samlet innhold (i sement + tilsatt) er over 20 %.					
^d	Bindemidlet skal minst inneholde 6 % silikastøv eller samlet minst 14 % flygeaske, silikastøv og slagg (V + D + S) i bestandighetsklassene MF40 og M40.					
^e	Betongens effektive bindemiddelmengde er: sement + (k * flygeaske) + (k * silikastøv) + (k * slagg).					
^f	Ved bruk av tilsetningsmaterialer gjelder grenseverdien for største masseforhold for den sementtypen som tilsetningsmaterialene tilsettes til.					
^g	Der flere sementtyper som det er gitt anvendelsesregler for blandes, kan største tillatte masseforhold fastsettes som et vektet middel av kravene til de enkelte sementtypene.					
^h	"-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir anvendelsesregler for denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).					
ⁱ	CEM II/A-L og CEM II/A-LL kan anvendes etter reglene for CEM I forutsatt at mengden kalkfiller L og LL ut over 5 % ikke tas med i beregningen av masseforholdet.					
^j	CEM II/A-M og CEM II/B-M kan benyttes med grenseverdier som for CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S, dersom det ved beregning av masseforhold ses bort fra andelen materiale (hovedkomponenter) som bringer sementen over grenseverdiene for hhv. CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S.					
^k	Det tillates kun sementer som ikke inneholder andre hovedkomponenter enn klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfiller (L og LL).					

Figur A.1: Tabell NA.12 fra NS-EN 206: Grenseverdier for luftinnhold, minste effektive bindemiddelmengde og største masseforhold for betong etter nasjonalt tillegg NS-EN 206 NS-EN 206 (2016).

B Tverrsnittdata huldekke fra NOBI



Figur B.1: Tverrsnittdata huldekketypelementer fra NOBI Voss (2016).

C Påførte laster fra FEM-Design modellen til Arcon Prosjekt AS

Tabell C.1: Lastene påført bygget hentet ut av FEM-design-modellen produsert av Arcon Prosjekt AS.

Nr.	Type last	Lastflate	Størrelse [kN/m ²]	Retning	Varighet
1	Nyttelast	1.etasje	2,7	-z	Lang tid
1	Nyttelast	2. og 3. etasje	3,0	-z	Langtid
8	Permanent tilleggslast	1., 2. og 3. etasje	1,2	-z	Langtid
9	Snølast	Tak	3,2	-z	Langtid
14	Svinn (shrinkage)	-	-	-	
2	Vind tak nord s/t*	D Trykk	0,87	-	-
2	Vind tak nord s/t*	C Sug	0,62	-	-
2	Vind tak nord s/t*	B Sug	1,00	-	-
2	Vind tak nord s/t*	A Sug	1,49	-	-
2	Vind tak nord s/t*	E Sug	0,38	-	-
2	Vind tak nord s/t*	G Sug	1,49	-	-
2	Vind tak nord s/t*	F Sug	2,24	-	-
2	Vind tak nord s/t*	H Sug	0,87	-	-
2	Vind tak nord s/t*	I Trykk	0,25	-	-
3	Vind tak nord sug	D Trykk	0,87	-	-
3	Vind tak nord sug	C Sug	0,62	-	-
3	Vind tak nord sug	B Sug	1,00	-	-
3	Vind tak nord sug	A Sug	1,49	-	-
3	Vind tak nord sug	E sug	0,38	-	-
3	Vind tak nord sug	G Sug	1,49	-	-
3	Vind tak nord sug	F Sug	2,24	-	-
3	Vind tak nord sug	H Sug	0,87	-	-
3	Vind tak nord sug	I Sug	0,25	-	-
4	Vind tak sør s/t*	D Trykk	0,87	-	-
4	Vind tak sør s/t*	C Sug	0,62	-	-
4	Vind tak sør s/t*	B Sug	1,00	-	-
4	Vind tak sør s/t*	A Sug	1,49	-	-
4	Vind tak sør s/t*	E Sug	0,38	-	-
4	Vind tak sør s/t*	G Sug	1,49	-	-
4	Vind tak sør s/t*	F Sug	2,24	-	-
4	Vind tak sør s/t*	H Sug	0,87	-	-
4	Vind tak sør s/t	I Trykk	0,25	-	-
5	Vind tak sør sug	D Trykk	0,87	-	-
5	Vind tak sør sug	C Sug	0,62	-	-
5	Vind tak sør sug	B Sug	1,00	-	-
5	Vind tak sør sug	A Sug	1,49	-	-
5	Vind tak sør sug	E Sug	0,38	-	-

Fortsetter på neste side

Tabell C.1 – Fortsettelse fra forrige side

Nr.	Type last	Lastflate	Størrelse [kN/m ²]	Retning	Varighet
5	Vind tak sør sug	G Sug	1,49	-	-
5	Vind tak sør sug	F Sug	2,24	-	-
5	Vind tak sør sug	H Sug	0,87	-	-
5	Vind tak sør sug	I Sug	0,25	-	-
6	Vind Øst	D Trykk	0,98	-	-
6	Vind Øst	C Sug	1,00	-	-
6	Vind Øst	B Sug	1,00	-	-
6	Vind Øst	A Sug	1,49	-	-
6	Vind Øst	E Sug	0,59	-	-
6	Vind Øst	G Sug	1,49	-	-
6	Vind Øst	F sug	2,24	-	-
6	Vind Øst	H Sug	0,87	-	-
6	Vind Øst	I Sug	0,87	-	-
7	Vind Vest sug	D Trykk	0,98	-	-
7	Vind Vest sug	C Sug	1,00	-	-
7	Vind Vest sug	B Sug	1,00	-	-
7	Vind Vest sug	A Sug	1,49	-	-
7	Vind Vest sug	E Sug	0,59	-	-
7	Vind Vest sug	G Sug	1,49	-	-
7	Vind Vest sug	F Sug	2,24	-	-
7	Vind Vest sug	H Sug	0,87	-	-
7	Vind Vest sug	I Sug	0,87	-	-
10	Skjevlast** X+	1. etasje	0,0173	Øst	Permanent
10	Skjevlast** X+	2. og 3. etasje	0,0170	Øst	Permanent
10	Skjevlast** X+	tak	0,0153	Øst	Permanent
11	Skjevlast** X-	1. etasje	0,0173	Vest	Permanent
11	Skjevlast** X-	2. og 3. etasje	0,0170	Vest	Permanent
11	Skjevlast** X-	tak	0,0153	Vest	Permanent
12	Skjevlast** Y+	1. etasje	0,0173	Nord	Permanent
12	Skjevlast** Y+	2. og 3. etasje	0,0170	Nord	Permanent
12	Skjevlast** Y+	tak	0,0153	Nord	Permanent
13	Skjevlast** Y-	1. etasje	0,0173	Sør	Permanent
13	Skjevlast** Y-	2. og 3. etasje	0,0170	Sør	Permanent
13	Skjevlast** Y-	tak	0,0153	Sør	Permanent

*s/t=sug/trykk

**deviation

D Elementdata ytterbjelke

Tabell D.1: Elementdata for mest klimavennlige alternativ for ytterbjelken med tilstrekkelig kapasitet for hver case

Ytterbjelke	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
			LB 150/500/7200					
Total høyde h [mm]				500				
Bredde overkant b [mm]				150				
Bredde underkant b_1 [mm]				300				
Hylletykkelse h_1 [mm]				300				
Areal tverrsnitt A [mm ²]				120 000				
Overdekning [mm]				25				
Flyt. slakkarm. f_{yk} [MPa]				500				
Flyt spennarm. f_{pk} [MPa]				1860				
Dim. mom. M_{Ed} [kNm]				265				
Karbonklasse			A	Ekstrem	Gj.snitt	B	A	Ekstrem
Armeringsdata	Gj.snitt	Optimal	C&T	C&T	Gj.snitt	C&T		
Fasthet betong [MPa]	Gj.snitt	Optimal	30	30	Gj.snitt	30		
Bøylearm. A_s	$\varphi 6c185$			92 mm ² /m	$\varphi 5c200$			
Bøylearm. A_{s_v}	Ukjent			94 mm ² /m	$\varphi 5c200$			
Spennarm. A_p	663 mm ² 5 φ 13			453 mm ² 3 φ 14				
Lengdearm. hjørne A_h	Ukjent			100,5 mm ² 2 φ 8				
Trykkarm. i trykksone A_t	804 mm ² 4 φ 16	213 mm ² 1 φ 20	615,3 mm ² 3 φ 18	213 mm ² 1 φ 20	615,3 mm ² 3 φ 18			
Trykkarm. i strekksone A_t	Inkl. i spennarm.	213 mm ² 1 φ 20	615,3 mm ² 3 φ 18	213 mm ² 1 φ 20	615,3 mm ² 3 φ 18			
Totalt slakkarm. [kg]	56,85	40,6	86,1	40,6	86,1			
Totalt spennarm. [kg]	39,28			25,6				
Totalt betong [m ³]				0,86				
Utslipp armering [kg CO ₂ - ekv.]	68 : 21%	46 : 18%	46,3 : 21%	46,3 : 33%	46 : 15%	46,3 : 19%	46,3 : 21%	46,3 : 33%
Utslipp betong [kg CO ₂ - ekv.]	258 : 79%	258 : 82%	173 : 79%	95 : 67%	258 : 85%	199 : 81%	173 : 79%	95 : 67%
Totalt utslipp [kg CO ₂ - ekv.]	326	304	219	141	304	245	219	141

