



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Konstruktiv dimensjonering av betongdekker med fokus på reduksjon av klimagassutslipp

Constructive dimensioning of concrete slabs with
focus on reducing greenhouse gas emissions

Ayesha Saleem
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved fakultet for realfag og teknologi på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) våren 2023, og markerer avslutningen på masterstudiet i Byggeteknikk og arkitektur.

Masteroppgaven har tatt for seg tema betong og miljø og hatt som mål å avdekke i hvilken grad konstruktive valg av dekker påvirker klimagassutslippet til en konstruksjon. Arbeidet med masteroppgaven har vært lærerikt, men også utfordrende til tider.

Jeg ønsker å takke min veileder Einar Nathan, førsteamanuensis ved NMBU, for å ha foreslått tema til masteroppgaven og bidratt med god veiledning og nyttige tilbakemeldinger gjennom hele skriveperioden. Jeg ønsker også å takke Ebenezer Ussher, førsteamanuensis ved NMBU, for å ha tatt seg tid til å dele sin kunnskap om dimensjonering av betongdekker, og Jørgen Aleksander Rosendahl fra BubbleDeck Consulting AS for å ha vært til stor hjelp med dimensjoneringen av BubbleDeck.

Til slutt vil jeg takke nære venner og familie, og spesielt mine foreldre, som har motivert meg og støttet meg til enhver tid.

Oslo, 07.06.2023



Ayesha Saleem

Sammendrag

Global oppvarming er en av de største utfordringene samfunnet vårt står overfor, og det har aldri vært viktigere å innføre tiltak som vil redusere utslippet av klimagasser.

Byggenæringen, og spesielt sementindustrien, er ansvarlig for en stor andel av klimagassutslippene globalt. For å gjøre byggenæringen mer miljøvennlig er det viktig å fokusere på tiltak som vil redusere utslippet av CO₂, som er en av klimagassene som bidrar mest til global oppvarming.

Dekker er et av de viktigste bæreelementene i en konstruksjon og utgjør en stor andel av det totale betongvolumet. Dimensjonering av dekker med fokus på redusert sementbruk vil dermed ha stort potensial for å redusere klimagassutslippet til en betongkonstruksjon. I denne oppgaven er det derfor valgt å undersøke i hvilken grad konstruktive valg av dekker påvirker klimagassutslippet til en konstruksjon. Det er valgt å undersøke tre ulike slakkarmerte dekker: bjelke/plate-dekke (toveisdekke), flatdekke og BubbleDeck. En enkel konstruksjon med to ulike spennvidder og varierende dekketykkelser modelleres som utgangspunkt for problemstillingen og det er tenkt at modellbygget skal representere et kontor. Det vil utarbeides et klimaregnskap for å finne klimagassutslippene til dekkene som skal måles i CO₂-ekvivalenter, basert på utslippsverdier fra Norsk Betongforening sin publikasjon nr. 37 og EPDer fra EPD Norge.

Resultatene fra klimaregnskapet viser at det er stort potensial for å redusere utslippet av CO₂ ved å velge dekker med redusert betongvolum. Både flatdekke og BubbleDeck som er to typer dekker som ligger direkte på søyler, har et mye lavere klimagassutslipp enn et tradisjonelt bjelke/plate-dekke. BubbleDeck skiller seg spesielt ut ved at det har omtrent en tredjedel mindre betongvolum enn et tilsvarende flatdekke på grunn av plastboblene som erstatter den delen av betongen som ikke har en strukturell funksjon. Grunnet den lave egenvekten til dekket, vil BubbleDeck også ha den fordel at andre konstruksjonselementer kan dimensjoneres mindre, som vil være positivt for hele konstruksjonens klimaregnskap. Felles for både flatdekke og BubbleDeck er at små spennvidder og mindre dekketykkelser gir et lavere utslipp framfor lengre spenn og tykkere dekker. Videre viser resultatene at det kan være en ytterligere miljøgevinst ved å benytte seg av lavkarbonbetong og velge riktig fasthetsklasse.

Resultatene fra masteroppgaven viser at det er stort potensial for å redusere klimagassutslippet til betongkonstruksjoner ved å fokusere på å dimensjonere dekker som

krever mindre betong i prosjekteringsfasen. Spennvidde, dekketykkelse, betongtype og fasthetsklasse vil være viktige faktorer som vil kunne ha en påvirkning på klimagassutslippet.

Abstract

Global warming is one of the biggest challenges facing our society, and it has never been more important to introduce measures to reduce greenhouse gas emissions. The construction industry, and especially the cement industry, is responsible for a large proportion of global greenhouse gas emissions. To make the construction industry more environmentally friendly, it is important to focus on measures that will reduce the emission of CO₂, which is one of the greenhouse gases that contributes the most to global warming.

Slabs are one of the most important load-bearing elements in construction, making up a large proportion of the total concrete volume. Dimensioning slabs with a focus on reduced cement use will thus have great potential for reducing the greenhouse gas emissions of a concrete structure. In this thesis, it has therefore been chosen to examine the extent to which constructive choices of concrete slabs affect the greenhouse gas emissions of a construction. It has been chosen to study three different slabs: conventional slab, flat slab, and BubbleDeck. A simple construction with two different spans and varying slab thicknesses is modeled as a starting point for the problem and it is intended that the model building should represent an office. Calculations will be carried out to find the greenhouse gas emissions of the slabs to be measured in CO₂ equivalents, based on emission values from the Norwegian Concrete Association's publication no. 37 and EPDs from EPD Norway.

The greenhouse gas calculations results show great potential for reducing the emission of CO₂ by choosing slabs with a reduced concrete volume. Both flat slab and BubbleDeck, which are two types of slabs that lie directly on columns, have much lower greenhouse gas emissions than a conventional slab. BubbleDeck stands out in that it has about a third less concrete volume than a similar flat slab, due to the plastic bubbles that replace the part of the concrete that does not have a structural function. Due to the low specific weight of the slab, BubbleDeck will also have the advantage that other construction elements can be dimensioned smaller, which will be positive for the entire construction climate accounting. Both flat slabs and BubbleDeck have in common that small spans and smaller slab thicknesses result in lower emissions than longer spans and thicker slabs. Furthermore, the results show that there can be a further environmental benefit by using low-carbon concrete and choosing the right strength class.

The results from the master's thesis show that there is great potential to reduce the greenhouse gas emissions of concrete structures by focusing on dimensioning slabs that require less

concrete in the design phase. Span width, cover thickness, concrete type, and strength class will be important factors that could have an impact on greenhouse gas emissions.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract.....	V
Figurliste	X
Tabelliste.....	XI
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Mål og problemstilling.....	2
1.2.1 Mål.....	2
1.2.2 Problemstilling.....	2
1.3 Fremgangsmåte.....	2
1.4 Avgrensning.....	3
2 Teori.....	4
2.1 Betong.....	4
2.2 Sement	4
2.2.1 Fremstilling av sement.....	5
2.2.2 Tilsetningsstoffer og tilsetningsmaterialer	6
2.3 Armering.....	7
2.3.1 Slakkarmering.....	7
2.4 Klima	8
2.4.1 Mål på klimagasser	8
2.4.2 Lavkarbonbetong	8
2.4.3 LCA – Livsløpvurdering.....	10
2.4.4 EPD – Miljødeklarasjon	12
2.5 Betongdekker.....	13
2.5.1 Bjelke/plate-dekke	15
2.5.2 Flatdekke.....	15
2.5.3 BubbleDeck	18
2.6 Grensetilstander	21
2.7 Laster og lastkombinasjoner	21
2.7.1 Permanente og variable laster.....	22
2.7.2 Lastkombinasjoner.....	22
2.8 Dimensjonering.....	23
2.8.1 Krav til overdekning	23
2.8.2 Momentkapasitet for dekker.....	25

2.8.3 Skjærkapasitet.....	26
2.8.4 Momentkapasitet for bjelker.....	28
2.8.5 Effektiv bredde for bjelker.....	28
2.8.6 Nødvendig armeringsmengde.....	29
3 Metode	30
3.1 Modellbygg.....	30
3.2 Dimensjoneringsgrunnlag.....	31
3.3 Toveisdekke.....	32
3.3.2 Dimensjonerende skjærkrefter.....	33
3.4 Bjelker.....	33
3.4.1 Dimensjonerende momenter.....	34
3.4.2 Dimensjonerende skjærkrefter.....	34
3.5 Flatdekke.....	34
3.5.1 Dimensjonerende momenter.....	35
3.5.2 Gjennomlokking	37
3.5.3 Nedbøyningsberegning.....	40
3.6 BubbleDeck	43
3.6.1 Dimensjonerende momenter.....	44
3.6.2 Gjennomlokking	45
3.7 Klimaregnskap.....	45
3.7.1 Utslippsverdier.....	46
4 Resultater	49
4.1 Materialforbruk.....	49
4.2 Toveisdekke.....	50
4.3 Flatdekke.....	51
4.4 BubbleDeck	53
4.5 Samlet resultat for alle dekkene.....	54
5 Diskusjon	56
5.1 Materialforbruk.....	56
5.2 Toveisdekke.....	57
5.3 Flatdekke.....	57
5.4 BubbleDeck	58
5.5 Samlet resultat for alle dekkene.....	58
5.5.1 Case 1.....	58
5.5.2 Case 2.....	59
5.5.3 Spennvidde og ulike dekketykkelser	59
5.5.4 Lavkarbonbetong	60

5.5.5 Fasthetsklasser	61
5.5.6 Andre faktorer.....	61
5.6 Feilkilder.....	62
5.6.1 BubbleDeck	62
6 Konklusjon.....	63
6.1 Videre arbeid	65
Referanser	66
Vedlegg.....	69
Vedlegg A: Dimensjonering av toveisdekke	70
Vedlegg B: Dimensjonering av flatdekke.....	91
Vedlegg C: Dimensjonering av BubbleDeck	113

Figurliste

Figur 2.1: Fremstilling av trinnene i produksjonen av Portlandsement, inspirert av figur B 2.1 i Maage (2015).....	6
Figur 2.2: Ulike faser i en EPD. Illustrasjon basert på figur gitt i Bruksanvisning for hvordan tolke EPD'er – Betongelementer og fabrikkbetong (EPD Norge, u.å.-a)	13
Figur 2.3: Bjelke/plate-dekke, inspirert av figur 2.4.3 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	15
Figur 2.4: Flatdekke uten søyleforsterkning, inspirert av figur 2.4.1 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	16
Figur 2.5: Flatdekke med søyleforsterkning, inspirert av figur 2.4.1 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	16
Figur 2.6: BubbleDeck	19
Figur 2.7: Armeringsplassering i BubbleDeck, basert på figur 5.1 i BubbleDeck-veileder (Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009)	20
Figur 2.8: Avstand mellom momentnullpunkt, basert på figur 5.2 i EC2 (Norsk Standard, 2004)	28
Figur 2.9: Geometriske parametere for en T-bjelke, basert på figur 5.3 i EC2 (Norsk Standard, 2004)	29
Figur 3.1: Modellbygg tegnet i Archicad	31
Figur 3.2: T- og L-bjelke	33
Figur 3.3: Inndeling av rammer i x- og y-retning, inspirert av figur 2.4.7 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	35
Figur 3.4: Feltvis plassering av nyttelast.....	35
Figur 3.5: Momentfordeling over støtte, hentet fra Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	36
Figur 3.6: Momentfordeling i felt, hentet fra Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).....	36
Figur 3.7: Modifisering i SAP2000	44
Figur 3.8: Plastboblene i BubbleDeck blir fjernet i området rundt søylene	45
Figur 4.1: Fordeling av betongvolum for toveisdekke	50
Figur 4.2: Utslippsverdier for toveisdekket.....	50
Figur 4.3: Utslippsverdier for alle flatdekkene.....	51
Figur 4.4: Utslippsverdier for FD180 med ulike betongtyper	51
Figur 4.5: Utslippsverdier for FD180 for ulike fasthetsklasser	52
Figur 4.6: Utslippsverdier for BD280.....	53
Figur 4.7: Utslippsverdier for BD230.....	53
Figur 4.8: Samlet resultat for case 1	54
Figur 4.9: Samlet resultat for case 2	54

Tabelliste

Tabell 2.1: Materialegenskaper for armeringsstål B500NC, hentet fra EC2 (Norsk Standard, 2004) ...	7
Tabell 2.2: Grenseverdier for klimagassutslipp for ulike lavkarbonklasser [kg CO ₂ – ekv. pr m ³ betong], gjengivelse av tabell 1 i NB37 (Norsk Betongforening, 2020):	10
Tabell 3.1: Spennvidder og søyledimensjoner for modellbygg	30
Tabell 3.2: Parametere for valgte BubbleDeck (BubbleDeck Consulting, u.å.-c).....	43
Tabell 3.3: Kuledimensjoner og avstander (BubbleDeck Consulting, u.å.-d).....	43
Tabell 4.1: Materialforbruk case 1	49
Tabell 4.2: Materialforbruk bjelker	49
Tabell 4.3: Materialforbruk case 2	49
Tabell 4.4: Volum av plastbobler i BubbleDeck (BubbleDeck Consulting, u.å.-d).....	50
Tabell 4.5: Nedbøyningsresultat for flatdekkene.....	52
Tabell 4.6: Utslippsverdier pr. m ² for flatdekker og BubbleDeck	55

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Økende havnivå, isbreer som smelter og mer ekstremvær er konsekvenser av en av de mest avgjørende utfordringene i vår tid, nemlig klimakrisen. De siste årene har det vært en signifikant økning i bevisstheten rundt klima og miljø, og fokus på å redusere utslippet av klimagasser for å stoppe den globale oppvarmingen har aldri vært viktigere. Blant de ulike klimagassutslippene er det spesielt utslipp av CO₂ som bidrar til klimaendringer. Globalt står byggenæringen for omtrent 40 % av det totale CO₂-utslippet (Keilman, 2020), og i Norge står byggenæringen for omtrent 15 % av norske klimagassutslipp (Asplan Viak, 2019). Betong er et byggemateriale som står for en stor andel av klimagassutslippene i byggenæringen, og på verdensbasis står sementindustrien alene for omtrent 8 % av CO₂-utslippene (Andrew, 2019). Til tross for dette er betong fortsatt et av de mest brukte materialene i hele verden, grunnet sine mange gode egenskaper.

Betong er et materiale som er satt sammen av flere elementer. Ved å blande sement med vann og tilsette aggregater i form av stein og sand i tillegg til tilsetningsmaterialer og tilsetningsstoffer, får vi betong. Det viser seg at sement er hovedkilden til klimagassutslipp i betong og står for 90 % av det totale utslippet, til tross for at den ikke utgjør mer enn 10-15 % av volumet til betongen (Norsk Betongforening, 2020).

For å kunne redusere det totale klimagassutslippet til en konstruksjon, vil det derfor lønne seg å se på tiltak som reduserer bruken av sement. Et slikt tiltak kan være konstruktiv dimensjonering der man har fokus på miljøvennlige konstruksjoner som bruker reduserte mengder med betong og dermed mindre sement. Dekkene er et av de viktigste bæreelementene i en konstruksjon og utgjør en stor andel av det totale betongvolumet. Et bevisst valg av dekker slik at det brukes minst mulig betong kan dermed ha en positiv påvirkning på det totale klimagassregnskapet til et prosjekt. I denne oppgaven er det derfor valgt å vurdere tre ulike betongdekker for å finne ut hvordan de presterer i forhold til hverandre med hensyn på klimagassutslipp.

1.2 Mål og problemstilling

1.2.1 Mål

Målet med denne oppgaven er å avdekke i hvilken grad konstruktive valg av dekker påvirker klimagassutslippet til en konstruksjon. Dette skal gjøres ved å regne ut hvor store mengder betong og armering som trengs for å dimensjonere de tre ulike betongdekkene, slik at et klimaregnskap kan utarbeides.

1.2.2 Problemstilling

Hovedproblemstillingen:

I hvilken grad vil konstruktive valg av dekker påvirke utslippet av klimagasser.

Følgende delproblemstillinger blir definert for å svare på hovedproblemstillingen:

- Hvordan vil valget mellom et tradisjonelt bjelke/plate-dekke, flatdekke og BubbleDeck påvirke utslippet av klimagasser?
- Hvordan påvirker spennvidde og dekketykkelse utslippet av klimagasser?
- Hvordan påvirker ikke-konstruktive valg som lavkarbonbetong og fasthetsklasse konstruksjonens utslipp av klimagasser?

1.3 Fremgangsmåte

I denne masteroppgaven er det valgt å utføre et modellstudium. Grunnen til at det ikke blir tatt utgangspunkt i et faktisk eksisterende bygg eller prosjekt, er fordi det er klimagassutslippet og en oversikt over materialforbruket for de tre dekkene som er hovedfokuset i oppgaven, og ikke ren prosjektering av en konstruksjon. Derfor vil en enkel konstruksjon med to ulike spennvidder og varierende dekketykkelser modelleres som utgangspunkt for problemstillingen. Det er tenkt at modellbygget skal representere et kontor. Tre ulike dekker skal undersøkes: bjelke/plate-dekke, flatdekke og BubbleDeck. Oppgaven deles inn i to caser, der case 1 vil ta for seg de tre dekkene med spennvidde 7,2 x 7,2 meter og dekketykkelse 280 mm. I case 2 vil kun flatdekke og BubbleDeck med spennvidde 5 x 5 meter og varierende dekketykkelser bli vurdert. Klimagassutslippet til de ulike dekkene måles i CO₂-ekvivalenter med utgangspunkt i tilgjengelige data om materialene som brukes,

hovedsakelig med tall fra Norsk Betongforening sin rapport nr.37 og relevante EPDer fra EPD Norge.

For dimensjonering av de ulike dekkene vil det hovedsakelig utføres håndberegninger i programmene MathCAD og Microsoft Excel. Beregningene av dekkene vil gjøres i henhold til de gjeldene reglene i NS-EN 1992-1-1 Eurokode 2 (EC2) og andre aktuelle veiledere. I tillegg vil FEM-analyseprogrammet SAP2000 bli brukt for lastberegninger. Det vil utføres beregninger i bruddgrensetilstand for alle tre dekkene. I bruksgrensetilstand vil det kun regnes på nedbøyning for flatdekkene.

1.4 Avgrensning

Grunnet tidsbegrensning er det valgt å avgrense oppgaven noe:

- Det er valgt å kun vurdere tre ulike dekker. I realiteten vil også andre dekker som hulldekke og plattendekke være aktuelle løsninger for denne typen konstruksjon.
- Det regnes kun på slakkarmerte dekker.
- For flatdekker er for stor nedbøyning ofte et problem grunnet den høye egenvekten til dekket. I denne oppgaven vil det derfor kun utføres en forenklet nedbøyningskontroll for flatdekkene, ettersom at det regnes på lange spennvidder og mindre dekketykkelser enn det som er anbefalt.
- For BubbleDeck vil det ikke bli utført kontroll på deformasjon og fuger.

2 Teori

I dette kapitlet vil teori som ligger til grunn for dimensjonering av dekkene og utførelsen av klimagassregnskapet bli presentert. Kapitlet starter med å introdusere betong som materiale og gir en oversikt over utslipp av klimagasser knyttet til betongproduksjon. Videre blir nødvendig teori om ulike tiltak og verktøy som er relevante for klimaregnskapet presentert. Til slutt beskrives de ulike dekkene som skal vurderes i oppgaven, og en mer detaljert beskrivelse av beregningsmetoden som har blitt brukt for de ulike dekkene blir presentert i metode-kapitlet.

2.1 Betong

Betong er et av de mest brukte materialene i byggebransjen, både her i Norge og i resten av verden (SINTEF, 2020). Det er mange av betongens gode egenskaper som gjør det anvendelig i både små og store prosjekter. Betong har blant annet god brannmotstand og varmelagringskapasitet, i tillegg til høy styrke og bestandighet.

Betong er laget av flere materialer som blandes sammen. Hovedmaterialene er vann, sement og tilslag i form av stein og sand. I tillegg er bruk av tilsetningsmaterialer eller tilsetningsstoffer vanlig, for å gi betongen spesielle egenskaper og styrke. Når vannet reagerer med sementen, skjer det en kjemisk reaksjon som gir en stiv masse som oppnår mer og mer styrke etter hvert som den herder. Denne blandingen kalles for sementlim og fyller opp hulrommet mellom tilslaget. Sementlimet utgjør omtrent 30 volumprosent av betongen, mens de resterende 70 volumprosentene er stein og sand (Maage, 2015). Blandingens formidling slik det er ønskelig, og det er vanlig med både plasstøpte betongkonstruksjoner og prefabrikkerte betongelementer.

2.2 Sement

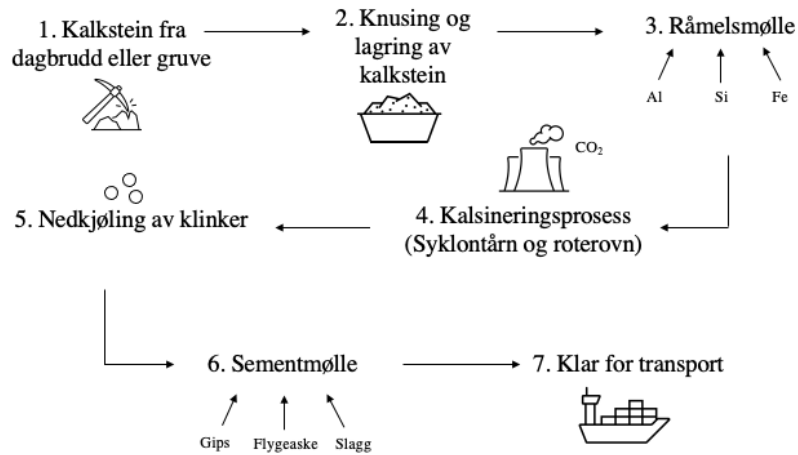
Sement er et bindemiddel som reagerer med vann og danner en hard masse i en kjemisk prosess som kalles for hydratisering (SINTEF Byggforsk, 2016). Denne harde massen fungerer som limet mellom tilslaget i betongen, og er også det som står for den største andelen av klimagassutslippet til betong. Produksjonen av sement rundt omkring i verden stiger, og prognosen for videre vekst er varierende. I 2020 ble det produsert omtrent 4,1

milliarder tonn med sement, og utslippet av CO₂ i forbindelse med produksjonen er anslått til å være ca. 2,4 milliarder tonn (Årtun et al., 2023).

2.2.1 Fremstilling av sement

Sement er laget av klinker som er finmalt sammen med gips (SINTEF Byggforsk, 2016) . Denne type sement kalles for portlandsement og er den mest brukte i verden, og den vanligste her i Norge også. For å fremstille klinker brennes råmel av kalkstein og andre råmaterialer som inneholder jernoksid, silisiumoksid og aluminiumoksid (materialer som leire, skifer, kvarts, osv.) til et fint pulver. Det finmalte pulveret, eller rådelet, varmes deretter opp til rundt 1400-1500 °C i en roterovn(SINTEF Byggforsk, 2016). Disse ovnene fyres vanligvis opp med fossilt brensel, og bidrar til en betydelig del av CO₂-utslippet (Maage, 2015). For å oppnå sintring og omdannelse til klinker har forbrenningsgassen en temperatur på rundt 2000 °C. Sintring er navnet på prosessen der et mineralsk materiale varmes opp til en temperatur hvor partiklene herder til et fast stoff (Kolbeinsen, 2019). Klinkeren kjøles så ned og males sammen med gips og andre tilsetningsmaterialer i store møller, som også er en energikrevende prosess.

Den kjemiske prosessen der kalkstein varmes opp kalles for kalsinering, og utgjør den største andelen av CO₂-utslippet. Kalkstein er en bergart som oftest er laget av marine sedimenter. Med andre ord er kalkstein koraller og bløtdyr som levde i havet for mange millioner år siden. Disse organismene består av blant annet karbon, og er grunnen til at sammensetningen til kalkstein inneholder både karbon og oksygen. Når kalksteinen varmes opp og kalsineringsprosessen settes i gang, slippes denne CO₂-en ut (Bjørnstad, 2016). Utslippet fra denne prosessen er ikke mulig å redusere (Maage, 2015), men det er derimot mulig å erstatte deler av sementen med forskjellige tilsetningsmaterialer og tilsetningsstoffer for å redusere miljøbelastningen (SINTEF Byggforsk, 2016). Eksempler på slike tilsetningsmaterialer kan være slagg eller flygeaske.



Figur 2.1: Fremstilling av trinnene i produksjonen av Portlandsement, inspirert av figur B 2.1 i Maage (2015).

2.2.2 Tilsetningsstoffer og tilsetningsmaterialer

Ulike kjemiske produkter som man bruker for å endre egenskapene til betongen og sementen går under betegnelsen tilsetningsstoffer. Ved tilsetting av disse stoffene vil man kunne endre egenskaper som styrke eller størknings- og herdetid, i både fersk og herdnet fase. Til sammen utgjør disse stoffene mindre enn 5% av den samlede sementmengden i betongen (SINTEF Byggforsk, 2016). Tilsetningsstoffer deles inn i grupper etter hvilken funksjon de har. Eksempler på noen slike grupper er herdingsakselererende stoffer, plastiserende- og superplastiserende stoffer, og luftinnførende stoffer (Maage, 2015).

Pozzolaner og hydrauliske bindemidler er to type tilsetningsmaterialer som brukes i sementproduksjon. Disse tilsetningsmaterialene vil i praksis bare fungere som bindemidler i kombinasjon med portlandsement (Norsk Betongforening, 2020). Det vanligste tilsetningsmaterialet er pozzolaner, som er en betegnelse på forskjellige typer finfordelte uorganiske tilsetningsmaterialer. Eksempler på de vanligste pozzolanene i Norge er flygeaske og silikastøv (SINTEF Byggforsk, 2016). Et eksempel på et hydraulisk bindemiddel er slagg fra produksjon av jern (Norsk Betongforening, 2020). Felles for alle disse materialene er at de er rester fra andre industrier med store karbonutslipp (Maage, 2015). For karbonregnskapet til sement som utgjør mer enn 90% av betongens samlede karbonavtrykk, vil dette være et positivt bidrag ettersom karbonavtrykket er knyttet til hovedproduktet og ikke restproduktene (Norsk Betongforening, 2020).

2.3 Armering

Betong har svært lav strekkstyrke (Thue, 2022). Dette betyr at uarmert betong har et veldig begrenset bruksområde og kan bare brukes i konstruksjoner der strekkpåkjenningene er lave. Det var først da armert betong ble mer utbredt på 1900-tallet at betongen ble et mer anvendelig byggemateriale (Thue, 2022).

Armeringen, vanligvis i form av stenger eller kabler i stål innstøpt i betongen gir stor strekkstyrke og duktilitet. Kamstål brukes om vanlig armeringsstål og er sirkulære stenger med tversgående «kammer» som skal sikre heft mellom armering og betong (Larsen & Aune, 2004). For at armeringen skal opprettholde sin funksjon er det viktig at den er forankret i begge ender, slik at tøyningen og kreftene kan overføres fra betong til stål. Det finnes ulike typer armering: slakkarmering, spennarmering og fiberarmering. I denne oppgaven vil det kun regnes på slakkarmering.

Selv om det er energikrevende å produsere stål, er det vanskelig å redusere mengden armering i en konstruksjon på grunn av dens viktige funksjon, til tross for at den bidrar negativt til karbonregnskapet i et prosjekt. I Norge derimot er det meste av armeringsstålet laget av resirkulert stål, og vil derfor ikke ha for stor negativ påvirkning på karbonregnskapet (Maage, 2015).

2.3.1 Slakkarmering

Slakkarmering kjennetegnes av at armeringen blir støpt i betongen uten å ha blitt påført ytre krefter, i motsetning til spennarmering som får en forspenning før støpning (SNL, 2019). Slakkarmeringen legges i lengde- eller tverretning og som bøyer.

I denne oppgaven vil det bli regnet på slakkarmering med kvalitet B500NC.

Materialegenskapene til slakkarmeringen som blir brukt i oppgaven er hentet fra EC2 og gitt i tabellen under:

Tabell 2.1: Materialegenskaper for armeringsstål B500NC, hentet fra EC2 (Norsk Standard, 2004)

Dimensjonerende flytgrense - f_{yd}	434 MPa
Karakteristisk flytgrense - f_{yk}	500 MPa
Materialfaktor - γ_s	1,15
E – modul - E_s	200000 MPa

2.4 Klima

Med økende fokus på miljø i byggebransjen de siste årene har det blitt innført ulike tiltak for å redusere klimagassutslippet knyttet til byggeprosjekter. Det har også blitt utviklet ulike verktøy for å kunne føre klimaregnskap på både produkter som blir brukt og hele prosjekter. Slike verktøy gjør det mulig å vurdere hvilke alternativer som gir størst miljøgevinst i et prosjekt, samtidig som at det gir en oversikt over hvor det er potensial for forbedring. I dette delkapitlet vil et slikt tiltak og to verktøy som er utviklet for å måle miljøpåvirkningen til ulike produkter og prosjekter bli presentert. Denne teorien vil også være relevant for klimaregnskapet som vil bli utarbeidet for de ulike dekkene.

2.4.1 Mål på klimagasser

For å måle klimagassutslipp er det vanlig å bruke benevnningen CO₂-ekvivalenter (Miljødirektoratet, 2019). Dette er en måleenhet som brukes i blant annet offisiell statistikk for å sammenligne de forskjellige klimagassenes evne til å varme opp atmosfæren. De ulike gassene som bidrar til klimagassutslipp regnes om til CO₂-ekvivalenter slik at de lettere kan sammenlignes. Utslippet fra en bestemt klimagass målt i CO₂-ekvivalenter sier noe om hvor mye CO₂ som må slippes ut for å gi tilsvarende oppvarming (Miljødirektoratet, 2022). For å regne om de ulike gassene benytter man GWP (Global Warming Potential) som omregningsfaktor. GWP sier noe om hvor sterk klimaeffekten til gassene er over en bestemt periode, vanligvis en tidsperiode på 100 år. For CO₂ er GPW per definisjon lik 1 (Miljødirektoratet, 2022).

2.4.2 Lavkarbonbetong

Et av tiltakene som har blitt innført for å redusere klimagassutslippet til sement er produksjon av det som heter lavkarbonbetong, som er et resultat av at det nå stilles strengere krav til nye sement- og betongtyper. I Norsk Betongforening sin publikasjon nr. 37 som omhandler lavkarbonbetong (NB37) finner vi følgende definisjon på hva lavkarbonbetong er og hvordan utslippet av klimagasser knyttet til denne betongen måles:

Lavkarbonbetong defineres som konstruksjonsbetong produsert i samsvar med reglene i NS-EN 206+NA/1/, der det er gjort tiltak for å begrense klimagassutslippet.

Klimagassutslippet defineres og målsettes i denne sammenhengen som CO₂-ekvivalenter, der bidraget fra andre gasser enn CO₂ er vektet iht. GWP (Global Warming Potential)/2/ (Norsk Betongforening, 2020, s. 5).

Tiltakene handler hovedsakelig om å erstatte deler av sementen med andre type materialer slik at sementmengden, og dermed også klimagassutslippet knyttet til betong, blir redusert. Eksempler på slike tilsetningsmaterialer kan være ulike type pozzolaner eller hydrauliske bindemidler, som er nærmere beskrevet i delkapitlet om sement. Lavkarbonbetong deles inn i fire ulike nivåer, og disse er:

- Lavkarbon B
- Lavkarbon A
- Lavkarbon Pluss
- Lavkarbon Ekstrem

Lavkarbonklasse B, som er den laveste klassen, er mulig å oppnå med ordinære resepttekniske tiltak. Den dekker de fleste vanlige betongtypene som finnes på markedet. Deretter kommer klasse A som er strengere enn klasse B, og mulig å oppnå ved bruk av spesielle resepttekniske tiltak. Lavkarbonklasse Pluss og Ekstrem har strengere krav enn både klasse A og B og krever bruk av spesielle bindemiddelsammensetninger, som ikke er forventet at er tilgjengelig overalt. Disse spesielle bindemiddelsammensetningene er heller ikke godkjent for alle de ulike bestandighetsklassene. Det er også viktig å vurdere bruken av lavkarbonbetong opp mot andre tiltak som kan ha en miljøgevinst, som for eksempel reduksjon av betongvolumet i et konstruksjonselement. Hvordan konstruksjonen utformes, og hvilke tverrsnittdimensjoner og spennvidder som velges vil altså kunne ha en viktig betydning for klimaregnskapet. Dette skal undersøkes i denne oppgaven.

Ved bruk av ulike resepttekniske tiltak kan betongens egenskaper som fasthetsutvikling og støpelighet bli påvirket. Ved bruk av lavkarbonbetong kan det derfor være utfordringer med for eksempel vinterstøp eller i elementindustrien (Norsk Betongforening, 2020). Disse endringene gjelder hovedsakelig lavkarbonklasse A, Pluss og Ekstrem. Egenskapene til lavkarbonklasse B vil ikke endre seg stort fra normal betong.

I tabellen er det en oversikt over lavkarbonbetongklasser med grenseverdier for klimagassutslipp:

Tabell 2.2: Grenseverdier for klimagassutslipp for ulike lavkarbonklasser [kg CO₂ – ekv. pr m³ betong], gjengivelse av tabell 1 i NB37 (Norsk Betongforening, 2020):

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

Utslipet er oppgitt for 1 m³ betong og dekker fase A1 til A3 i en livssyklusanalyse, altså fra råvareuttaket til betongen forlater blandeverkets fabrikkport. Det er ikke nødvendigvis slik at alle kombinasjoner av lavkarbonklasse og fasthetsklasse er tilgjengelig i hele landet. Dette er fordi tilgjengeligheten på bindemidler, kompetanse og erfaring hos leverandør, samt transportforhold vil være varierende fra sted til sted. Det er spesielt begrenset med tilgjengelighet på lavkarbon Pluss og lavkarbon Ekstrem (Norsk Betongforening, 2020).

2.4.3 LCA – Livsløpvurdering

LCA er en forkortelse for Life Cycle Assessment eller «livsløpvurdering» som det heter på norsk. LCA er et verktøy som benyttes for å kartlegge og vurdere hvordan et produkt eller et produktsystem påvirker miljøet gjennom hele sitt livsløp på en systematisk måte (LCA.no AS, u.å.). De økonomiske og sosiale aspektene ved et produkt er vanligvis ikke inkludert i en slik analyse (Standard Norge, 2006). Ved hjelp av en slik analyse vil det være mulig å sammenligne ulike produkter og systemer for å finne de mest miljøvennlige løsningene. Det vil også være mulig å kartlegge hvordan produkter eller systemer kan forbedres på ulike steder i sitt livsløp. Produktet og produktsystemet blir vurdert fra vugge til grav, altså fra råvareutvinning til produktets levetid er over. De forskjellige fasene som inkluderes i en LCA-analyse er som følger (LCA.no AS, u.å.) :

- Utvinning
- Produksjon
- Distribusjon
- Bruk

- Avhending

LCA brukes i alt fra tidligfasen i et prosjekt og underveis for å finne gode miljøvennlige løsninger eller for å dokumentere eventuelle miljøbesparelsen etter at prosjektet er ferdig. I NS-EN 14040:2006 finnes en beskrivelse av prinsipper og rammeverk for hvordan en LCA-analyse skal utarbeides. I denne oppgaven skal det ikke utarbeides egne LCA-analyser.

En LCA-analyse deles inn i fire trinn etter NS-EN 14040:2006 (Standard Norge, 2006):

1. Fastsettelse av hensikt og omfang
2. Livsløpregnskap (LCI)
3. Livsløpseffektvurdering (LCIA)
4. Tolkning

Videre blir disse fire trinnene i LCA-analysen kort oppsummert etter beskrivelsen gitt i NS-EN 14040:2006.

Trinn 1

I det første trinnet i en LCA bestemmes hensikten og omfanget til analysen som skal utføres. I denne fasen skal det tydeliggjøres hvorfor analysen utføres, hvilket produktsystem som skal undersøkes, hvilke forutsetninger som ligger til grunn, begrensinger på analysen, osv. I denne fasen inkluderes også den funksjonelle enheten, som sier noe om hvordan miljøpåvirkningene til et produkt eller en tjeneste kvantifiseres. I noen tilfeller kan det være utfordrende å finne en passende funksjonell enhet dersom et produkt har flere funksjoner (Ellingsen, 2023). Et eksempel på en funksjonell enhet kan være: Klimagassutslipp pr kvadratmeter betongdekke med en levetid på 50 år. Systemgrensene til analysen bestemmes også i denne fasen, for å sette en begrensning på hvilke aktiviteter og prosesser som inkluderes i analysen.

Trinn 2

Det andre trinnet i en LCA er livsløpsegenskapet. Dette trinnet omfatter innsamling av nødvendig data og prosedyrer for beregninger som er grunnlaget for kvantifiseringen av faktorer som går inn og ut av produktsystemet. Inngangsfaktorer kan være i form av energi og råmaterialer. Utgangsfaktorer kan være utslipp til jord, vann og luft (Standard Norge, 2006). Livsløpsegenskapet er en iterativ prosess og kan føre til at datainnsamlingsprosedyren, samt hensikten og omfanget til studien, må justeres. Etter at data er innsamlet, utføres det en beregningsprosedyre som inkluderer validering av innsamlet data, relatering av data til

enhetsprosessor og relatering av data til den funksjonelle enhetens referansestrøm (Standard Norge, 2006).

Trinn 3

I det tredje trinnet i en LCA skal det gjøres en vurdering av miljøpåvirkningene ved å bruke resultatene fra livsløperegnskapet. I denne fasen blir utslippene klassifisert og karakterisert ved å koble data fra LCI med bestemte miljøpåvirkningskategorier og kategoriindikatorer. GWP er et eksempel på en miljøpåvirkningskategori for klimapåvirkning som er beskrevet tidligere i oppgaven, mens bruk av måleenheten CO₂-ekvivalenter for utslipp vil være en måte å karakterisere klimagassutslippet på.

Trinn 4

I det siste trinnet i en LCA-analyse blir resultatene tolket og det blir gjort en samlet vurdering av resultatene fra LCI- og LCIA-analysene, som skal stemme overens med hensikten og omfanget som ble fastsatt tidligere. Tolkningen og vurderingen skal sammen gi en lett og oversiktlig presentasjon av resultatene fra analysen. I dette trinnet bør det også tydelig komme fram at analysen ikke gir et fasitsvar, men at resultatene forteller noe om potensielle miljøeffekter og danner et grunnlag for konklusjon og videre anbefalinger basert på analysens hensikt (Ellingsen, 2023).

2.4.4 EPD – Miljødeklarasjon

En EPD (Environmental Product Declaration) , eller «miljødeklarasjon» som det heter på norsk, er et dokument som inneholder en kortfattet beskrivelse av miljøvirkningen til en tjeneste eller et produkt (LCA.no AS, u.å.). En LCA-analyse er grunnlaget for utvikling av EPDer for ulike produkter, og krav til hvordan en EPD skal utformes er nærmere beskrevet i ISO-standarden 14025 (EPD Norge, u.å.-b). Hensikten med EPDer er at det skal være mulig å gjøre en sammenlikning av miljøprofilen til ulike produkter og materialer innenfor samme produktkategori. Slik vil det være lettere å foreta et valg om hvilke produkter og materialer som lønner seg å bruke med tanke på miljøet. EPD Norge har også utviklet flere bruksanvisninger for hvordan EPDene til ulike produkter skal tolkes (EPD Norge, u.å.-a)

En EPD baserer seg på de ulike livsløpfasene til et produkt eller materiale. Det er vanlig å gjøre en vurdering av et produkt fra *vugge til grav*, som vil si fra produksjon til avhending. Da inkluderes alt fra produksjonsfasen, transport, montering og bruksfasen fram til riving, og eventuell gjenbruk. For bygningsdeler er det vanlig å begrense seg til produksjonsfasen, som ofte beskrives som *vugge til fabrikkport* (fase A1-A3). Andre ganger inkluderes også transport- og installasjonsfasen og da brukes ofte begrepet fra *vugge til byggeplass* (Fase A1-A5). I figuren under er de ulike fasene fra A1 til C4 en EPD baserer seg på illustrert med de aktuelle fasene for denne oppgaven markert i blått:

Produktfase			Konstr. / install.fase		Bruksfase					Slutfase			
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjon og installasjon	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskifting	Renovering	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4

Figur 2.2: Ulike faser i en EPD. Illustrasjon basert på figur gitt i Bruksanvisning for hvordan tolke EPD'er – Betongelementer og fabrikkbetong (EPD Norge, u.å.-a)

I denne oppgaven skal det benyttes utslippsverdier for ulike betongklasser gitt i NB37, som er begrenset til fase A1-A3. For andre produkter, som for eksempel armering, vil EPDer fra EPD Norge bli brukt.

2.5 Betongdekker

Dekker er et av de bærende elementene i en konstruksjon og er ofte understøttet av søyler og bjelker. Forskjellige typer dekker, også kalt for plater, fungerer som både etasjeskillere, gulv, tak og som dekkeelementer i andre strukturer som broer. Plater defineres som todimensjonale konstruksjonselementer som har en liten tykkelse i forhold til de andre dimensjonene, og er belastet med både jevnt fordelte og konsentrerte laster normalt på sitt eget plan (Larsen & Aune, 2004). Platen vil bære lastene i både x- og y-retning i motsetning til bjelken, som kun

bærer last i en retning. Dette gjør at en plate har bøyemomenter i x- og y-retning, torsjonsmoment og skjærkrefter i to retninger.

Betongdekker kan være både plaststøpte eller prefabrikkerte elementer, og deles inn i enveis- eller toveisplater. Om dekket er enveisplate eller toveisplate, avhenger av hvor mye last som bæres i de to retningene, som igjen avhenger av spennviddeforholdet mellom de to retningene (Sørensen, 2017). Dersom spennviddeforholdet mellom den lengste og korteste siden er større enn 2, dvs. $L_y/L_x > 2,0$, er platen definert som en enveisplate etter EC2 5.3.1(5) (Norsk Standard, 2004). I en slik plate vil lasten kun bæres i en retning, og dette vil være det korteste spennet (x-retning). En enveisplate vil være understøttet av bjelker i kun den ene retningen, i motsetning til toveisplaten som bærer last i begge retninger, og dermed har underliggende bjelker i begge retninger. I en toveisplate vil spennviddeforholdet mellom de to retningene være mindre enn 2, dvs. $L_y/L_x < 2,0$. Toveisplaten vil ha en mindre platetykkelse enn enveisplaten, grunnet bjelker i begge retninger, men vil kreve mer arbeid med forskaling, armering og støping (Larsen & Aune, 2004). Flatdekke og BubbleDeck er to eksempler på toveisplater som ligger direkte på søyler uten bjelker.

I denne oppgaven skal toveisplaten understøttet av bjelker, flatdekke og BubbleDeck undersøkes, som alle er plaststøpte løsninger med unntak av BubbleDeck som er delvis prefabrikkert. Dette er bare noen av mange løsninger for dekker i betong. Valg av dekkesystem har betydning for framdriften og økonomien til et prosjekt, og kan i tillegg være en viktig faktor for byggets totale klimaregnskap, som er det som vurderes i denne oppgaven. Det er valgt å vurdere flatdekke fordi det er en av de vanligste løsningene for etasjeskillere i kontorbygg (BubbleDeck Norway AS, 2023). BubbleDeck er en annen innovativ dekkeløsning egnet for blant annet kontorbygg og er relevant å vurdere grunnet sitt lave forbruk av betong sammenlignet med tilsvarende massivdekker. Selv om dekker med kryssende bjelker ikke er den vanligste løsningen her i Norge (Larsen & Aune, 2004), er det valgt å ha den med for å kunne få et bedre bilde av utslippet til denne løsningen sammenlignet med de to andre dekketyperne.

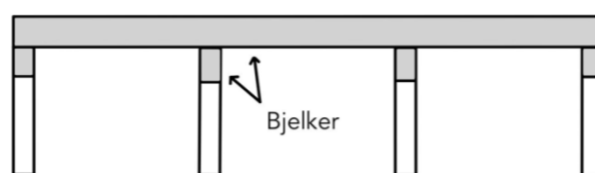
Plaststøpte og prefabrikkerte betongdekker

Betongdekker kan både være plaststøpte og prefabrikkerte, og begge løsninger har sine fordeler og ulemper. Plaststøpte betongkonstruksjoner er den tradisjonelle måten å bygge på og skiller seg fra prefabrikkerte elementer ved at de støpes på byggeplassen.

Forskalingsformene lages og bindes med armering før de fylles med betong ute på stedet. Fordeler med plasstøpte betongkonstruksjoner er at de er stabile og tilpasningsdyktige dersom det skulle være behov for å rette opp feil eller gjøre endringer i konstruksjonen ved senere anledning. For prefabrikkerte elementer vil muligheten til å gjøre endringer underveis og i ettertid være mer utfordrende og begrenset. Redusert behov for veitransport er en annen fordel for plasstøpte betongkonstruksjoner (SINTEF, 2018). Ulempene derimot er at hele prosessen med å støpe på stedet er tidskrevende, sammenlignet med prefabrikkerte elementer som produseres på fabrikk og blir fraktet til byggeplassen der de raskt blir montert.

2.5.1 Bjelke/plate-dekke

Bjelke/plate-dekke er et begrep som brukes om et plasstøpt betongdekke som er understøttet av bjelker i enten en eller to retninger. I denne oppgaven vil det regnes på et slikt dekke som har underliggende bjelker i begge retninger, som videre vil bli omtalt som toveisdekke. I denne type dekker er bjelkene og dekke vanligvis støpt i ett. Fordelen med et slikt toveisdekke med kryssende bjelker er at det vil kunne ha en mindre platetykkelse og større spennvidder sammenlignet et enveisdekke med bjelker i kun en retning. Dette er fordi all lasten ikke bæres av dekket alene, men overføres videre til bjelkene og deretter videre til søylene. Til tross for lengre spennvidder vil ulempen med et slikt dekke blant annet være redusert romhøyde grunnet de underliggende bjelkene, og dermed et mindre estetisk og funksjonelt resultat sett fra et arkitektonisk perspektiv.



Figur 2.3: *Bjelke/plate-dekke, inspirert av figur 2.4.3 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017)*

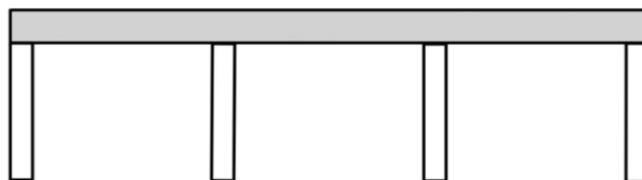
2.5.2 Flatdekke

Et flatdekke kjennetegnes av at dekke ligger direkte på søyler uten støtte fra bjelker mellom søylene, som ofte er plassert i et rektangulært mønster. Dekkene kan utformes på to hovedformer, avhengig av blant annet størrelsen på lastene og avstanden mellom søylene (Norsk Betongforening, 2004). Flatdekkene utformes enten med eller uten søyleforsterkning, siden den lokale skjærkapasiteten ved søylene ofte kan bli for lav (Sørensen, 2017). Uten

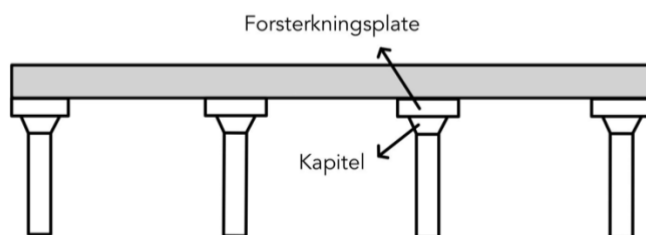
søyleforsterkningen vil dekke være helt plant på undersiden, og kalles for «flat plate» på engelsk. Fordelen med denne utformingen vil være at montering av rør, ventilasjonskanaler og andre tekniske installasjoner vil bli enklere, i tillegg til at denne type dekke gir mer romhøyde. Et dekke med søyleforsterkning kalles for «flat slab» på engelsk.

Søyleforsterkningen kan enten gjøres ved at søyletoppen utvides med et kapitel, som på engelsk kalles for «capital» eller «column head», eller ved hjelp av en forsterkningsplate. På engelsk kalles forsterkningsplaten for «drop panel» og brukes for å lokalt øke platetykkelsen rundt søylene. En kombinasjon av kapitel og forsterkningsplate er også en vanlig måte å designe flatdekker på. Ulempen med søyleforsterkning vil være noe redusert takhøyde og mer forskalingsarbeid.

I et vanlig toveisdekke understøttet av bjelker vil lastene bli overført til søylene via bjelkene. I flatdekke derimot vil lastene gå direkte til søylene. Sørensen (2017) beskriver at den statiske virkemåten til et flatdekke kan sammenlignes med et dekke med toveisplater som bæres av kryssende bjelker. Dersom man tenker seg at bjelkene gjøres så lave at bjelkehøyden blir den samme som platetykkelsen, har man et flatdekke (Sørensen, 2017).



Figur 2.4: Flatdekke uten søyleforsterkning, inspirert av figur 2.4.1 i *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017)



Figur 2.5: Flatdekke med søyleforsterkning, inspirert av figur 2.4.1 i *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017)

Spennvidder og dekketykkelser

Når det gjelder lange spennvidder, har flatdekker noen begrensinger. Nedbøyning som ofte er større enn ønsket fører til bruksproblemer, grunnet den høye egenvekten til dekke.

Erfaringsmessig viser det seg at nedbøyningen for et flatdekke er 20 – 40% større sammenlignet med et tilsvarende toveisdekke (Norsk Betongforening, 2004). Valg av platetykkelse og armeringsmengde er derfor to av de viktigste faktorene som kan justeres for å sikre akseptable nedbøyninger. I Norsk Betongforenings publikasjon nr. 33 som omhandler flatdekker (NB33), er det derfor anbefalt å begrense spennvidden til flatdekkene til inntil ca. 7,2 meter (Norsk Betongforening, 2004). Slik vil altfor store armeringsmengder og platetykkelser unngås. I bruddgrensetilstand vil ikke større spenn være et altfor stort problem, men som nevnt kan det gi noen utfordringer i bruksgrensetilstand. I denne oppgaven er det derfor valgt å ikke regne på større spennvidder enn 7,2 meter.

I NB33 er det beskrevet at tidligere minstekrav til platetykkelser var satt til $h \geq l/30$. Dersom nedbøyningen skal holdes på et akseptabelt nivå, vil denne minimumstykkelsen kreve store armeringsmengder. Det er derfor anbefalt å velge platetykkelse i for eksempel størrelsesorden $l/25$ dersom man regner med spennvidder opp mot 7,2 meter og vanlige nyttelaster. Det er anbefalt å velge enda større dekketykkelse dersom størrelsen på nyttelasten nærmer seg egenvekten. For mindre spennvidder derimot, som for eksempel inntil 5 meter, vil minimumstykkelse etter $h \geq l/30$ mest sannsynlig være tilstrekkelig.

Gjennomlokking

Flatdekkene vil som nevnt ha store lokale skjærkrefter pr lengdeenhet rundt søylene. Dersom skjærkapasiteten rundt søylene overskrides, vil det være fare for lokale gjennomlokkingsbrudd. Sørensen (2017) beskriver at det stemples ut et tredimensjonalt, kjegleformet legeme ved et gjennomlokkingsbrudd. Dette kan unngås ved å forsterke området rundt søylene ved å øke platetykkelsen lokalt med noen av løsningene nevnt ovenfor.

Alternativt er det også mulig å øke skjærkapasiteten ved legge skjærarmering i området rundt søylene, som er løsningen som antas for denne oppgaven. For flatdekkene vil det derfor utføres gjennomlokkingskontroll for å sikre at dekkene har tilstrekkelig med kapasitet for gjennomlokking.

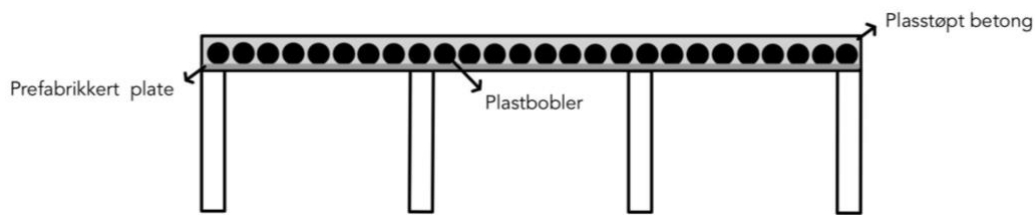
Armering

Flatdekker kan være både slakkarmerte og spennarmerte. I denne oppgaven skal det regnes på slakkarmering, som er den tradisjonelle måten å armere flatdekker på. I et slikt flatdekke vil det legges armering i begge lengderetninger, og det er vanlig å legge underkantarmring i felt og overkantarmring over støtter i den lengste spennretningen dersom man har to ulike spennvidder (Norsk Betongforening, 2004). Dette er fordi det er her det vil oppstå størst momenter. Dersom man har to like spennvidder, er det mulig å bytte på hvor armeringen ligger nærmest betongoverflaten. Det hensiktsmessige vil være å legge grunnarmering på over- og underside, og tilleggsarmering der det er behov (Norsk Betongforening, 2004).

2.5.3 BubbleDeck

BubbleDeck er et bi-aksialt byggesystem for dekkekonstruksjoner oppfunnet av Jørgen Breuning på 90-tallet i Danmark. Dekket fungerer som et vanlig flatdekke som spenner i to retninger og består av bi-aksiale hulldekkeelementer (BubbleDeck Consulting, u.å.-b) . Elementene består av en prefabrikkert bunnplate i betong med ferdigmontert armering og hule plastbobler som er støpt inn i dekke på forhånd. De hule plastboblene er laget av enten ren polypropylen (PP) eller en co-polymer som består av polypropylen (PP) og polyetylen (PE) og erstatter 100 kg betong for hver kg plastikk som blir brukt (Varshney et al.). Den øvre delen av dekke er plasstøpt og fyller opp plassen mellom boblene og overkantarmeringen.

BubbleDeck har som fordel at de har mye lavere egenvekt og redusert materialforbruk sammenlignet med en tilsvarende massivplate. Dette skyldes de hule plastboblene i dekke som erstatter den delen av betongen som ikke har en strukturell funksjon. Dermed vil ikke bæreevnen eller stivheten til dekke bli vesentlig redusert (Bubbledeck Consulting, u.å.-a). Grunnet den lave egenvekten til dekkene er det mulig å få til fleksible løsninger og større spenn ved bruk av BubbleDeck. Samtidig vil den reduserte egenvekten også gjøre det mulig å redusere tverrsnittet til andre bæreelementer, som vil resultere i konstruksjoner med et lavere betongforbruk. En annen fordel med dekke er at hele dekkelementet i seg selv, inkludert plastboblene, kan resirkuleres (Varshney et al.).



Figur 2.6: *BubbleDeck*

Spennvidder og dekktykkelser

BubbleDeck utformes som et flatdekke som ligger på søyler uten støtte fra bjelker. Ettersom en del av dekke er prefabrikkert, er det kun mulig å velge mellom fem forhåndsbestemte dekketykkelser. Den minste dekketykkelsen er 230 mm og den største dekketykkelsen er 450 mm. Det er mulighet for å øke dekketykkelsen ved å støpe ekstra lag med betong. Med tanke på produksjon og transport er det derfor noen begrensninger på hvilke dimensjoner de prefabrikkerte dekkeelementene kan ha når de skal leveres til byggeplassen. Vanligvis leveres dekkeelementene med en bredde på 2,4 meter og en lengde på opptil 12 meter, men kan også leveres med maksimal bredde på 3,0 meter og maks lengde på 14 meter (Bubbledeck Norway AS, 2023).

Kapasitet

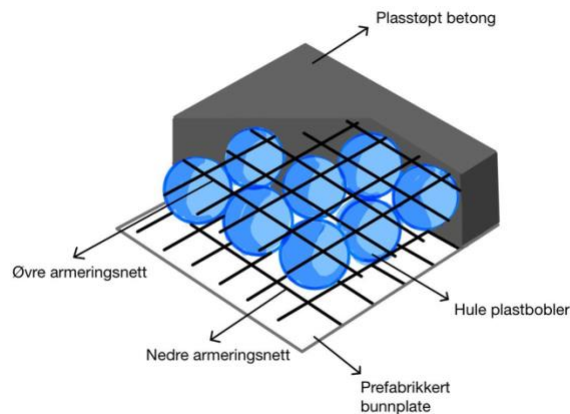
Hovedprinsippet for BubbleDeck er at dimensjoneringen kan utføres etter de samme prinsippene som gjelder for massive plater (Bubbledeck Norway AS, 2023; Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009). Kapasiteten for moment og skjær inkludert gjennomlokking må kontrolleres. I tillegg må det utføres kontroll på deformasjoner og fuger, men dette vil ikke bli gjort i denne oppgaven.

Når det gjelder den konstruktive oppførselen til et BubbleDeck med tanke på bøyning, vil den være identisk som den konstruktive oppførselen til en massiv plate. Dette betyr at en BubbleDeck-plate og en massivplate med samme dimensjoner vil ha omtrent samme bærekapasitet (Bubbledeck Norway AS, 2023). Skjærkapasiteten til BubbleDeck er derimot lavere enn for massivplater. I områder der man har konsentrerte laster, som for eksempel rundt søylene, anbefales det derfor å fjerne plastboblene i området rundt søylen i en avstand minimum $2d$ fra søylekant slik at man får et massivtverrsnitt. Kontroll for gjennomlokking kan dermed utføres på samme måte som for et massivtverrsnitt (Bubbledeck Norway AS, 2023). Bøyestivheten til BubbleDeck er også redusert i forhold til massivplater. En kan

derfor regne med omtrent 15 % større nedbøyninger for en BubbleDeck-plate med samme totallast (egenvekt + nyttelast) som for en massivplate (Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009).

Armering

I figuren under det vist hvordan armeringen i BubbleDeck er plassert. Slakkarmering er den vanlige måten å armere BubbleDeck på, men spennarmering kan også benyttes dersom det for eksempel er ønske om mindre nedbøyning. Armeringsnettene i topp og bunn fungerer som hovedarmering og bindes sammen med langsgående gitterdragere. Armeringsnettene, som er ferdigproduserte, har også som funksjon å holde plastkulene på plass. For å unngå at heftkapasiteten reduseres er det også viktig at armeringen ikke er nær eller i kontakt med plastboblene (Bubbledeck Norway AS, 2023).



Figur 2.7: Armeringsplassering i BubbleDeck, basert på figur 5.1 i BubbleDeck-veileder (Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009)

I bunnplaten legges det nedre armeringsnett. Det dimensjoneres etter behov ut ifra laster og spennvidder. Alternativt er det også mulig å benytte standard nett og dimensjonere tilleggsarmering etter behov, som legges i bunnplaten og mellom plastboblene.

Armeringsnettene i topp skal hindre plastboblene i å flyte opp ved støping, og i tillegg begrense rissutvikling. Eventuell tilleggsarmering i overkant er en del av den plasstøpte betongplaten, og legges derfor mellom plastboblene på byggeplass. Vanligvis er det ønske om å dimensjonere BubbleDeck slik at det ikke er behov for ekstra skjærarmering. Ved behov for skjærarmering utføres det som for massivplater (Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009).

I denne oppgaven er det valgt å benytte seg av standard armeringsnett som passer de gjeldende BubbleDeck-platene. Der det valgte armeringsnett ikke dekker all nødvendig armering som trengs i dekkene, legges resterende armeringsmengde til som tilleggsarmering.

2.6 Grensetilstander

Når en konstruksjon skal dimensjonere, er det viktig å kontrollere at konstruksjonen oppfyller dimensjoneringskriteriene innenfor de ulike grensetilstandene. De ulike grensetilstandene er definert i NS-EN 1990 og sier noe om hva grensen til en konstruksjon eller et konstruksjonselement er før den ikke oppfyller de gitte dimensjonskriteriene. I NS-EN1990 (Norsk Standard, 2002a) er følgende grensetilstander beskrevet:

- Bruddgrensetilstanden (Ultimate State Limit - ULS)
- Bruksgrensetilstanden (Serviceability Limit State - SLS)
- Ulykkesgrensetilstanden
- Utmattingsgrensetilstanden

I denne oppgaven vil det kun være aktuelt å gjøre kontroller gitt i bruddgrensetilstanden og bruksgrensetilstanden. I bruddgrensetilstanden bestemmes det om konstruksjonen eller konstruksjonselementet har tilstrekkelig kapasitet mot brudd. Ulike lastvirkninger som kontrolleres i denne tilstanden er blant annet aksialkraft, skjærkraft og bøyemoment. I bruksgrensetilstanden skal det kontrolleres om konstruksjonen eller konstruksjonselementet oppfyller kravene til dens bruk og formål i løpet av sin brukstid, i tillegg til å sikre at konstruksjonen er bestandig (Sørensen, 2017). Ulike krav knyttet til deformasjoner og opprissing i konstruksjonen kontrolleres også i denne tilstanden.

I denne oppgaven vil det i bruddgrensetilstanden hovedsakelig utføres kontroller for moment- og skjærkapasitet. I bruksgrensetilstand vil det bli utført forenklet nedbøyningskontroll for flatdekke.

2.7 Laster og lastkombinasjoner

Alle konstruksjoner vil utsettes for ulike type laster. Krav til hvor mye last konstruksjonen må tåle å bære vil være avhengig av hva slags konstruksjon som dimensjoneres og hva dens formål er. Lastene på en konstruksjon kan opptre som punktlaster og linjelaster, og det er vanlig å dele inn laster i tre hovedgrupper etter deres variasjon i tid og rom: permanente laster, variable laster og ulykkeslaster (Larsen & Aune, 2004). Hvordan laster oppstår og hvordan de oppfører seg over tid vil være avgjørende for hvilken hovedgruppe lasten faller inn under. I denne oppgaven vil de ulike lastene som påføres på dekkene bestemmes ut ifra den typiske lastsituasjonen for et kontorbygg.

2.7.1 Permanente og variable laster

Permanente laster på en konstruksjon er laster som er tidsuavhengige og ikke endrer seg, eller forblir permanente gjennom tilnærmet hele levetiden til konstruksjonen. Eksempler på slike laster er egenvekten til konstruksjonen, ytre vanntrykk, jordtrykk og egenvekten til permanente installasjoner (Larsen & Aune, 2004). I denne oppgaven vil egenvekten være den permanente lasten for alle tre dekkene. Egenvekten inkluderer både betongen og armeringen i dekkene, og eventuelle plastbobler for BubbleDeck. For det plasstøpte dekke og flatdekke vil egenvekten beregnes ut ifra tyngdetettheten til armert normalbetong, og settes lik 25 kN/m^3 etter tabell A1 i NS-EN 1991-1-1 (Norsk Standard, 2002b). For BubbleDeck som er et mye lettere dekkeelement vil egenvekten være en tabellverdi avhengig av tykkelsen på dekkelementene, og hentes fra BubbleDeck Norway sin hjemmeside (BubbleDeck Consulting, u.å.-c) .

En konstruksjon vil også i løpet av sin levetid bli påvirket av ulike laster som vil variere i styrke og intensitet. Disse lastene blir kalt for variable laster og kan være snølaster, vindlaster eller nyttelaster ut ifra hvilken type konstruksjon man dimensjonerer for. I denne oppgaven vil den karakteristiske nyttelasten for kontor være den variable lasten som blir brukt. Nyttelasten for kontor er en tabellverdi som hentes fra tabell 6.2 i NS-EN 1990-1-1 (Norsk Standard, 2002b), og er satt til å være $q_k = 2,0 - 3,0 \text{ kN/m}^2$. I denne oppgaven er det valgt å benytte $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$.

2.7.2 Lastkombinasjoner

For å finne de dimensjonerende lastene som konstruksjonen skal dimensjoneres ut ifra må de ulike lastene kombineres. Dette gjøres ettersom konstruksjonen er påkjent av ulike laster som virker samtidig. Lastkombinasjonen beregnes etter ligning 6.10a og 6.10b i NS-EN-1990 (Norsk Standard, 2002a) og det blir brukt ulike partialfaktorer og kombinasjonsverdier for variable påvirkninger. Den største lastkombinasjonen, det vil si den mest ugunstige kombinasjonen, vil være dimensjonerende for konstruksjonen. Ligning 6.10a og 6.10b er gitt nedenfor med to variable laster. I denne oppgaven er det kun en variabel last som betyr at det siste leddet i ligningen sløyfes.

$$Q_{Ed} = \gamma_{Gj,sup} * G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} * \psi_{0,1} * Q_{k,1} + \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

der:

- $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$
- $\gamma_{Q,1} = 1,5$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
- $\gamma_{Q,i} = 1,5$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
- $\psi_{0,1} = 0,7$ for kontorer

$$Q_{Ed} = \varepsilon * \gamma_{Gj,sup} * G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

der:

- $\varepsilon = 0,89$
- $\gamma_{Gj,sup} = 1,2$ (I Norge brukes 6.10a og 6.10b, slik at $\varepsilon * \gamma_G = 0,89 * 1,35 = 1,20$)
- $\gamma_{Q,1} = 1,5$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
- $\gamma_{Q,i} = 1,5$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
- $\psi_{0,i} = 0,7$ for kontorer

I samtlige tilfeller for dimensjoneringen av dekkene kommer det fram at ligning 6.10b gir den mest ugunstige kombinasjonen, og vil dermed være dimensjonerende.

2.8 Dimensjonering

I dette kapitlet vil generell teori knyttet til dimensjonering av dekkene og bjelkene bli presentert. Mesteparten av teorien er basert på NS-EN 1992-1-1 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner (EC2), mens en del er hentet fra boka *Betongkonstruksjoner* av Sørensen (2017).

2.8.1 Krav til overdekning

I EC2 blir overdekning beskrevet som avstanden mellom armeringen og den nærmeste betongoverflaten (Norsk Standard, 2004). Overdekningen har som hensikt å beskytte armeringsjernet mot korrosjon og det stilles derfor krav til nødvendig overdekning i EC2

4.4.1. Krav til overdekning blir beregnet etter formel for nominell overdekning gitt i EC2

4.4.4.1 (2) (Norsk Standard, 2004):

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Det første leddet, C_{min} , beskrives som den minste overdekningen. Den skal sikre at armeringen ikke korroderes, men også at det er en sikker overføring av krefter ved hjelp av heft og at brannmotstanden blir tilfredsstillt. Verdien for C_{min} blir bestemt ut ifra følgende formel i EC2 4.4.1.2 (Norsk Standard, 2004):

$$C_{min} = \max\{C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

der:

- $C_{min,b}$ = minste overdekning som følge av kravene til heft
- $C_{min,dur}$ = minste overdekning som følge av miljøpåvirkninger
- $\Delta C_{dur,\gamma}$ = tillegg for sikkerhet
- $\Delta C_{dur,st}$ = reduksjon av minste overdekning ved bruk av rustfritt stål
- $\Delta C_{dur,add}$ = reduksjon av minste overdekning ved bruk av tilleggsbeskyttelse

$C_{min,b}$ blir satt til stangdiameter etter tabell 4.2, ettersom det skal benyttes enkeltstenger i denne oppgaven. Verdien for $C_{min,dur}$ bestemmes ut ifra den aktuelle eksponeringsklassen for konstruksjonen og er gitt i Tabell 4.4N (Norsk Standard, 2004). I denne oppgaven regnes det på dekker inne i et kontorbygg der det er relativ lav luftfuktighet. I henhold til Tabell 4.1 (Norsk Standard, 2004) som beskriver de ulike eksponeringsklassene blir det antatt at dekkene tilhører klasse XC1. Verdien for $C_{min,dur}$ blir dermed satt lik 10 mm, som er basert på klasse XC1 og dimensjonerende brukstid på 50 år, etter anbefaling i det nasjonale tillegget. I henhold til EC2 settes verdiene for $\Delta C_{dur,\gamma}$, $\Delta C_{dur,st}$ og $\Delta C_{dur,add}$ lik 0.

Innsetting av disse verdiene i formelen for C_{min} ved å anta at et vilkårlig dekke har armering med stangdiameter 12 mm gir at den minste overdekningen er lik:

$$C_{min} = \max\{12 \text{ mm}; 10 \text{ mm} + 0 \text{ mm} - 0 \text{ mm} - 0 \text{ mm}; 10 \text{ mm}\} = 12 \text{ mm}$$

Det andre leddet i formelen for nominell overdekning, ΔC_{dev} , skal ta hensyn til avvik i forbindelse med eventuelle feil under støping av betong. Verdien for ΔC_{dev} settes lik 10 mm, som er den anbefalte verdien gitt under punkt 4.4.13 i EC2.

Den nominelle overdekningen vil dermed bli:

$$C_{nom} = 12 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

Det vil bli benyttet samme metode for utregning av nominell overdekning for både dekkene og bjelkene. Verdien for nominell overdekning vil variere noe ut ifra hvilken armeringsdiameter som man velger å benytte seg av for bjelkene og de ulike dekkene.

2.8.2 Momentkapasitet for dekker

For å beregne betongtrykksjonens momentkapasitet blir formel 4.14 i Sørensen (2017) benyttet:

$$M_{Rd} = 0,8 * \alpha * (1 - 0,4 * \alpha) * f_{cd} * b * d^2$$

der:

- α = tverrsnittets trykksonehøyde
- f_{cd} = betongens dimensjonerende fasthet
- b = tverrsnittets bredde
- d = tverrsnittets effektive høyde

For å beregne ut momentkapasitetene i både x- og y-retning må verdien for trykksonehøyden α først bestemmes. Verdien på α avhenger av hvilken tøyningstilstand det aktuelle tverrsnittet har. Det er tre ulike tøyningstilstander som vil være avgjørende for verdien til trykksonehøyden (Sørensen, 2017):

- **Overarmert tverrsnitt**, $\epsilon_s < \epsilon_{yd}$: armeringen flyter ikke før betongen knuses
- **Balansert armert tverrsnitt** $\epsilon_s = \epsilon_{yd}$: flytning i armering samtidig med knusing
- **Underarmert tverrsnitt** $\epsilon_s > \epsilon_{yd}$: armeringen flyter før betongen

der:

ε_s = tøyning i armering

ε_{yd} = dimensjonerende flytetøyning

I denne oppgaven er det valgt å se på et underarmert tverrsnitt. Det er vanlig praksis å velge denne tøyningstilstanden fordi den har som fordel at den gir forvarsel om brudd gjennom synlige riss og nedbøyninger (Sørensen, 2017). Verdien for α bestemmes med utgangspunkt i et normalarmert tverrsnitt som tilsvarer armeringstøyning ved brudd lik $\varepsilon_s = 2\varepsilon_{yk} = 0,005$, og er vanlig praksis i Norge. For fasthetsklasse B25-B45 kan verdien for α settes lik 0,412.

Formelen for momentkapasitet med innsatt verdi av $\alpha = 0,412$ blir dermed:

$$M_{Rd} = 0,275 * f_{cd} * b * d^2$$

2.8.3 Skjærkapasitet

Det vil også bli utført kontroll av skjærkapasiteten, og det vil kontrolleres for både strekk- og trykkapasitet.

Beregning av skjærstrekkkapasitet gjøres med følgende empirisk formel gitt i EC2 6.2.2 (1) for når det ikke er beregningsmessig behov for skjærarmering:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_L * f_{ck})^{\frac{1}{3}} * b_w * d$$

med en minsteverdi knyttet til:

$$V_{Rd,c} = v_{min} * b_w * d$$

der:

- $C_{Rd,c} = k_2 / \gamma_c$
- $k_2 = 0,18$ for betong med største tilslag $D \geq 16$ mm, ellers 0,15
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$
- $\rho_L = \frac{A_{sL}}{b_w * d} \leq 0,02$ - armeringsforholdet for strekkarmeringen med tilstrekkelig forankring
- f_{ck} = den karakteristiske sylindrefastheten til betong [N/mm²]
- b_w = den minste tverrsnittsbredden i strekksonen [mm]

$$- v_{min} = 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$$

Dersom skjærstrekkkapasiteten ikke er tilstrekkelig, vil den nødvendige skjærarmeringen bli beregnet.

I bjelker stilles det også krav til minimum skjærarmering etter EC2 9.2.2, selv om skjærstrekkkapasiteten er større enn den dimensjonerende skjærkraften. Det stilles ikke krav til minimum skjærarmering i plater (Sørensen, 2017). For bjelker krever EC2 9.2.2 (5) et minimum skjærarmeringsforhold som bøylor:

$$\rho_{w,min} = 0,1 * \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

Skjærarmeringsforholdet er definert som:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s * b_w * \sin\alpha}$$

der:

- A_{sw} = skjærarmeringsarealet innenfor en lengde s
- s = senteravstand mellom skjærarmeringen
- α = vinkelen mellom skjærarmeringen og lengdeaksen

Beregning av trykkapasitet gjøres med følgende formel gitt i EC2 6.2.2(6):

$$V_{Rd,max} = 0,5 * b_w * d * v * f_{cd}$$

der:

- b_w = den minste tverrsnittsbredden i strekksonen [mm]
- d = tverrsnittets effektive høyde
- f_{cd} = betongens dimensjonerende fasthet
- v = fashetsreduksjonsfaktor for betong opprisset grunnet skjærkraft, definert som:

$$v = 0,6 * \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

2.8.4 Momentkapasitet for bjelker

I et plasstøpt toveisdekke vil bjelken og dekke være støpt i ett. Dette gjør at ved dimensjonering av bjelkene må de regnes på som T- eller L-tverrsnitt istedenfor rektangulære bjelker. Sørensen (2017) forklarer at dette er grunnet bøyning i bjelkeretningen som fører til at en del av platen i bjelkefeltet vil virke som en trykkflens i tverrsnittet. Der det er strekk i flensen kan man regne tverrsnittet som rektangulært. Beregning av momentkapasitet til tynne plateflenser kan etter Sørensen (2017) (likning 4.33) gjøres ved å forlange at:

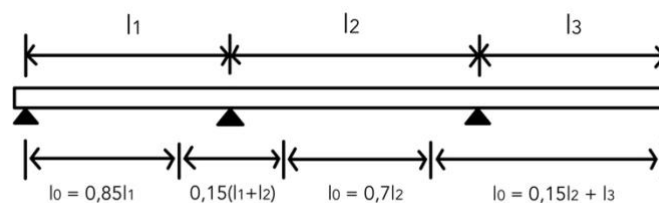
$$M_{Rd} = f_{yd} * A_s * (d - 0,5t) \geq M_{Ed}$$

og

$$M_{Rd} = f_{cd} * b_{eff} * t * (d - 0,5t) \geq M_{Ed}$$

2.8.5 Effektiv bredde for bjelker

For å kunne dimensjonere bjelken som T- eller L-tverrsnitt må den effektive flensbredden b_{eff} regnes ut. Regler for beregning av flensbredden finner vi i EC2, 5.3.2.1 (1)P, (2) og (3). Den effektive flensbredden bør beregnes basert på l_0 som er avstanden mellom momentnullpunktene er illustrert i figuren under:



Figur 2.8: Avstand mellom momentnullpunkt, basert på figur 5.2 i EC2 (Norsk Standard, 2004)

Den effektive flensbredden b_{eff} kan regnes ut med følgende formel gitt i EC2 5.3.2.1 (3):

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b$$

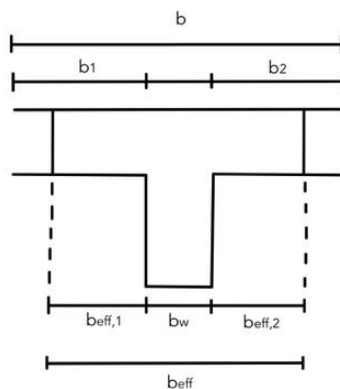
der:

$$- b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0$$

og

$$- b_{eff,i} \leq b_i$$

De ulike geometriske parameterne er illustrert i figuren under:



Figur 2.9: Geometriske parametere for en T-bjelke, basert på figur 5.3 i EC2 (Norsk Standard, 2004)

2.8.6 Nødvendig armeringsmengde

Beregning av nødvendig armeringsmengde gjøres med likning 4.26 i Sørensen (2017):

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} * z}$$

der:

- M_{Ed} = dimensjonerende moment
- f_{yd} = den dimensjonerende flytegrensen til armeringen
- z = den indre momentarmen

Beregningen av den indre momentarmen gjøres med formel 4.13 i Sørensen (2017):

$$z = \left(1 - 0,17 * \frac{m_{Ed}}{M_{Rd}}\right) * d$$

For å finne armeringen som trengs i dekkene må armeringsmengden kontrolleres opp mot kravet til minimumsarmering som er gitt i EC2 NA.9.2.1.1. Minimumsarmeringen $A_{s, min}$ regnes ut med følgende likning:

$$A_{s, min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d \geq 0,0013 * b * d$$

der:

- f_{ctm} = middelvei av sentrisk strekkfasthet ved 28 døgn
- f_{yk} = stålets karakteristiske fasthet

Den nødvendige armeringsmengden vil være den maksimale verdien av A_s og $A_{s, min}$.

3 Metode

I dette kapitlet presenteres modellbygget og en mer detaljert beskrivelse av hvordan de ulike dekkene dimensjoneres. I siste del av kapitlet blir det forklart hvordan klimaregnskapet gjennomføres.

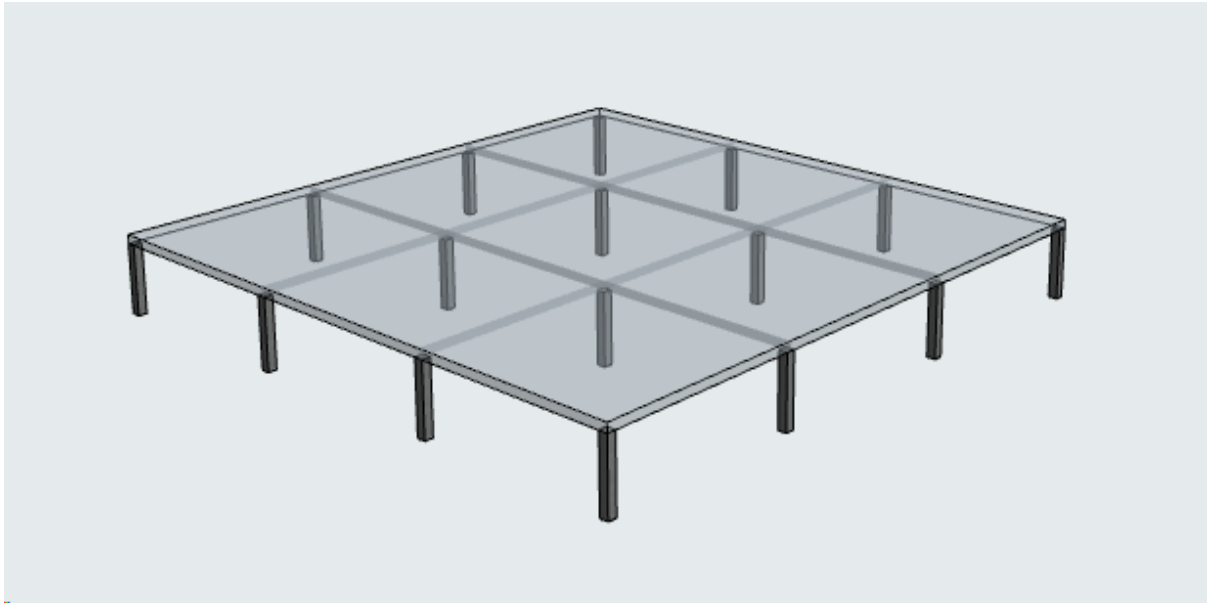
3.1 Modellbygg

Det har blitt valgt å utforme en enkel dekkekonstruksjon som det kan regnes på for å kunne sammenligne miljøpåvirkningene til de ulike dekkene. Konstruksjonen vil bestå av dekket og de tilhørende søylene som bærer dekket. For toveisdekket vil bjelkene også være en del av dekkekonstruksjonen. Det vil bli brukt samme laster (egenvekt og nyttelast for kontor) og geometri for alle tre dekketyper så langt det lar seg gjøre, for å kunne få et best mulig sammenligningsgrunnlag. For flatdekke og BubbleDeck som er vanligere dekketyper skal det dimensjoneres for to ulike spennvidder for å undersøke hvordan dette vil påvirke klimagassutslippet. For toveisdekke regnes det bare på case 1 for å få et bedre bilde av materialforbruket til et slikt dekke sammenlignet med flatdekke og BubbleDeck. De to forskjellige spennviddene, samt søyledimensjoner, er oppsummert i tabellen under:

Tabell 3.1: *Spennvidder og søyledimensjoner for modellbygg*

	Spennvidde [m]	Søyledimensjoner [m]	Dekketykkelse [m]
Case 1	7,2x7,2	0,3x0,3	0,28
Case 2	5x5	0,15x0,15	Variierende

For både toveisdekke og BubbleDeck vil ikke lengre spenn enn 7,2 meter være et problem. For flatdekke derimot kan større spenn enn 7,2 meter være en utfordring med tanke på nedbøyning. Av den grunn er det valgt å holde seg til denne spennvidden for de to andre dekketyperne også, slik at man får et best mulig sammenligningsgrunnlag.



Figur 3.1: Modellbygg tegnet i Archicad

3.2 Dimensjoneringsgrunnlag

Dimensjoneringen av alle tre dekketyperne vil utføres i henhold til NS-EN 1992-1-1 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner (EC2). Dekkene vil hovedsakelig bli dimensjonert ut fra moment- og skjærkapasitet, og de fleste formler som blir benyttet vil være hentet fra EC2. I tillegg vil boka *Betongkonstruksjoner* av Sørensen (2017) bli brukt som støtte for både beregninger og teoridelen i oppgaven. Beregningene for alle de tre ulike dekketyperne baserer seg på ulike metoder å regne toveidsekker på. Alle beregninger blir utført for hånd så langt det lar seg gjøre. I noen tilfeller, som for eksempel for flatdekke og BubbleDeck, vil det være nødvendig å bruke SAP2000 for å finne aktuelle momenter og skjærkrefter. For utforming og dimensjonering flatdekkene vil NB33 bli brukt som støtte. For BubbleDeck finnes det ikke per dags dato en gyldig veiledning. BubbleDeck Consulting jobber for øyeblikket med å publisere en oppdatert veiledning for dimensjonering av BubbleDeck. I denne oppgaven vil derfor den utgåtte veiledningen for dimensjonering av BubbleDeck bli brukt, i tillegg til gjeldene regler for flatdekke/toveisdekker siden BubbleDeck oppfører som et vanlig flatdekke som spenner i to retninger (BubbleDeck Consulting, u.å.-b).

Mot slutten av semesteret ble et utkast til den nye veilederen for BubbleDeck tilsendt fra BubbleDeck Consulting. Denne ble brukt ved behov i tillegg til den utgåtte veilederen.

3.3 Toveisdekke

Beregningen av toveisdekke er basert på elastisitetsteori. For beregning av bøyemomentene som trengs for å finne nødvendig armering blir det benyttet tabellverdier hentet fra Betonkalender 1984.

Det blir i tillegg beregnet nødvendig overdekning, for å kunne utføre kontroll av moment, skjær og beregning av nødvendig armering. Betongkvaliteten som blir regnet på er B35 for alle dekkene og det er valgt å prosjektere normalarmert.

3.3.1 Dimensjonerende momenter

Den beregnede momentkapasiteten i henholdsvis x- og y-retning blir kontrollert opp mot de dimensjonerende momentene i x- og y-retning som er beregnet ved hjelp av tabellverdier for plater med ulike randbetingelser, hentet fra Betonkalender 1984.

For modellbygget i denne oppgaven vil alle platene være fast innspenne på alle fire sider siden det er bjelker under platene. Basert på denne randbetingelsen vil det dimensjonerende momentet beregnes og dimensjoneringen av dekket vil gjøres slik som i eksempel 2.1.1 – Dimensjonering av toveisplate i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017). Momentene regnes ut med følgende formel oppgitt i Betonkalender (*Betonkalender 1984*, 1984):

Moment i x-retningen i felt (den korteste retningen):

$$M_x = q * L_x^2 / \alpha$$

Moment i y-retningen i felt (den lengste retningen):

$$M_y = q * L_x^2 / \beta$$

der:

- q = jevnt fordelt last
- L_x = spennvidden i x-retningen
- α = faktor basert på spennviddeforholdet L_y/L_x for M_x
- β = faktor basert på spennviddeforholdet L_y/L_x for M_y

Tilsvarende formel vil brukes for de negative momentene over støtter, men med andre faktorer. Siden dekket er symmetrisk i denne oppgaven, vil momentet i x- og y-retning være likt, både i felt og over støtter.

3.3.2 Dimensjonerende skjærkrefter

Beregning av dimensjonerende skjærkrefter blir også gjort med koeffisienter og formel fra Beton-kalender (*Beton-kalender 1984*, 1984):

Skjærkraft i x-retningen (den korteste retningen):

$$V_x = q * L_x / \alpha$$

Skjærkraft i y-retningen (den lengste retningen):

$$V_y = q * L_x / \beta$$

der:

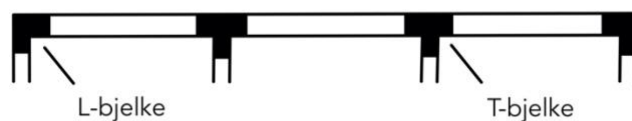
- q = jevnt fordelt last
- L_x = spennvidden i x-retningen
- α = faktor basert på spennviddeforholdet L_y/L_x for V_x
- β = faktor basert på spennviddeforholdet L_y/L_x for V_y

På samme måte som for momentene, vil også skjærkraften i begge retninger være lik. En detaljert beregning og kontroll for toveisdekke finnes i vedlegg A1.

3.4 Bjelker

For toveisdekke vil også de underliggende bjelkene dimensjoneres. Dette gjøres for å kunne inkludere betong- og armeringsmengden i klimaregnskapet, ettersom bjelkene er en del av dekketystemet. Dimensjonering av bjelkene gjøres også i henhold til EC2, med støtte fra eksempler i *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017). Betongkvaliteten som er valgt for bjelkene er også B35, og de prosjekteres også normalarmert.

Bjelkene, som er en del av det plasstøpte betongdekke, må dimensjoneres som T- eller L-bjelker. Bjelkene i midten av dekke vil dimensjoneres som T-bjelker, mens de to bjelkene i hver ende av dekke vil dimensjoneres som L-bjelker. I figuren under er bjelkene illustrert:



Figur 3.2: T- og L-bjelke

3.4.1 Dimensjonerende momenter

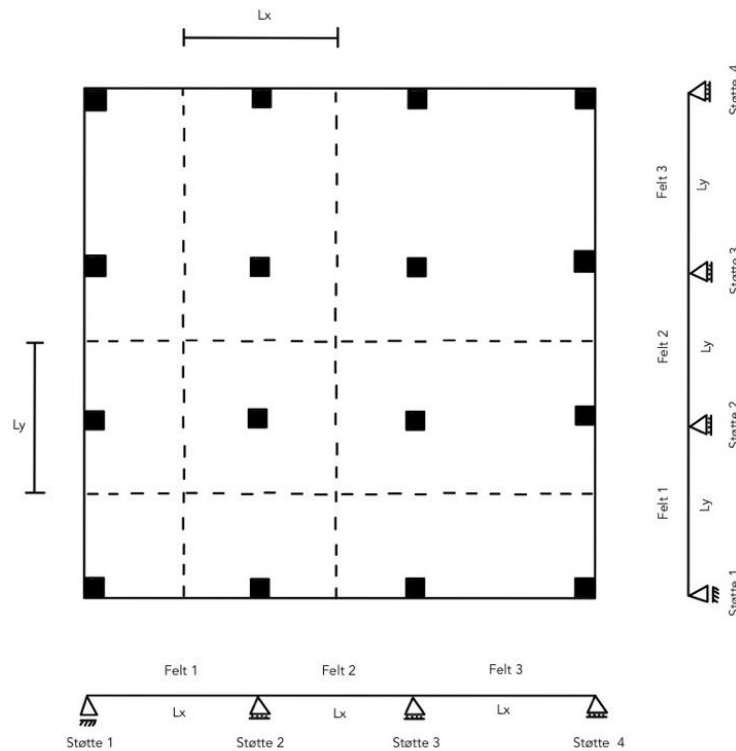
For å finne dimensjonerende momenter for bjelkene må nyttelasten plasseres feltvis ugunstig. Dette gjøres i SAP2000 ved å tegne opp den kontinuerlige bjelken og plassere nyttelasten i ulike felt. Egenvekten i dette tilfellet vil inkludere bjelkens egenvekt, samt vekten av dekke over. Det antas en høyde på 600 mm for bjelkene slik at egenvekten til bjelken kan tas med i beregningene. Bredden på bjelkene vil være 300 mm slik at de passer med søylene de ligger på.

3.4.2 Dimensjonerende skjærkrefter

Dimensjonerende skjærkrefter blir funnet i SAP2000 med samme modell av bjelken som blir brukt for å finne de dimensjonerende momentene.

3.5 Flatdekke

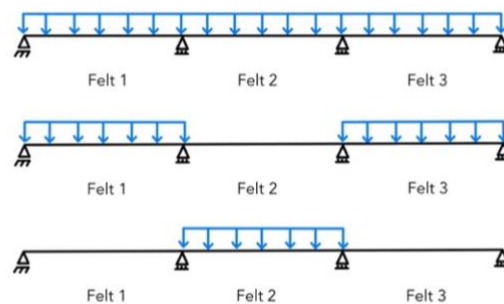
Beregning av flatdekke gjøres etter ekvivalent rammemetode, med støtte fra eksempel 2.4.8 i Sørensen (2017). Ekvivalent rammemetode går ut på dele dekket i rammer i både lengde- og tverretning. I EC2 I.1.2 er det beskrevet at rammene består av søyler og platetverrsnitt som ligger mellom senterlinjene gjennom tilstøtende understøttelser (areal som avgrenses av fire tilstøtende opplegg, altså fire søyler) (Norsk Standard, 2004). Rammen i x-retning vil ha bredde lik spennvidden i y-retning, mens rammen i y-retning vil ha en bredde lik spennvidden til x-retningen. Siden modellbygget i oppgaven er symmetrisk, vil rammene i x- og y-retning være like. I figuren under er inndelingen i rammer vist med navn på de ulike feltene og støttene:



Figur 3.3: Inndeling av rammer i x- og y-retning, inspirert av figur 2.4.7 i *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017)

3.5.1 Dimensjonerende momenter

For å finne dimensjonerende momenter i begge retninger blir SAP2000 brukt. Først deles dekke inn i plane rammer i både x- og y-retning. Deretter blir det statiske systemet for dekket modellert som en kontinuerlig bjelke i SAP2000. Høyden på bjelken vil tilsvare høyden på dekket, mens bredden på bjelken vil tilsvare rammebredden. I figuren over er bjelkene for hver av rammene vist. På samme måte som for bjelkene må nyttelasten plasseres feltvis ugunstig slik at dimensjonerende moment over støtte, M_s , og dimensjonerende moment i felt, M_f , blir funnet. Siden dekke også har tre felt, vil det være tre ulike alternativer for plassering av nyttelast, vist i bildet under:



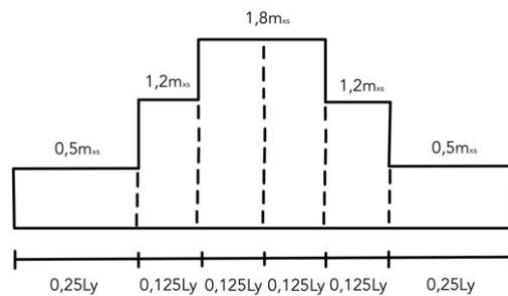
Figur 3.4: Feltvis plassering av nyttelast

I alternativ 1 er nyttelasten plassert i alle tre felt. I alternativ 2 er nyttelasten plassert i felt 1 og 3, og i det siste alternativet er nyttelasten plassert i bare felt 2.

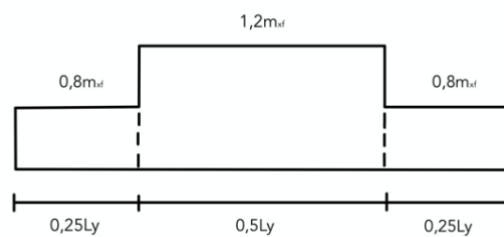
De dimensjonerende momentene blir deretter regnet om til momentintensiteter fordelt over hele rammen ved å dele de gjeldene felt- og støttemomentene på bredden til rammen. Dette gjøres ved å benytte seg av formlene under som er hentet fra *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017):

$$m_f = \frac{M_f}{L} \quad m_s = \frac{M_s}{L}$$

De totale bøyemomentene fordeles så over flatdekkestripens bredde ved å dele rammene inn i felt- og søylestriper. Inndelingen av striper, samt fordeling av moment over støtte og i felt for x-retningen, er illustrert i figurene under. Tilsvarende fordeling vil gjelde i y-retningen.



Figur 3.5: Momentfordeling over støtte, hentet fra *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017)



Figur 3.6: Momentfordeling i felt, hentet fra *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2017)

Momentverdiene blir deretter kontrollert opp mot momentkapasiteten M_{Rd} og nødvendig armeringsmengde for de ulike stripene blir regnet ut og blir kontrollert opp mot minimumsarmering. Ved bruk av ekvivalent rammemetode må den indre momentarmen z beregnes for hver av stripene i rammene siden momentene varierer i de ulike stripene.

3.5.2 Gjennomlokking

Som nevnt i teorikapitlet vil flatdekkene ha store lokale skjærkrefter pr lengdeenhet rundt søylene. Det må derfor utføres kontroll av skjærkapasitet etter EC2. Kontrollen utføres med støtte fra Eksempel: Skjærkontroll ved innersøyle, i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).

I EC2 6.4.3(2) finner vi følgende om kontroller som skal utføres:

- Ved kant av lastflate eller søylekant begrenses største skjærspenning ved konsentrert last til:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$$

- Det er ikke behov for skjærarmering dersom:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$$

- Det er behov for skjærarmering dersom:

- $v_{Ed} \geq v_{Rd,c}$

Da legges skjærarmering til slik at: $v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$

der:

- $v_{Rd,max}$ = den dimensjonerende maksimale skjærspenningskapasitet
- $v_{Rd,c}$ = den dimensjonerende skjærspenningskapasiteten for en plate uten skjærarmering
- $v_{Rd,cs}$ = den dimensjonerende skjærspenningskapasiteten for en plate med skjærarmering

Definisjonene på de dimensjonerende skjærkreftene langs kontrollsnittet er hentet fra Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017).

Den dimensjonerende skjærspenningen beregnes for et kontrollsnitt $2d$ fra søyleliv med formel 6.38 i EC2 6.4.3(3):

$$v_{Ed} = \beta * \frac{V_{Ed}}{u_1 * d_{eff}}$$

der:

- β = en faktor som tar hensyn til at det ubalanserte søylemomentet fører til økt fordelt skjær, og er gitt for spesielle søyleplasseringer i EC2.
- V_{Ed} = den dimensjonerende skjærkraften (aksialkraften i søylen)
- u_1 = omkretsen til det kritiske kontrollsnittet

- d_{eff} = den effektive tykkelsen til platen, lik gjennomsnittet av d_x og d_y

Verdier for faktoren β kan regnes ut direkte, men da dette kan være noe komplisert er det gitt tilnærmede verdier for ulike søyleplasseringer i EC2. De ulike verdiene gitt er som følger:

- $\beta = 1,5$ for hjørnesøyle
- $\beta = 1,4$ for kantsøyle
- $\beta = 1,15$ for innersøyle

Det kritiske kontrollsnittet ligger i en avstand $2d$ fra kanten av søylen og kan regnes ut for både en sirkulær og rektangulær søyle. For en rektangulær søyle, som er tilfellet i denne oppgaven, kan omkretsen av kontrollsnittet regnes ut med formel 2.4.25 i

Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$u_1 = 4\pi * d + 2c_1 + 2c_2$$

der:

- c_1 = søylens dimensjon parallelt med lastens eksentrisitet
- c_2 = søylens dimensjon vinkelrett på lastens eksentrisitet

Først regnes skjærkapasiteten uten skjærarmering for å sjekke om det er behov for skjærarmering eller ikke, med formel fra punkt 6.4.4(1) i EC2:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 * \sigma_{cp} \geq v_{min}$$

der:

- $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$
- $\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} + \rho_{lx}} \leq 0,02$
 - o ρ_{ly} og ρ_{lx} er strekkarmeringsforholdet i hver retning over en bredde lik søylebredden pluss $3d$ til hver side
- f_{ck} = den karakteristiske trykkfastheten til betong
- k_1 = en faktor lik -0,3 i strekk og lik 0,1 i trykk
- σ_{cp} = normalspenninger i betongen

$$- v_{min} = 0,035 * k^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

Det er ikke behov for skjærarmering dersom:

$$\frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c}} \leq 1,0$$

Dersom det er behov for skjærarmering, må skjærkapasiteten med skjærarmering bli beregnet etter EC2 6.4.5 (1):

$$V_{Rd,cs} = 0,75 * v_{Rd,c} + 1,5 * (d/s_r) * A_{sw} * f_{ywd,ef} * (1/u_1 * d) * \sin \alpha$$

der:

- s_r = den radielle senteravstanden mellom snitt med skjærarmering [mm]
- A_{sw} = arealet av skjærarmering langs omkretsen av ett snitt rundt søylen [mm²]
- $f_{ywd,ef}$ = den effektive dimensjonerende fastheten av skjærarmeringen ved konsentrerte laster
- d = middelveidien av effektive tykkelser i to ortogonale retninger [mm]
- α = vinkelen mellom plateplanet og skjærarmeringen

Den nødvendige skjærarmeringen, A_{sw} , kan bestemmes ved å kreve at $v_{Rd,s} \geq v_{Ed}$. For vertikal skjærarmering kan skjærarmeringen bestemmes med ligning 2.4.3 i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$A_{sw} = (v_{Ed} - 0,75 * v_{Rd,c}) * s_r * u_1 / (1,5 * f_{ywd,ef})$$

Videre kontrolleres det for gjennomlokkingskapasitet ved søylekant etter EC2 6.4.5 (3):

$$v_{Ed} = \beta * \frac{V_{Ed}}{u_0 * d} \leq v_{Rd,max}$$

der:

- u_0 = søyleomkretsen til en innersøyle
- For en kantsøyle = $c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$
- For en hjørnesøyle = $3d \leq c_2 + 2c_1$

Gjennomlokkings trykkbruddkapasitet kan beregnes med likning 2.4.37 i
Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$v_{Rd,max} = 0,4 * v * f_{cd} \leq \frac{1,6 * v_{Rd,c} * u_1}{\beta * u_0}$$

der:

$$v = 0,6 * \left[1 - \left(\frac{f_{ck}}{250}\right)\right]$$

En mer detaljert dimensjonering av flatdekke, med kontroll for gjennomlokking, finnes i vedlegg B1 og B2.

3.5.3 Nedbøyningsberegning

I denne oppgaven regnes det på to ulike spennvidder. For spennvidde 7,2 x 7,2 meter vil den minste anbefalte dekketykkelsen være $h \geq 288$ mm dersom det tas utgangspunkt i at minimumstykkelsen bør være $h \geq 1/25$. For sammenligningens skyld er det valgt å se på et flatdekket med tykkelse 280 mm (FD280), som er standardtykkelsen til BubbleDeck for den valgte spennvidden. Siden denne platetykkelsen er noe mindre enn den anbefalte tykkelsen for den gitte spennvidden, er det valgt å utføre en forenklet nedbøyningsberegning av dekket. For flatdekke med spennvidde 5 x 5 meter vil den anbefalte tykkelsen være $h \geq 200$ mm dersom man regner ut platetykkelsen med størrelsesorden $h \geq 1/25$. Det er valgt å regne på et dekke med denne tykkelsen (FD200), men også et flatdekke med tykkelse 180 mm (FD180) for å kunne sammenligne hvor mye utslippet påvirkes ved reduksjon i dekketykkelse. Dekketykkelse vil være større enn det som er anbefalt etter tidligere prosjekteringsstandarder, men siden nedbøyning kan være dimensjonerende for flatdekker, er det valgt å regne ut nedbøyning for begge dekkene med spennvidde 5 x 5 meter også.

For et flatdekke kan nedbøyningen midt i et platefelt tilnærmet regnes ut ved å ta summen av nedbøyning i søylestripen i x-retning (δ_{xs}) og feltstripen i y-retning (δ_{yf}). Alternativt kan den totale nedbøyningen også regnes ut ved å ta summen av nedbøyning i søylestripen i y-retning (δ_{ys}) og feltstripen i x-retning (δ_{xf}).

$$\delta_1 = \delta_{xs} + \delta_{yf}$$

eller

$$\delta_2 = \delta_{ys} + \delta_{xf}$$

Grunnet kontinuitet i platen bør δ_1 og δ_2 ideelt sett bli det samme, men bruk av ulike metoder gjør at det mest sannsynlig ikke er slik. En mer nøyaktig verdi for nedbøyning vil derfor være middelverdien av de to retningene (Norsk Betongforening, 2004). I denne oppgaven er det valgt å regne ut nedbøyning kun i en retning.

Beregningsgang

For beregning av nedbøyning vil NB33 samt kapittel 2.4.7 og eksempel 2.4.8 i Sørensen (2017) bli fulgt. På samme måte som i eksempelet til Sørensen (2017) er nedbøyningsberegningen noe forenklet. Det er ikke tatt hensyn til nedbøyning på grunn av svinn eller «tension stiffening» som virker motsatt av svinnet. Det antas derfor at den beregnede nedbøyningen representerer virkeligheten godt nok (Sørensen, 2017).

For beregning av nedbøyning må lastene i bruddgrensetilstanden først skaleres til bruksgrensetilstanden. Dette blir gjort ved å benytte følgende formel for skaleringsfaktor:

$$\delta = \frac{g_c * t + \psi * p}{g_c * t * \gamma_g + p * \gamma_p}$$

der:

- g_c = egenvekt betong
- p = nyttelast
- ψ = kombinasjonsfaktor som sier noe om sannsynligheten for hvor stor del av nyttelasten som vil oppstå, og bestemmes etter EC0 Tabell NA. A1.1 etter hvilken lastsituasjon det regnes på.
- γ_g = lastfaktor egenvekt
- γ_p = lastfaktor nyttelast

Videre blir det regnet ut bøyestivhet i opprisset tilstand (Stadium II) for de ulike snittene. Denne brukes så for å beregne en midlere bøyestivhet for områdene med strekk i over- og underkant for stripene i x- og y-retning (Sørensen, 2017).

For søylestripen i x-retning blir den midlere bøyestivheten regnet ut med følgende formel i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$EI_{xm} = \beta_u * EI_{x,underkant} + (1 - \beta_u) * EI_{x,underkant}$$

der:

- $\beta_u = \frac{a}{L_x}$
- a = lengde med strekk i underkant, og regnes ut med følgende likning i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$\frac{1,2 * q * a^2}{8} = m_{sf}$$

der:

- q = permanent nyttelast i bruksgrensetilstand
- m_{sf} = moment over søyle

For feltstripen i y-retning blir den midlere bøyestivheten regnet ut med følgende formel i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$EI_{ym} = \gamma_u * EI_{y,underkant} + (1 - \gamma_u) * EI_{y,underkant}$$

der:

- $\gamma_u = \frac{b}{L_y}$
- b = lengde med strekk i underkant og regnes ut med følgende likning i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2017):

$$\frac{0,8 * q * b^2}{8} = m_{ff}$$

der:

- q = permanent nyttelast i bruksgrensetilstand
- m_{ff} = moment i felt

Den totale nedbøyningen som må være mindre enn $L/250$ etter EC2 7.4.1 (4) beregnes så ved å bruke enhetslastmetoden og hurtigintegrasjonsfaktorer, sammen med den beregnede midlere bøyestivheten. En detaljert nedbøyningsberegning for flatdekke er vist i vedlegg B3.

3.6 BubbleDeck

Det finnes flere ulike beregningsmodeller som kan brukes for dimensjonering av BubbleDeck. Den vanligste måten er å bruke et FEM-program, som for eksempel FEM-design, spesielt hvis det er store og mer kompliserte konstruksjoner som skal beregnes på. Ved håndberegning av enklere konstruksjoner er både platemodeller og flatdekke to beregningsmodeller som kan benyttes (Bubbledeck Norway AS, 2023; Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult, 2009). Dersom en benytter platemodeller, kan krefter og deformasjoner bli funnet ved å bruke tabeller og formelverk fra ulike håndbøker. Ved å betrakte BubbleDeck som et flatdekke uten søyleforsterkning, kan dekket dimensjoneres etter regler gitt for flatdekker i NB33.

I denne oppgaven er det valgt å gå for det sistnevnte alternativet, og de to BubbleDeck-platene vil dermed bli dimensjonert på samme måte som beskrevet i kapittel 3.4 om dimensjonering av flatdekke. På samme måte som for flatdekke, vil det bli brukt ekvivalent rammemetode for å finne de dimensjonerende momentene. En forskjell fra flatdekke vil være egenvekten til BubbleDeck som er redusert sammenlignet med en tilsvarende massivplate. Dette vil bli tatt hensyn til ved å justere på massetettheten til dekkene i SAP2000 i henhold til de verdiene for egenvekt som er oppgitt for de aktuelle BubbleDeck-platene på BubbleDeck Consulting AS sin nettside. I tabellen under er det en oppsummering av dimensjoner og parametere for BubbleDeck som blir brukt i denne oppgaven, samt en oversikt over plastboblene som blir benyttet:

Tabell 3.2: Parametere for valgte BubbleDeck (BubbleDeck Consulting, u.å.-c)

Dekketype	Dekketykkelse [mm]	Spennvidder [m]	Egenvekt dekke [kg/m ²]	Betongvolum ferdigdekke [m ³ /m ²]
BD230	230	5-8	400	0,154
BD280	280	7-10	480	0,185

Tabell 3.3: Kuledimensjoner og avstander (BubbleDeck Consulting, u.å.-d)

Dekketype	Kulediameter [mm]	Kulevolum [m ³]	Antall kuler [pr. m ²]	c/c plastkule [mm]
BD230	180	0,003	25	200
BD280	225	0,006	16	250

Det er valgt å undersøke to BubbleDeck med ulike dekketykkelser i denne oppgaven. I case 1 er det valgt å se på et BubbleDeck med dekketykkelse 280 mm (BD280), mens i case 2 er det valgt å se på et BubbleDeck med dekketykkelse 230 mm (BD230).

3.6.1 Dimensjonerende momenter

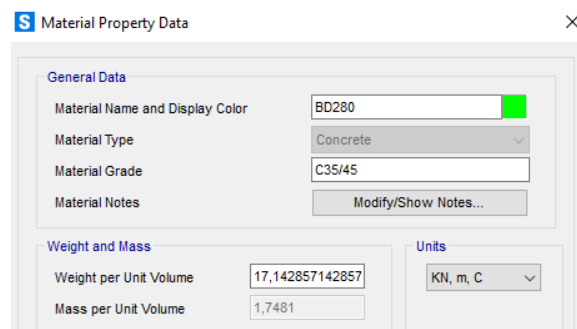
I SAP2000 er massetetthet til betongelementer satt på forhånd, men det er mulig å justere på den. For analyse av BubbleDeck ble det derfor valgt å endre på massetettheten for å få riktige dimensjonerende momenter ved bruk av ekvivalent rammeanalyse. Dette ble gjort ved å opprette to nye materialtyper i SAP2000 og bytte ut den opprinnelige verdien for massetettheten med den riktige verdien for det aktuelle elementet. For å finne verdien for massetetthet ble verdiene for dekketykkelse og egenvekt brukt. Ved å ta egenvekten til det aktuelle dekket og dele på dekketykkelsen ble massetettheten, som skulle være oppgitt i kg/m^3 , funnet. Under er det vist hvordan dette ble gjort for BD280, samt hvordan verdien ble endret i SAP2000:

$$\text{Massetetthet} = \frac{\text{Egenvekt}}{\text{Dekketykkelse}}$$

For BD280 gjelder følgende verdier:

$$\text{Massetetthet}_{BD280} = \frac{4,8 \text{ kN/m}^2}{0,28 \text{ m}} = 17,143 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Innsatt i SAP2000 så det slik ut:



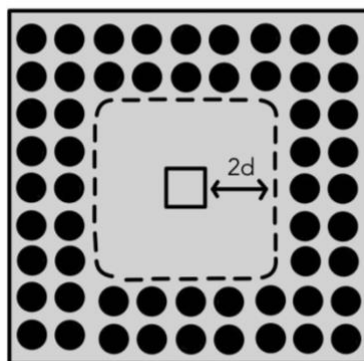
Figur 3.7: Modifisering i SAP2000

Tilsvarende endring ble gjort for BD230 også.

Videre blir rammene delt inn i felt- og søylestriper på samme måte som for flatdekke, og den nødvendige armeringen regnes ut for hver enkelt stripe. I BubbleDeck er det som nevnt vanlig å bruke et øvre- og nedre armeringsnett for å holde kulene på plass. Det vil derfor benyttes armeringsnett både i overkant og i underkant ved dimensjonering av dekkene i denne oppgaven. Armeringsnett blir valgt med hensyn til senteravstanden mellom kulene. Der nettet ikke dekker den nødvendige armeringsmengden vil den resterende mengden bli lagt til som tilleggsarmering.

3.6.2 Gjennomløkking

På samme måte som for flatdekke, kan gjennomløkking være et problem for BubbleDeck også. I en avstand minst $2d$ fra søylens ytterkant blir plastboblene derfor fjernet. Dermed kan kontroll for gjennomløkking utføres på samme måte som for flatdekke.



Figur 3.8: *Plastboblene i BubbleDeck blir fjernet i området rundt søylene*

3.7 Klimaregnskap

Klimaregnskapet for de ulike betongdekkene vil utarbeides i Microsoft Excel ved å benytte seg av materialmengdene for de ulike dekkene funnet ved dimensjonering og aktuelle utslippsverdier for de ulike materialene som betong og armering. Informasjon om utslippene til de ulike materialene er hentet fra NB37 samt aktuelle EPDer fra EPD Norge. Resultatet vil bli presentert som totalt antall kg CO₂-ekvivalenter for de ulike dekkekonstruksjonene og som antall kg CO₂-ekvivalenter pr m² for å undersøke hvordan mindre spennvidder og dekketykkelser kan påvirke den totale materialbruken og utslippet av klimagasser.

I denne oppgaven er det valgt å begrense seg til fase A1 til A3 i klimaregnskapet, da den største andelen av klimagassutslipp til en konstruksjon kommer fra disse fasene (The Low Carbon Concrete Group, 2022). Transport til byggeplass er dermed ikke inkludert i klimaregnskapet. Utslippsverdiene for de ulike betongtypene oppgitt i NB37 er også begrenset til fase A1 til A3. Med tanke på tilgjengelighet på lavkarbonbetong vil hovedsakelig lavkarbon A og B bli sammenlignet med bransjereferansen. For å undersøke potensialet med de strengere lavkarbonklassene vil det også regnes med lavkarbon pluss og ekstrem for et av dekkene. Det vil også bli undersøkt hvordan ulike fasthetsklasser kan påvirke det totale klimagassutslippet.

3.7.1 Utslippsverdier

I de tre neste tabellene er det oppsummert hvilke verdier for beregning av utslipp som er brukt for de tre forskjellige dekketyperne. Forenklinger som har blitt gjort for å utarbeide klimaregnskapet er også beskrevet i dette delkapitlet.

Tabell 3.4: Data for toveisdekke og tilhørende bjelker, fase A1 – A3

Materiale	CO2-ekv.	Enhet	Data hentet fra
Betong – bransjereferanse	330	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon B	280	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon A	210	pr m ³	NB37
Slakkarmering	0,393	pr kg	NEPD-2676-1376

Tabell 3.5: Data for flatdekke, fase A1 – A3

Materiale	CO2-ekv.	Enhet	Data hentet fra
Betong – bransjereferanse	330	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon B	280	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon A	210	pr m ³	NB37
Slakkarmering	0,393	pr kg	NEPD-2676-1376

Tabell 3.6: Data for BubbleDeck, fase A1 – A3

Materiale	CO ₂ -ekv.	Enhet	Data hentet fra
Betong – bransjereferanse	330	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon B	280	pr m ³	NB37
Betong – Lavkarbon A	210	pr m ³	NB37
BubbleDeck 340	47,67	pr m ² /BubbleDeck	NEPD-1343-442
BubbleDeck 280	46,06	pr m ² /BubbleDeck	NEPD-1342-441
BubbleDeck 230	40,66	pr m ² /BubbleDeck	Beregnet selv

For BubbleDeck vil det totale CO₂-utslippet være summen av det prefabrikkerte elementet og den plasstøpte betongen. Pr i dag er det ingen gyldige EPDer tilgjengelige hos EPD Norge for de prefabrikkerte BubbleDeck-elementene. I denne oppgaven vil derfor den gamle EPDen for BD280 bli brukt.

Da det ikke finnes noen gamle EPDer for BD230, er det valgt å gjøre en forenkling for utslippet til BD230 ved å justere på utslippsverdien til BD280. Det finnes en EPD for BD340 som har samme mengde armering og tykkelse på plattendekke som BD280. Forskjellen i utslipp mellom disse to elementene er ca. 1,7 kg CO₂-ekvivalenter/m² BubbleDeck. Det antas at denne forskjellen tilsvarer endring i plastvolumet, da BD340 vil ha et litt større volum av plastbobler. I tillegg støpes bunnplaten til BD230 10 mm tynnere enn bunnplaten til BD280 på fabrikk. Dette vil også bli tatt hensyn til ettersom BD230 bare vil ha 85% av betongvolumet til BD280-platen. Som en forenkling for utslippet til BD230 er det derfor valgt å trekke ifra 1,7 kg CO₂-ekvivalenter for det reduserte plastvolumet, og 3,7 kg CO₂-ekvivalenter/m² for det reduserte betongvolumet fra utslippet til BD280. Det omtrentlige utslippet til BD230 blir dermed:

$$BD230 = (BD280 - 1,7 - 3,7) \text{ kg } CO_2 - \text{ekvivalenter}/m^2$$

$$BD230 = (46,06 - 1,7 - 3,7) \text{ kg } CO_2 - \text{ekvivalenter}/m^2$$

$$BD230 = 40,66 \text{ kg } CO_2 - \text{ekvivalenter}/m^2$$

For BD-elementene antas det også at utslippet beregnet for betong tilsvarer utslippet for bransjereferansen. Siden EPDene ble først utgitt i 2017, er det mest sannsynlig en høyere utslippsverdi for betongen enn den gjeldende verdien, siden det i 2019 ble gjort en revisjon i

NB37 der utslippsverdien for bransjereferanse ble justert ned. For B35(M45) var den tidligere utslippsverdien lik 370 kg CO₂-ekvivalenter/m³ (Smeplass, 2015), og det er denne verdien som er brukt ved beregning av utslippet til det reduserte betongvolumet i bunnplaten til BD230.

4 Resultater

I dette kapitlet vil resultatene fra dimensjoneringen og klimaregnskapet for de ulike dekkene bli presentert. Først vil det komme en oversikt over mengde armering og betong i de ulike dekkene som har blitt beregnet samt volumet av plastbobler i BubbleDeck. Deretter vil resultater fra klimaregnskapet for de ulike dekkene bli presentert hver for seg, før det til slutt kommer et samlet resultat for de to casene som har blitt undersøkt.

4.1 Materialforbruk

I dette delkapitlet vil materialforbruket til de ulike dekkene bli presentert. Forankringslengde og omfaringslengde er beregnet i henhold til EC2 8.7.3 (1) og 8.4.4 (1), og inkludert i armeringsmengden. For BubbleDeck er også volumet av plastbobler presentert i en egen tabell.

I BubbleDeck vil det i tillegg til den beregnede armeringen være blant annet gitterdragere, bøylearmering og skjøtarmering. I den oppgitte armeringsmengden for BubbleDeck i tabellen under er det kun den beregnede armeringsmengden som er inkludert. I virkeligheten ville derfor den totale armeringsmengden for et BubbleDeck vært noe høyere.

Tabell 4.1: *Materialforbruk case 1*

Dekketype	Betong [t]	Armering [t]
Toveisdekke	311,73	5,88
Flatdekke	309,97	11,65
BubbleDeck	204,48	8,73

Tabell 4.2: *Materialforbruk bjelker*

Bjelketype	Betong [t]	Armering [t]
T-bjelker	35,36	1,52
L-bjelker	35,75	0,87

Tabell 4.3: *Materialforbruk case 2*

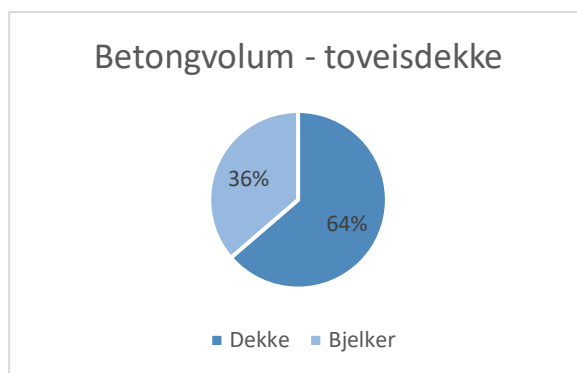
Dekketype	Dekketykkelse [m]	Betong [t]	Armering [t]
Flatdekke	0,20	107,10	2,96
Flatdekke	0,18	96,27	3,04
BubbleDeck	0,23	82,04	3,65

Tabell 4.4: Volum av plastbobler i BubbleDeck (BubbleDeck Consulting, u.å.-d)

Dekketype	Kulevolum pr. kule[m ³]	Volum kuler totalt [m ³]	Betongandel erstattet av plastkuler [%]
BD230	0,003	17,10	33
BD260	0,006	44,32	34

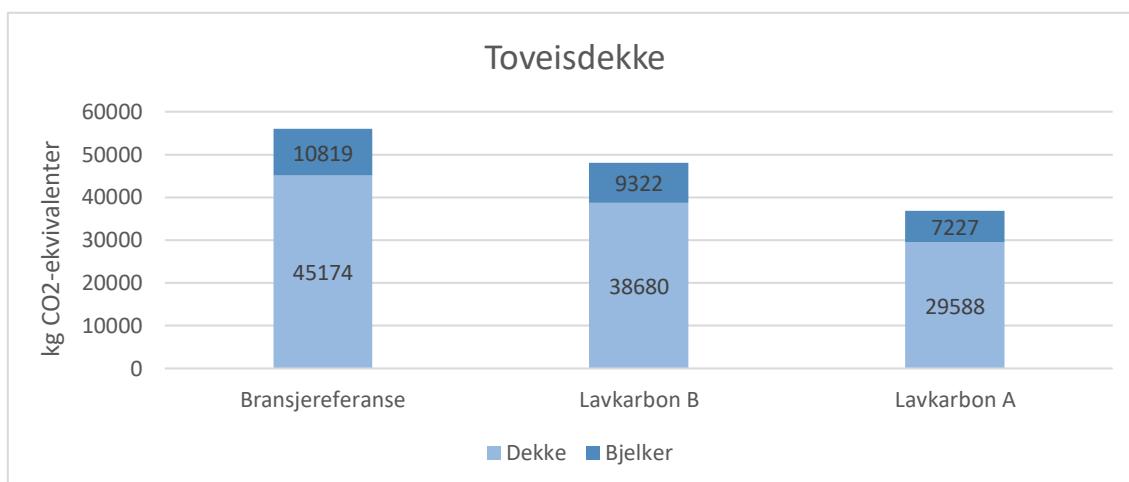
4.2 Toveisdekke

I toveisdekke vil bjelkene være en del av dekkekonstruksjonen, og det er derfor valgt å se på begge konstruksjonselementer ved beregning av klimagassutslipp. I diagrammet under vises en oversikt over hvor stor andel av det totale betongvolumet som dekke og bjelkene utgjør:



Figur 4.1: Fordeling av betongvolum for toveisdekke

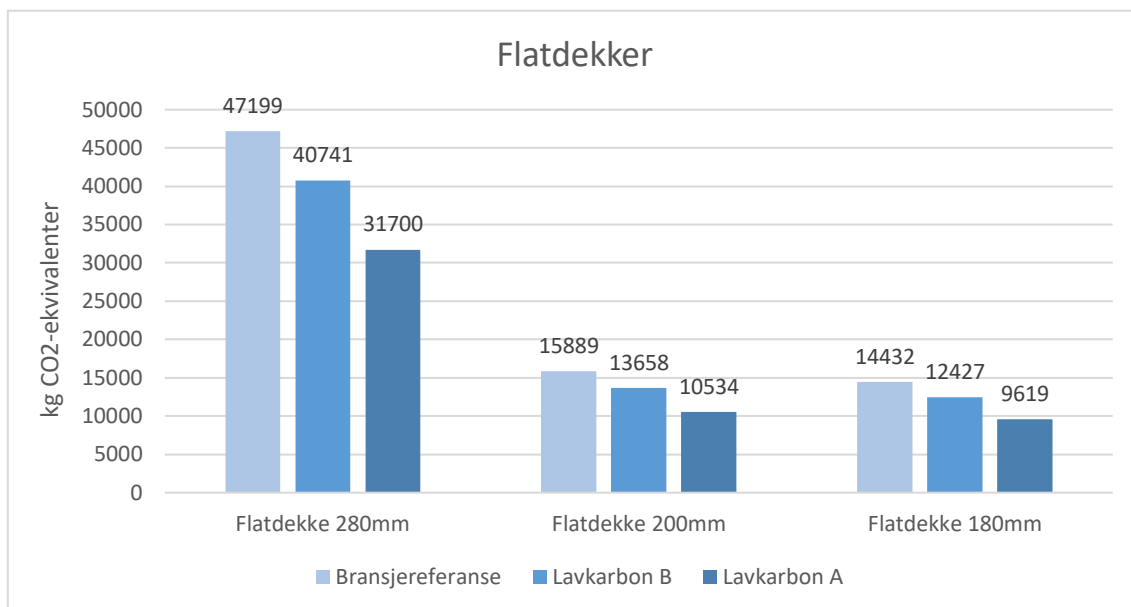
Søylediagrammet i figuren under viser utslipp av kg CO₂-ekvivalenter for toveisdekke beregnet for bransjereferanse, lavkarbon B og lavkarbon A. Av resultatene fremkommer det at det er en positiv miljøeffekt ved å velge lavkarbonbetong framfor vanlig betong som har et utslipp tilsvarende bransjereferansen.



Figur 4.2: Utslippsverdier for toveisdekket

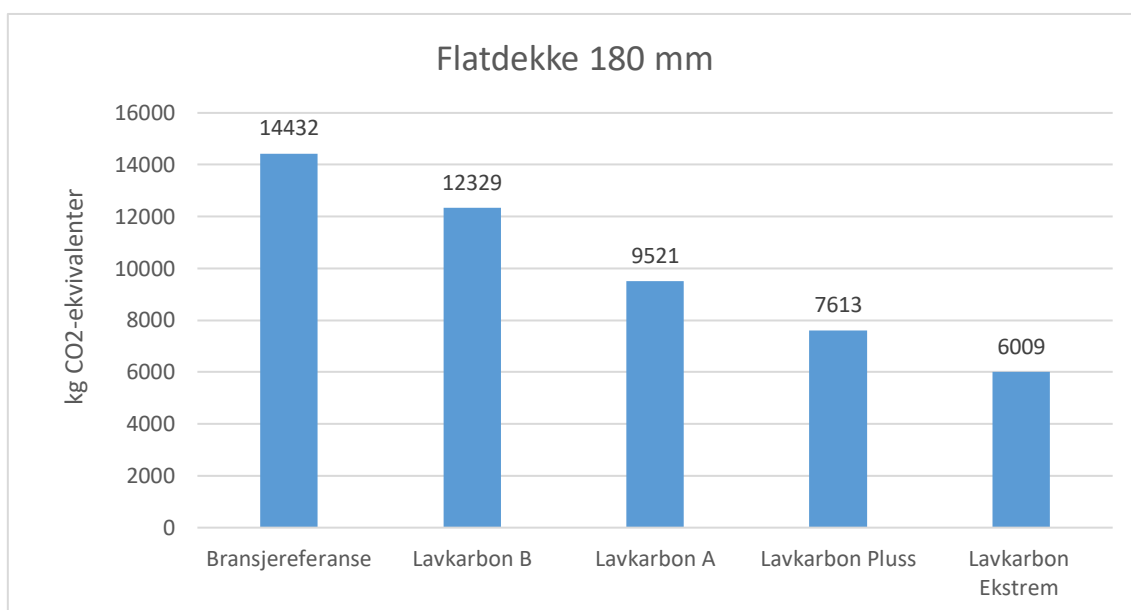
4.3 Flatdekke

I diagrammet under ser vi klimagassutslippet for de tre ulike flatdekkene beregnet for bransjereferanse og lavkarbonklasser. Akkurat som for toveisdekket, viser resultatene at det er en miljøgevinst ved valg av lavkarbonbetong.



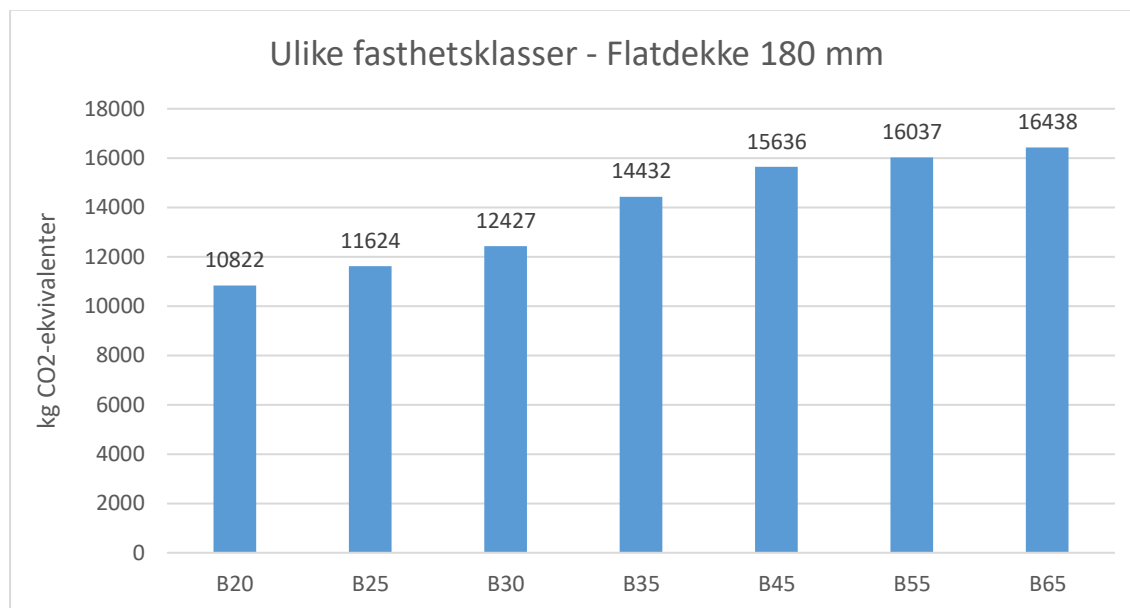
Figur 4.3: Utslippsverdier for alle flatdekkene

For FD180 er det også valgt å undersøke hvordan lavkarbon pluss og ekstrem påvirker det totale utslippet:



Figur 4.4: Utslippsverdier for FD180 med ulike betongtyper

Det er i tillegg valgt å regne ut utslippet til FD180 for ulike fasthetsklasser for å se hvilken påvirkning dette har for klimaregnskapet:



Figur 4.5: Utslippsverdier for FD180 for ulike fasthetsklasser

Utslippet er beregnet for bransjereferanse og av diagrammet kommer det fram at høyere fasthetsklasse gir økt klimagassutslipp.

For flatdekkene ble det også gjennomført nedbøyningsberegning:

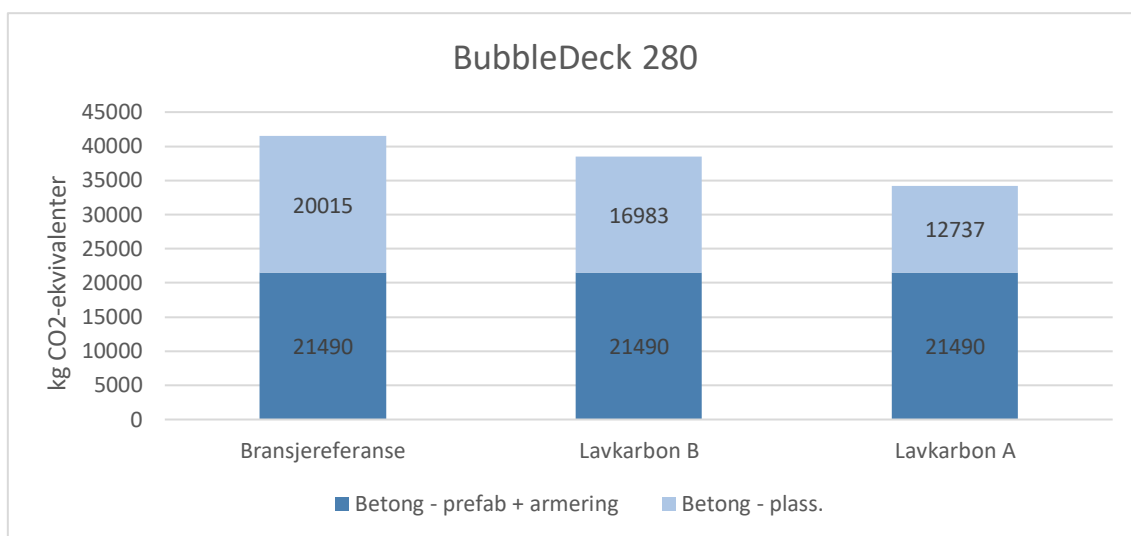
Tabell 4.5: Nedbøyningsresultat for flatdekkene

Dekketykkelse [mm]	Beregnet nedbøyning [mm]	Tillatt etter EC2: L/250 [mm]
280	23,02	28,80
200	14,73	20,00
180	18,54	20,00

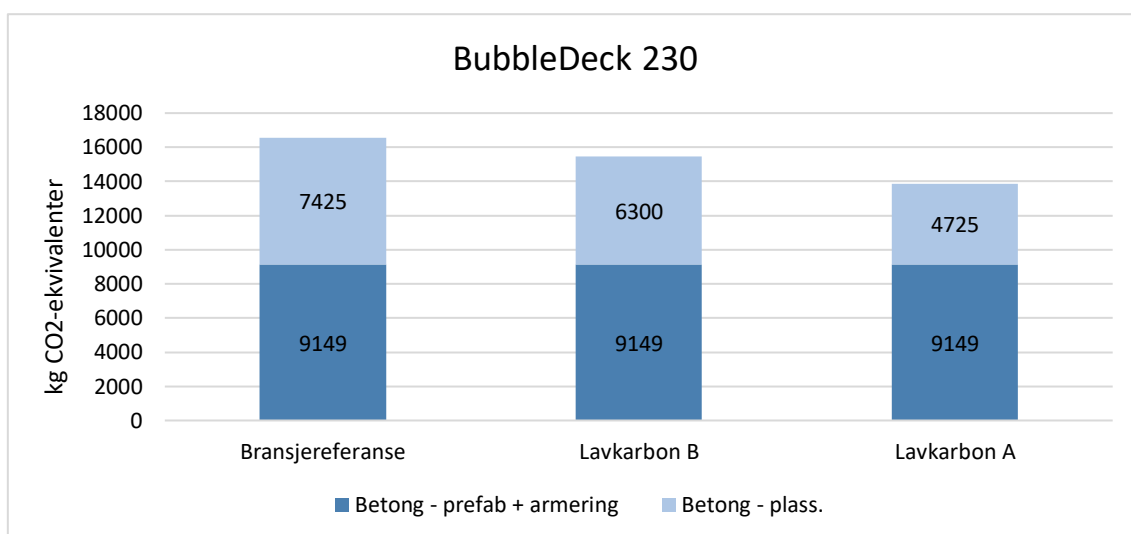
Resultatet viser at nedbøyningen for alle tre flatdekkene er innenfor kravet i EC2 7.4.1(4). Det presiseres igjen at dette er en forenklet beregning som skal representere virkeligheten godt nok, men at ved å ta hensyn til svinn og «tension stiffening» vil nedbøyningen kunne avvike noe fra det som er beregnet i denne oppgaven.

4.4 BubbleDeck

I det totale utslippet for BubbleDeck er det valgt å vise utslippet for den prefabrikkerte delen og den plaststøpte delen av dekket hver for seg. I denne oppgaven er det kun valgt å undersøke hvordan klimagassutslippet varierer for de ulike betongklassene for den plaststøpte delen av dekkene. Dette er gjort da den plaststøpte betongen utgjør den største andelen av det totale betongvolumet til BubbleDeck. I tillegg er det noe usikkerhet om nøyaktig hvilken verdi for utslipp som er gjeldende for betongen i EPDen til det prefabrikkerte elementet.



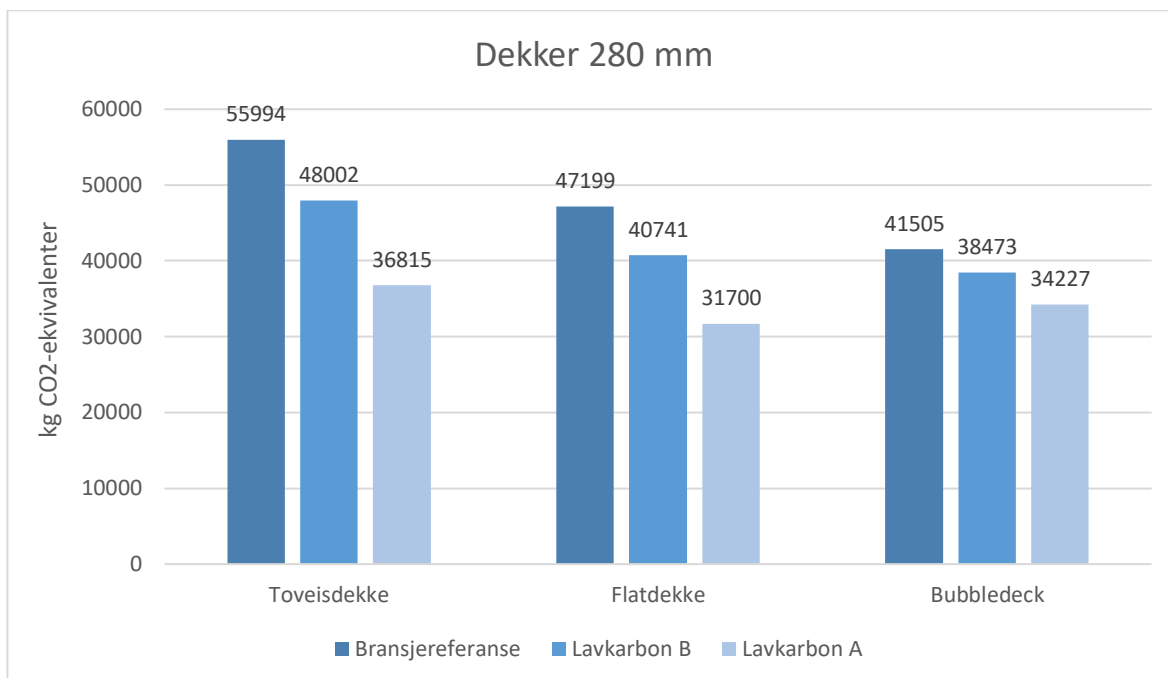
Figur 4.6: Utslippsverdier for BD280



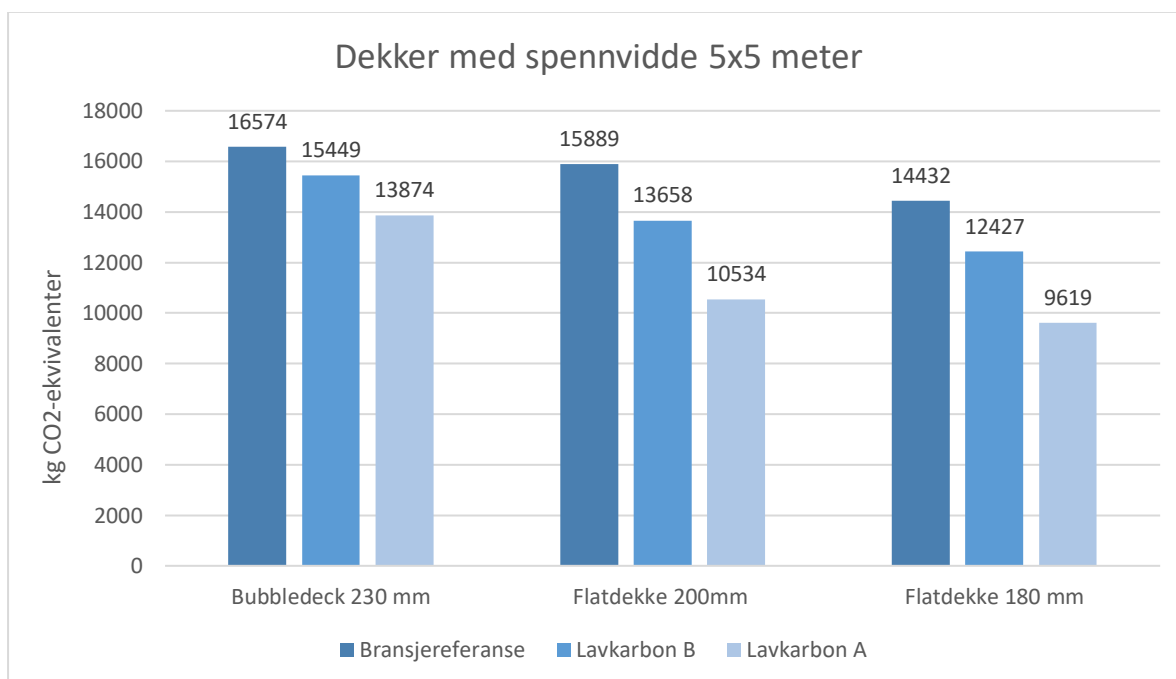
Figur 4.7: Utslippsverdier for BD230

4.5 Samlet resultat for alle dekkene

For å lettere kunne sammenligne resultatene for de ulike dekkene er det valgt å samle resultatene for de to casene som har blitt undersøkt:



Figur 4.8: Samlet resultat for case 1



Figur 4.9: Samlet resultat for case 2

Det er i tillegg beregnet hvor mange kg CO₂-ekvivalenter de ulike flatdekkene og BubbleDeck slipper ut pr. m² for å tydeligere se hvordan ulike spennvidder og dekketykkelse kan påvirke det totale utslippet:

Tabell 4.6: *Utslippsverdier pr. m² for flatdekker og BubbleDeck*

CO₂-ekv/m²	FD280	BD280	BD230	FD200	FD180
Bransjereferanse	101,16	88,96	73,66	70,62	64,14
Lavkarbon B	87,32	82,46	68,66	60,70	55,23
Lavkarbon A	67,94	73,6	61,66	48,82	42,75

5 Diskusjon

I dette kapitlet vil resultatene fra klimagassregnskapet bli diskutert. Resultatene vil bli diskutert i samme rekkefølge som de ble presentert i resultatkapitlet.

5.1 Materialforbruk

Case 1:

Resultatene for materialmengden presentert i tabell 4.1 viser en tydelig forskjell i betong- og armeringsmengde for de ulike dekkene. Toveisdekket sett sammen med bjelkene har det største betongvolumet. Toveisdekket alene skiller seg ikke stort fra FD280 i betongmengde, men ved å inkludere bjelkene blir det betydelig forskjell. Etter toveisdekket er det FD280 som har det største betongvolumet. BD280 har omtrent en tredjedel mindre volum sammenlignet med FD280 I tabell 4.4 vises det at plastboblene erstatter omtrent en tredjedel av det totale betongvolumet i dekket, som forklarer hvorfor BD280 har et mye lavere betongvolum sammenlignet med de to andre dekketyperne.

FD280 har større armeringsmengde enn både toveisdekket og BD280. Dette gir mening ettersom flatdekker må armeres kraftigere siden de skal bære all lasten alene uten hjelp fra underliggende bjelker. Som nevnt tidligere ville den reelle mengden med armering for BubbleDeck også vært noe høyere, siden gitterdragere, skjøtarmering og bøylearmering kommer i tillegg til armeringsmengden som er beregnet.

Case 2:

For dekkene med spennvidde 5x5 meter og ulik dekketykkelse viser resultatene fra tabell 4.3 at det er mindre forskjeller mellom både betong- og armeringsmengde. Til tross for størst dekketykkelse er det BD230 som har det laveste betongvolumet, siden omtrent en tredjedel av betongen erstattes av plastboblene i dette tilfellet også. BD230 krever derimot større armeringsmengde grunnet armeringsnett i både overkant og underkant, i tillegg til den ekstra armeringen som blir lagt senere. Resultatene viser også at FD180 trenger mer armering enn FD200 på grunn av den reduserte dekketykkelsen. For FD180 er det mulighet til å spare omtrent 11 tonn betong ved å redusere dekketykkelsen med 20 mm og vil ha en positiv effekt for klimaregnskapet til dekket. Betongvolumet til FD180 vil bli redusert med 9 % i forhold til betongvolumet for FD200.

5.2 Toveisdekke

Oversikten over mengde med betong og armering i tabell 4.1 viser at ikke er en stor forskjell i betongmengden til toveisdekket og FD280. I figur 4.1 ser vi derimot hvordan bjelkene utgjør 36 % av det totale betongvolumet i dekkekonstruksjonen. Det totale betongvolumet for bjelkene i dette tilfellet er omtrent 74,08 m³ og kunne vært spart ved å velge et flatdekke med tilsvarende tykkelse, som igjen ville ført til en reduksjon av CO₂ i klimaregnskapet til dekkekonstruksjonen. Ved valg av lavkarbonbetong ser vi at det totale klimagassutslippet reduseres sammenlignet med bransjereferansen.

For valg av dekketykkelse for både toveisdekket og flatdekke ble tykkelsen til BD280 brukt som utgangspunkt for å kunne sammenligne materialmengden til de tre dekkene. Det er dermed mulig at dekketykkelsen til toveisdekke kunne vært noe redusert for den gitte lastsituasjonen og momentene som ble beregnet, som igjen ville gitt et lavere utslipp. En slik optimalisering ble ikke tatt hensyn til i denne oppgaven siden det var ønske om å sammenligne tre dekker med mest mulig lik geometrisk utforming.

5.3 Flatdekke

Fra figur 4.3 som viser klimagassutslippet for flatdekkene kommer det tydelig frem at FD280 gir et lavere utslipp av CO₂ enn toveisdekke. Ved valg av lavkarbonbetong er det mulighet til å ytterligere redusere utslippet akkurat som for toveisdekke. For flatdekkene med spennvidde 5x5 meter vil en reduksjon av dekketykkelse fra 200 mm til 180 mm gi miljøgevinst uten at dette går utover dekkene i bruksgrensetilstand. Det nevnes igjen at kontroll av nedbøyning er gjort ved en forenklet beregningsmetode, og at det derfor bør utføres en kontroll der man også tar hensyn til svinn og «tension stiffening» dersom det er tenkt at dekkene skal være dimensjonerende. Det kreves derimot mer armering for mindre dekketykkelse, men dette vil ha en liten påvirkning på det samlede utslippet sammenlignet med betongen som bidrar mest til CO₂-utslippet.

For FD180 er det også undersøkt hvordan de mer ekstreme lavkarbonklassene påvirker utslippet. Resultatene fra figur 4.4 viser at med lavkarbon pluss kan det totale utslippet reduseres med ca. 50% sammenlignet med bransjereferansen, som gir det høyeste utslippet. Det laveste utslippet kommer fra lavkarbon ekstrem.

Valg av fasthetsklasse vil også ha en påvirkning på det totale utslippet. Figur 4.5 viser at høyere fasthetsklasser gir høyere utslipp for det valgte flatdekket og at den største forskjellen i utslipp vil være mellom fasthetsklasse B30 til B35.

5.4 BubbleDeck

Av resultater for BubbleDeck i figur 4.6 og 4.7 fremkommer det at valg av lavkarbonbetong for den plaststøpte delen av dekke følger samme mønster som for de andre dekkene, og gir en reduksjon i det totale utslippet. For begge dekkene vises det at den største andelen av utslippet skyldes det prefabrikkerte elementet, som er en bunnplate med ferdigmontert armering som omslutter plastboblene. Som beskrevet tidligere er utslippene for disse elementene basert på gamle EPDer med høyere utslippsverdier for betong. Med nye EPDer som bruker oppdaterte utslippstall for betong vil det derfor mest sannsynlig være lavere utslippsverdier for den prefabrikkerte delen. En optimalisering av dette elementet ved å benytte seg av lavkarbonbetong vil også ha potensialet til å ytterligere redusere det totale utslippet. Det ville derfor vært interessant å undersøke hvor stor miljøgevinsten ville vært ved å gjøre dette. En optimalisering av den prefabrikkerte delen vil kunne ha den fordelen at en har mer kontroll over produksjonen som foregår inne på fabrikk, siden vær og temperatur ikke vil være en potensiell utfordring som ved støping ute på byggeplass. Samtidig kan endring i betongens egenskaper, som for eksempel fasthetsutvikling, være en utfordring for produksjonssyklusen til prefabrikkerte elementer (Norsk Betongforening, 2020) .

5.5 Samlet resultat for alle dekkene

5.5.1 Case 1

For dekkene med tykkelse 280 mm er det som forventet flatdekke og BubbleDeck som gir det laveste utslippet. Ved å velge disse dekkene framfor toveisdekket med bjelker er det mulighet for å spare store mengder betong. For bransjereferanse og lavkarbon B er det BD280 som gir det laveste utslippet, mens for lavkarbon A er det FD280 som kommer best ut. For denne lavkarbonklassen gir FD280 et lavere utslipp tilsvarende omtrent 2500 kg CO₂-ekvivalenter sammenlignet med BD280. Forskjellen mellom lavkarbon A og B er 70 kg CO₂-ekvivalenter/m³, som er 20 kg CO₂-ekvivalenter/m³ større forskjell mellom bransjereferanse og lavkarbon B. For FD280, som har en større andel plaststøpt betong, vil det å benytte seg av

lavkarbon A gi et større positivt utslag enn for BubbleDeck. Som nevnt ovenfor så er det kun gjort en optimalisering av den plasstøpte delen av BubbleDeck og det antas at verdier for utslippet til det prefabrikkerte betongelementet tilsvarer verdier for den gamle bransjereferansen. Det er derfor fullt mulig at BubbleDeck hadde gitt enda lavere utslipp dersom en ny og oppdatert EPD hadde blitt benyttet, og enda ytterligere reduksjon i utslippet dersom lavkarbon B eller A hadde blitt benyttet for det prefabrikkerte elementet.

5.5.2 Case 2

Resultatene for case 2 viser at det er flatdekkene som har det laveste utslippet for alle betongklassene, til tross for at BD230 har et litt lavere betongvolum enn begge flatdekkene. For BubbleDeck må det tas hensyn til at produksjon av plastboblene og ekstra armering utgjør en andel av utslippet. I dette tilfellet der BD230 har ca. 15 % mindre betong enn FD180 og ikke 34 % som i case 2, vil ikke det reduserte utslippet fra det lavere betongvolumet gjøre opp for utslippet fra plastboblene og ekstra armering.

For flatdekkene vil en reduksjon i dekketykkelse fra 200 mm til 180 mm gi mulighet for å spare omtrent 11 tonn med betong. Dette tilsvarer et utslipp på ca. 1500 kg CO₂-ekvivalenter for bransjereferanse. Resultatene for dette tilfellet viser at det ikke alltid vil være tilstrekkelig å se på betongvolumet til dekkene alene for å avgjøre hvilken som er mest miljøvennlig, men at det er viktig å ta hensyn til utslippet fra alle de ulike komponentene i dekkene.

5.5.3 Spennvidde og ulike dekketykkelser

Av resultatene for kg CO₂-ekv/m² i tabell 4.6 for både flatdekke og BubbleDeck fremkommer det at utslippet pr. m² for begge dekketyperne blir redusert ved mindre spennvidder. Dette stemmer godt overens med at dekketykkelsen til begge dekkene blir lavere ved mindre spennvidder, som betyr at mengden betong også blir redusert. Den største reduksjonen i utslipp pr. m² vil være for flatdekkene. Ved å gå fra FD280 med spennvidde 7,2 meter til FD180 med spennvidde 5 meter, er det potensial for å spare ca. 37 kg CO₂-ekv/m² på sitt meste. Der det ikke går utover fleksibiliteten til konstruksjonen ved å sette inn ekstra søyler, kan det derfor være mer miljøvennlig å gå for mindre spennvidder og mindre dekketykkelser, framfor lengre spennvidder og tykkere dekker. Ved å velge lavkarbon A framfor normal betong vil man kunne spare omtrent 33,22 kg CO₂-ekv/m² for FD280. Disse resultatene viser

at det kan være en større gevinst i å redusere spennvidden framfor det å velge lavkarbonbetong.

For dekkene i case 1 er det BD280 som kommer best ut med utslipp pr. m² for både bransjereferanse og lavkarbon B. Fordelen med valg av BubbleDeck for tilfellet med spennvidde på 7,2 m og lengre spennvidder vil være at resten av elementene i konstruksjonen, som for eksempel søyler og bjelker, kan dimensjoneres mindre grunnet den lave egenvekten til dekket sammenlignet med et tilsvarende flatdekke. I tillegg vil fundamentlastene ved valg av BubbleDeck reduseres. Dette vil resultere i et lavere miljøavtrykk for hele konstruksjonen. For spennvidde 5 meter vil ikke forskjellen i egenvekt mellom BD230 og flatdekkene være like stor. I dette tilfellet vil de andre konstruksjonselementene derfor kunne ha omtrent samme dimensjoner uansett valg av dekketype.

Av resultatene for case 2 ser man at utslippet pr. m² ikke skiller seg mye fra hverandre. For samme betongklasser har FD180 lavest utslipp pr. m², etterfulgt av FD200 og BD230 til slutt. Disse resultatene viser at for den valgte spennvidden på 5 meter kan flatdekker gi lavere utslipp pr. m² enn BD230 dersom man sammenligner samme betongklasser på grunn av muligheten til å variere dekketykkelsen, selv om betongvolumet til flatdekkene fortsatt er litt høyere enn BubbleDeck. For BubbleDeck derimot er det ikke mulig med mindre dekketykkelser enn 230 mm. Det er også fullt mulig at dekketykkelsen til flatdekker med små spennvidder som i dette tilfellet kan bli ytterligere redusert uten at det går utover krav for nedbøying, samt brann- og lydkrav, som igjen vil ha en positiv effekt på utslippet. Ved større spennvidder enn 5 meter vil kravet til dekketykkelse for flatdekke øke, som betyr at betongmengden også øker. I tabellen for utslipp pr. m² ser man at forskjellen mellom FD200 og BD230 er liten, spesielt for bransjereferanse og lavkarbon B. Dette betyr at større dekketykkelse vil bety større utslipp for flatdekkene, og at det derfor mest sannsynlig vil være mer miljøvennlig å velge BubbleDeck for spennvidder større enn 5 meter.

5.5.4 Lavkarbonbetong

Fra resultatene diskutert ovenfor kommer det fram at valg av lavkarbonbetong kan i noen tilfeller være en avgjørende faktor for det totale utslippet. Det kan derimot være noen utfordringer ved bruk av lavkarbonbetong. I teorien er det for eksempel størst gevinst ved å benytte seg av lavkarbon pluss og ekstrem, men dette er ikke nødvendigvis gjennomførbart i

praksis grunnet begrensninger på tilgjengeligheten for disse to lavkarbonklassene. Kostnad er også en viktig faktor å ta hensyn til ved valg av strengere lavkarbonklasser. Ikke minst kan betongens egenskaper som støpelighet og fasthetsutvikling endres ved bruk av de ulike reseptene for lavkarbonbetong (Norsk Betongforening, 2020), som igjen vil kunne påvirket tidsrammen til et prosjekt. For eksempel vil miljøgevinsten være større for lavkarbon A enn lavkarbon B, men fasthetsutviklingen vil være mer langsom. Om vinteren kan dette være en utfordring når det skal støpes ute, og for eksempel for produksjon av BubbleDeck-elementer kan dette påvirke effektiviteten og produksjonstiden i fabrikk. Kostnadene vil også være høyere for de fleste lavkarbonklassene. Det er altså potensial til å redusere utslipp ved bruk av lavkarbonbetong, men det har også sine utfordringer.

5.5.5 Fasthetsklasser

Fra resultatene for flatdekke med ulike fasthetsklasser viste det seg at økende fasthetsklasse gir større utslipp. For det valgte eksempelet ville det vært mulig å redusere utslippet med omtrent 14 % ved å velge fasthetsklasse B30 framfor B35. Valg av fasthetsklasse avhenger av type konstruksjon og hvilke belastninger konstruksjonen utsettes for. For klimagassutslippet vil det derfor være gunstig å ikke velge høyere fasthetsklasse enn nødvendig. I NB37 nevnes det også hvordan det å velge riktig fasthetsklasse kan ha nesten like stor effekt som det å velge lavkarbonbetong med et eksempel: I tabell 2.2 som viser utslippet til de forskjellige betongklassene er kravet til klimagassutslipp for B35-betong i lavkarbonklasse A det samme som kravet til B25-betong i lavkarbon B. Altså vil man kunne oppnå samme utslipp med lavkarbon B, som ofte bare krever ordinære, resepttekniske tiltak dersom det er mulighet for å velge en lavere fasthetsklasse.

5.5.6 Andre faktorer

Disse anbefalingene er basert kun på det beregnede utslippet og i virkeligheten vil det selvfølgelig være flere faktorer enn bare miljø og klimagassutslipp som påvirker valg av dekketyper. Prosjektets tidsramme, type prosjekt, når på året det støpes, og kostnad er eksempler på noen slike faktorer. Siden BubbleDeck er delvis prefabrikkert, vil det for eksempel kunne være en fordel å bruke det framfor de to andre plasstøpte alternativene dersom tidsrammen til et prosjekt er stramt. Andre ganger kan det være fordel å gå for

plasstøpte alternativer grunnet større fleksibilitet og mulighet til å gjøre endringer underveis og i etterkant av prosjektet.

5.6 Feilkilder

5.6.1 BubbleDeck

Ettersom dimensjoneringen av BubbleDeck er gjort for hånd etter flatdekkemodellen, og ikke i et FEM -program slik det vanligvis gjøres vil det være noe avvik i beregnet armeringsmengde. Siden dette er et modellbygg, er armeringen beregnet etter teoretiske prinsipper og ikke erfaring. Dette resulterer i at den totale armeringsmengden er noe lavere enn det den ville vært dersom gitterdragere, skjøtarmering og annen tilleggsarmering var inkludert. Ved bruk av EPDer for den prefabrikkerte delen antas det at beregnede mengden armering samt noe mer er inkludert i verdien for GWP, og at sluttresultatet derfor representerer virkeligheten godt nok. I tillegg har utslipp fra armering ikke like stor betydning som betongvolumet, som er det som er mest interessant å undersøke i denne oppgaven.

For BD230 er også utslippsverdien regnet ut ved å justere på utslippsverdien til BD280 basert på noen antagelser. Det kan derfor være at den GWP-verdien til BD230 ville vært noe annerledes dersom det fantes en egen EPD for den. Utslippsverdien til BD280 ville også mest sannsynlig vært noe lavere dersom en ny og oppdatert EPD hadde blitt benyttet.

6 Konklusjon

I denne oppgaven ble tre ulike betongdekker vurdert og av resultatene kom det tydelig fram at riktig valg av dekke utgjør en merkbar forskjell i klimagassutslippet til en konstruksjon. Det har vist seg at det er stor miljøgevinst ved å velge dekker som ikke trenger støtte fra underliggende bjelker. Ved å velge FD280 framfor toveisdekket, viste resultatene at det er mulig å spare omtrent 74,08 m³ med betong, som tilsvarer 15,7 % reduksjon i klimagassutslippet. Ved å velge BD280 istedenfor toveisdekket er det mulig å redusere utslippet med omtrent 26 %. BubbleDeck skilte seg spesielt ut i case 1 og ved å velge et slik dekke framfor et tilsvarende flatdekke er det mulighet til å spare omtrent 35 % av betongvolumet og redusere klimagassutslippet med ca. 12 %. Fordelen med BubbleDeck vil også være at de resterende konstruksjonselementene vil kunne dimensjoneres mindre grunnet den lave egenvekten til dekket, noe som vil være positivt for hele konstruksjonens klimaregnskap. For den minste spennvidden på 5 meter hadde FD180 lavest utslipp, og resultatene viser at det er mulighet til å spare opptil 9,52 kg CO₂-ekvivalenter/m² ved å velge FD180 framfor BD230 i dette tilfellet. Disse resultatene viser at flatdekker kan også være et godt alternativ dersom man har små spennvidder.

Ulike parametere som spennvidde, dekketykkelse, lavkarbonbetong og fasthetsklasse ble også vurdert i denne oppgaven. Felles for både flatdekke og BubbleDeck var at utslippet pr. m² ble redusert for mindre spennvidder og dekketykkelser. Ved å gå fra spennvidde 7,2 meter til 5 meter var det potensialet for å spare opptil 37 kg CO₂-ekvivalenter/m². For flatdekke resulterte en reduksjon av dekketykkelse med 20 mm i omtrent 11 tonn betong spart, som tilsvarer omtrent 9 % reduksjon i klimagassutslipp. Dette indikerer at det kan være hensiktsmessig å velge små spennvidder som gir mindre tverrsnittshøyder framfor lange spenn og tykkere dekker. Resultatene viser også at bruk av lavkarbonbetong gir reduksjon i klimagassutslippet og vil være fordelaktig uansett type dekke. Ved å velge for eksempel lavkarbon Pluss, som er den nest mest strenge lavkarbonklassen, kan utslippet reduseres med ca. 50 % sammenlignet med bransjereferansen. Lavkarbonbetong har derimot noen begrensinger og kan derfor anses som et ytterligere tiltak for å redusere klimagassutslippet til dekkene, i tillegg til å fokusere på optimalisering av betongvolumet. Ved å ikke velge høyere fasthetsklasse enn nødvendig vil man også kunne bidra til å redusere utslippet av klimagasser, ettersom resultatene viser at høyere fasthetsklasser gir økende utslipp. Resultatene for FD180 viser at ved å velge fasthetsklasse B30 framfor B35 er det potensial til å redusere klimagassutslippet med ca. 14 %.

Denne masteroppgaven har vist at konstruktive valg av dekker vil kunne ha en påvirkning på utslippet av klimagasser. Fra resultater fremkommer det at det er potensial for å redusere utslipp fra betongkonstruksjoner ved å fokusere på å optimalisere betongvolumet til dekker og prosjektere små spennvidder framfor store spenn, som gir mulighet til mindre dekketykkelser.

6.1 Videre arbeid

Basert på resultatene fra denne masteroppgaven ville det videre vært interessant å undersøke:

- Hvor mye potensial det er for å ytterligere redusere utslippene ved dimensjonering av de resterende bæreelementene i en konstruksjon der BubbleDeck er valgt som dekkeløsning.
- Inkludere flere faser i LCA-analysen for å få mer nøyaktige resultater for klimagassutslippet til en konstruksjon.
- Hvilke dekker som egner seg best med tanke på klimagassutslipp til bygg som er påkjent av større laster og krever større spennvidder og dekketykkelser.

Referanser

- Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 11 (4): 1675-1710. doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
- Asplan Viak. (2019). *Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp*. Tilgjengelig fra: https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/rapporter/klimautslipp_bae_2019.pdf (lest 04.04.23).
- Beton-kalender 1984*. (1984). Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Bjørnstad, L. (2016). *Kan vi bruke betong med god klimasamvittighet?* . Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/bygningsmaterialer-klima/kan-vi-bruke-betong-med-god-klimasamvittighet/379248> (lest 01.03.23).
- Bubbledeck Consulting. (u.å.-a). *Fordeler med Bubbledeck*. Tilgjengelig fra: <https://bubbledeck.no/#> (lest 14.03.23).
- BubbleDeck Consulting. (u.å.-b). *Lette konstruksjoner og større frihet med Bubbledeck*. Tilgjengelig fra: <https://bubbledeck.no/teknologi> (lest 13.02.23).
- BubbleDeck Consulting. (u.å.-c). *Tekniske data*. Tilgjengelig fra: <https://bubbledeck.no/dimensjonering> (lest 14.03.23).
- BubbleDeck Consulting. (u.å.-d). *Tekniske data - utvidet pdf*. Tilgjengelig fra: <https://static1.squarespace.com/static/5817b39d2e69cfd82f68c7a6/t/5e2da9dc601a48502201ea17/1580050909061/Element+Typer+BD.pdf> (lest 14.02.23).
- Bubbledeck Norway AS. (2023). *BubbleDeck: Veileder*. Upublisert manuskript.
- Dr.tech.OlavOlsen a.s & JJJ Consult. (2009). *BUBBLEDECK: Beregning, dimensjonering og utførelse av biaksiale hulldekkeelementer. Veileder for Rådgivende ingeniører*. Tilgjengelig fra: <https://static1.squarespace.com/static/5817b39d2e69cfd82f68c7a6/t/58237a94d1758e248a19ca4f/1478720160835/dimensjoneringsgrunnlag.pdf>.
- Ellingsen, L. A.-W. (2023). *Livsløpsvurdering LCA – Kjøretøy og drivstoff*. Tilgjengelig fra: <https://www.tiltak.no/0-overordnede-virkemidler/0-4-kunnskap-og-verktoey-som-hjelpemidler/livslopsvurdering-lca-kjoretøy-og-drivstoff/> (lest 12.04.23).
- EPD Norge. (u.å.-a). *Bruksanvisninger i hvordan tolke EPD'er*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/bruksanvisninger-i-hvordan-tolke-epd-er/> (lest 22.04.23).
- EPD Norge. (u.å.-b). *Hva er en EPD?* Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (lest 18.03.23).
- Keilman, T. (2020). *Bygger bedre kunnskap for en mer bærekraftig byggebransje*. <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om->

- [finansiering/naringsliv/prosjekter-naringslivet/bygger-bedre-kunnskap-for-en-mer-barekraftig-byggebransje/](#) (lest 04.04.23).
- Kolbeinsen, L. (2019). sintring. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sintring> (lest 22.02.23).
- Larsen, P. K. & Aune, P. (2004). *Konstruksjonsteknikk : laster og bæresystemer*. Trondheim: Tapir akademisk forl.
- LCA.no AS. (u.å.). *Hva er LCA?* Tilgjengelig fra: <https://lca.no/hva-er-lca/> (lest 15.03.23).
- Miljødirektoratet. (2019). *Tabell for omregning til CO2-ekvivalenter*. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabell-for-omregning-av-co2-ekvivalenter/> (lest 16.03.23).
- Miljødirektoratet. (2022). *Norske utslipp og opptak av klimagasser*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/> (lest 15.03.23).
- Maage, M. (red.). (2015). *Betong : regelverk, teknologi og utførelse*. Oslo: Byggenæringens forl.
- Norsk Betongforening. (2004). *NB33 Flatdekker, Beregning og konstruktiv utforming*.
- Norsk Betongforening. (2020). *NB37 Lavkarbonbetong*.
- Norsk Standard. (2002a). *NS-EN 1990:2002+NA:2008 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*.
- Norsk Standard. (2002b). *NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2008 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-1: Allmenne laster. Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger*.
- Norsk Standard. (2004). *NS-EN 1992-1-1:2004+NA2008 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*.
- SINTEF. (2018). *SiteCast*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/prosjekter/2018/sitecast/> (lest 14.04.23).
- SINTEF. (2020). *Betong er en del av klimaløsningen*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/> (lest 05.03.23).
- SINTEF Byggforsk. (2016). *572.204: Sement. Typer, egenskaper og bruksområder*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/589/sement_typer_egenskaper_og_bruksomraad (lest 15.02.23).
- Smeplass, S. (2015). NB37 Lavkarbonbetong. *Mur+betong* (2): 38. Tilgjengelig fra: <https://murbetong.no/wp-content/uploads/2016/03/1502-lavkarbonbetong.pdf>.
- SNL. (2019). slakkarmering. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/slakkarmering> (lest 03.03.23).
- Standard Norge. (2006). *NS-EN ISO 14040:2006, Miljøstyring, Livsløpvurdering Prinsipper og rammeverk*. Tilgjengelig fra:

<https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=236802>.

Sørensen, S. I. (2017). *Betongkonstruksjoner : beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. 2. utg. Bergen: Fagbokforl.

The Low Carbon Concrete Group. (2022). *Low Carbon Concrete Routemap, Setting the agenda for a path to net zero*: ICE Institution of Civil Engineers. Tilgjengelig fra: <https://www.ice.org.uk/media/q12jkljj/low-carbon-concrete-routemap.pdf> (lest 02.05.23).

Thue, J. V. (2022). Armert betong. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/armert_betong (lest 03.03.23).

Varshney, H., Jauhari, N. & Bhatt, H. A Review Study on Bubble Deck Slab. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5: 2136-2139. doi: 10.22214/ijraset.2017.10314.

Årtun, T., Nesse, N. & Eide, I. B. (2023). Sement. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sement> (lest 15.02.23).

Vedlegg

Vedlegg A: Dimensjonering av toveisdekke

- A1: Dimensjonering av toveisdekke
- A2: Dimensjonering av T-bjelke

Vedlegg B: Dimensjonering av flatdekke

- B1: Dimensjonering av flatdekke
- B2: Skjærkraftkapasitet
- B3: Nedbøyningsberegning

Vedlegg C: Dimensjonering av BubbleDeck

- C1: Dimensjonering av BubbleDeck
- C2: Skjærkraftkapasitet

Vedlegg A: Dimensjonering av toveisdekke

Vedlegg A.1 - Dimensjonering av toveisdekke

Materialdata:

Betong B35:

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

Betongens karakteristiske trykkfasthet - Tab. 3.1

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Dimensjonerende trykkfaktor betong -
NA.3.1.6(1)P

$$\gamma_c := 1.5$$

Materialfaktor betong - Tab. 2.1N

$$f_{cd} := \frac{(\alpha_{cc} \cdot f_{ck})}{\gamma_c} = 19.8 \text{ MPa}$$

Trykkfasthet betong - EC2 3.1.6

$$f_{ctm} := 3.2 \text{ MPa}$$

Middelverdi av sentrisk trykkfasthet etter 28 døgn -
Tab. 3.1

$$\alpha := 0.412$$

Trykksonehøyde for normalarmert tverrsnitt -
Tab. 4.2, Sørensen

Armering B500C:

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

Karakteristisk flytegrense armering

$$\gamma_s := 1.15$$

Materialfaktor armeringsstål - Tab 2.1N

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ MPa}$$

Dimensjonerende flytegrense armering

Nominell overdekning - EC2, 4.4.1:

$$C_{min} := 12 \text{ mm}$$

Minste overdekning

$$\Delta C_{dev} := 10 \text{ mm}$$

Tillatt avvik

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} = 22 \text{ mm}$$

Nominell overdekning

Dekkedimensjoner:

$$L_x := 7.2 \text{ m}$$

Bredde på dekke

$$L_y := 7.2 \text{ m}$$

Lengde på dekke

$$\frac{L_y}{L_x} = 1$$

<2, dvs. vi har et toveisdekke

$$t := 280 \text{ mm}$$

Valgt dekketykkelse

$$\emptyset := 12 \text{ mm}$$

Valgt armeringsdiameter

$$b := 1000 \text{ mm}$$

Bredde for beregning pr meter

$$d_x := t - C_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 252 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i x-retning

$$d_y := d_x - \emptyset = 240 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i y-retning

Lastberegning:

Laster på dekke:

$$g_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Egenlast normalbetong

$$g := g_c \cdot t = 7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Egenveket dekke

$$\gamma_g := 1.2$$

Lastfaktor egenlast

$$p := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Nyttelast kontor

$$\gamma_p := 1.5$$

Lastfaktor nyttelast

$$q_{Ed} := 1.2 \cdot g + 1.5 \cdot p = 12.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Dimensjonerende lastkombinasjon etter ligning 6.10b

Dimensjonering av toveisdekke gjøres med elastisitetsteori og momentkoeffisienter fra Beton-kalender 1984, og følger eksempel 2.1.1 (Dimensjonering av toveisplate) i Sørensen:

Momentkapasitet:

Beregning av trykksoneens momentkapasitet i begge retninger gjøres med likning 4.23 fra Sørensen. :

$$M_{Rdx} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_x^2 = 346.4 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i x-retning}$$

$$M_{Rdy} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_y^2 = 314.2 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i y-retning}$$

Dimensjonerende momenter:

For beregning av moment vil formel for moment og momentkoeffisienter fra Betonkalender 1984 brukes:

$$m_i := \frac{1}{k} \cdot q_{Ed} \cdot l^2$$

Dimensjonerende moment der,

k - momentkoeffisient hentet fra Beton-kalender 1984

qEd - dimensjonerende last på platefeltet

l - spennvidden i x- eller y-retning

For en plate med 4 sider fast innspente har vi følgende momentkoeffisienter fra tabell 5.4:

$$k_x := 39.1 \quad \text{Momentkoeffisient i x-retning i felt}$$

$$k_y := 39.1 \quad \text{Momentkoeffisient i y-retning i felt}$$

$$k_{xe} := 16.3 \quad \text{Momentkoeffisient i x-retning over støtte}$$

$$k_{ye} := 16.3 \quad \text{Momentkoeffisient i y-retning over støtte}$$

Dimensjonerende momenter:

$$m_{Edx} := \frac{1}{k_x} \cdot q_{Ed} \cdot L_x^2 = 17.103 \frac{1}{m} \cdot m \cdot kN$$

I felt, x-retning

$$m_{Edy} := \frac{1}{k_y} \cdot q_{Ed} \cdot L_y^2 = 17.103 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

I felt, y-retning

$$m_{Edxe} := \frac{1}{k_{xe}} \cdot q_{Ed} \cdot L_y^2 = 41.027 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Over støtte, x-retning

$$m_{Edye} := \frac{1}{k_{ye}} \cdot q_{Ed} \cdot L_y^2 = 41.027 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Over støtte, y-retning

Beregning av minimumsarmering:

Bestemmes med følgende uttrykk gitt i EC2 NA 9.2.1(1):

$$A_{sx.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 419 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

i x-retning

$$A_{sy.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 399 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

i y-retning

Sjekke at minimumsarmering også er større enn:

$$A_{x.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 327.6 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sx.min} > A_{x.min} \quad \text{OK!}$$

$$A_{y.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 312 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sy.min} > A_{y.min} \quad \text{OK!}$$

Beregning av nødvendig armering:

Den største tillatte verdien for z er 0.95d (Sørensen).

$$z_x := 0.95 \cdot d_x$$

$$z_y := 0.95 \cdot d_y$$

Den indre momentarmen z kan tilnærmes:

$$z_x := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{Edx}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) dx$$

Likning 4.28 (Sørensen)

$$z_x = 0.99dx > 0.95dx$$

Ikke OK! Bruker maks z-verdi

Beregning av nødvendig armering:

$$A_{sx1} := \frac{m_{Edx}}{f_{yd} \cdot z_x} = 164 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx} := \max(A_{sx1}, A_{sx.min}) = 419 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsmengde som blir benyttet i underkant i x-retning

$$z_y := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{Edy}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) dy$$

$$z_y = 0.99dy > 0.95dy$$

Ikke OK! Bruker maks z-verdi

Beregning av nødvendig armering:

$$A_{sy1} := \frac{m_{Edy}}{f_{yd} \cdot z_y} = 173 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sy} := \max(A_{sy1}, A_{sy.min}) = 399 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsmengde som blir benyttet i underkant i y-retning

$$z_{xe} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{Edxe}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) dx$$

$$z_{xe} = 0.98 \quad dx > 0.95dx$$

Ikke OK! Bruker maks z-verdi

Beregning av nødvendig armering:

$$A_{sxe1} := \frac{m_{Edxe}}{f_{yd} \cdot z_x} = 394 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sxe} := \max(A_{sxe1}, A_{sx.min}) = 419 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsmengde som blir benyttet i overkant i x-retning

$$z_{ye} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{Edye}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) dy$$

$$z_{ye} = 0.98 \quad dy > 0.95dy$$

Ikke OK! Bruker maks z-verdi

Beregning av nødvendig armering:

$$A_{sye1} := \frac{m_{Edye}}{f_{yd} \cdot z_y} = 414 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sye} := \max(A_{sye1}, A_{sy.min}) = 414 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsmengde som blir benyttet i overkant i y-retning

Valg av antall armeringsstenger:

$$A := \pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2 = 113 \text{ mm}^2$$

Tverrsnittsareal for $\emptyset 12$

I x-retning UK:

$$n_{x1} := \frac{A_{sx}}{A} = 3.71 \frac{1}{m}$$

Trenger 3,71 stenger pr meter bredde

Senteravstand mellom stengene:

$$s_x := \frac{1000}{3.71} = 270 \text{ mm}$$

Velger 265 mm

Maksimal senteravstand etter EC2 NA 9.3.1.1(3):

$$s_{max.slabs} := \min(3 \cdot t, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm} \text{ OK!}$$

Valgt armering blir dermed: $\emptyset 12s265$ som gir $A_s = 426 \text{ mm}^2/m$

I y-retning UK:

$$n_{y1} := \frac{A_{sy}}{A} = 3.53 \frac{1}{m}$$

Trenger 3.53 stenger pr meter bredde

Senteravstand mellom stengene:

$$s_y := \frac{1000}{3.53} = 283 \text{ mm}$$

Velger senteravstand 280mm

Maksimal senteravstand etter EC2 NA 9.3.1.1(3):

$$s_{max.slabs.2} := \min(3 \cdot t, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm} \text{ OK!}$$

Valgt armering blir dermed: $\emptyset 12s280$ som gir $A_s = 404 \text{ mm}^2/m$

I x-retning OK:

$$n_{x2} := \frac{A_{sxe}}{A} = 3.71 \frac{1}{m}$$

Trenger 3,71 stenger pr meter bredde

Senteravstand mellom stengene:

$$s1 := \frac{1000}{3.71} = 270 \text{ mm}$$

Velger 265 mm

Maksimal senteravstand etter EC2 NA 9.3.1.1(3):

$$s_{max.slabs.3} := \min(3 \cdot t, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm OK!}$$

Valgt armering blir dermed: Ø12s265 som gir $A_s = 426 \text{ mm}^2/\text{m}$

I y-retning OK:

$$n_y := \frac{A_{sye}}{A} = 3.66 \frac{1}{m}$$

Trenger 3.66 stenger pr meter bredde

Senteravstand mellom stengene:

$$s2 := \frac{1000}{3.66} = 273 \text{ mm}$$

Velger senteravstand 270mm

Maksimal senteravstand etter EC2 NA 9.3.1.1(3):

$$s_{max.slabs.4} := \min(3 \cdot t, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm OK!}$$

Valgt armering blir dermed: Ø12s270 som gir $A_s = 419 \text{ mm}^2/\text{m}$

Kontroll av skjærkapasitet :

Gjøres etter regler gitt i EC2, 6.2 og det kontrolleres for både strekkbrudd og trykkbrudd.

Dimensjonerende skjærkrefter:

Beregning av dimensjonerende skjærkrefter gjøres ved hjelp av en faktor θ basert på spennviddeforholdet til platen, hentet fra Beton-kalender.

$$\frac{L_y}{L_x} = 1 \quad \text{Spennviddeforholdet er 1}$$

$$\theta_x := 2.65 \quad \text{Faktor for skjærkraft i x-retning}$$

$$\theta_y := 2.65 \quad \text{Faktor for skjærkraft i y-retning}$$

$$\theta := \theta_x = 2.65 \quad \text{Lik for begge retninger i dette eksempelet}$$

Dimensjonerende skjærkraft regnes ut med følgende formel oppgitt i Betonkalender:

Regner først for x-retning:

$$V_{Ed} := \frac{q_{Ed} \cdot L_x}{\theta} = 35.049 \frac{kN}{m} \quad \text{Dimensjonerende skjærkraft}$$

Kontroll skjærstrekkapasitet:

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_x}} = 1.89 \quad \text{OK!} < 2.0$$

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

$$\rho_l := \frac{426 \text{ mm}}{1000 \cdot d_x} = 0.002 \quad \text{OK!} < 0.02$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^2 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{\text{mm}^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.538$$

$$V_{rd,c,min} := v_{min} \cdot \frac{b}{\text{mm}} \cdot \frac{d_x}{\text{mm}} \cdot N = 135.674 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{mm^2}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{b}{mm} \cdot \frac{d_x}{mm} \cdot N = 103.42 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} > V_{Ed.red}$$

OK! Tilstrekkelig skjærstrekkkapasitet
Ikke beregningsmessig behov for skjærarmering

Kontroll skjærtrykkkapasitet:

$$V_{Ed} = 35.049 \frac{kN}{m}$$

Dimensjonerende skjærkraft

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \frac{N}{mm^2}} \right) = 0.516$$

Fasthetsreduksjonsfaktor

$$V_{Rd.max} := 0.5 \cdot b \cdot d_x \cdot v \cdot f_{cd} = 1289.484 \text{ kN}$$

Skjærtrykkkapasitet

$$V_{Rd.max} > V_{Ed}$$

OK! Mer enn nok skjærtrykkkapasitet

Siden det er tilstrekkelig med skjærkapasitet i x-retning velges det å ikke gjennomføre kontroll i y-retning, da dimensjonerende skjærkraft og kapasitet vil være omtrent det samme.

Det regnes heller ikke på minimum skjærarmering da det ikke stilles krav til dette i plater (Sørensen, s.67).

Vedlegg A2 - Dimensjonering av T-bjelke

Materialdata:

Betong B35:

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

Betongens karakteristiske trykkfasthet - Tab. 3.1

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Dimensjonerende trykkfaktor betong -
NA.3.1.6(1)P

$$\gamma_c := 1.5$$

Materialfaktor betong - Tab. 2.1N

$$f_{cd} := \frac{(\alpha_{cc} \cdot f_{ck})}{\gamma_c} = 19.8 \text{ MPa}$$

Trykkfasthet betong - EC2 3.1.6

$$f_{ctm} := 3.2 \text{ MPa}$$

Middelverdi av sentrisk trykkfasthet etter 28 døgn
- Tab. 3.1

$$\alpha := 0.412$$

Trykksonehøyde for normalarmert tverrsnitt,
Tab. 4.2 , Sørensen

Armering B500C:

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

Karakteristisk flytegrense armering

$$\gamma_s := 1.15$$

Materialfaktor armeringsstål - Tab. 2.1N

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ MPa}$$

Dimensjonerende flytegrense armering

Nominell overdekning:

$$C_{min} := 20 \text{ mm}$$

Minste overdekning

$$\Delta C_{dev} := 10 \text{ mm}$$

Tillatt avvik

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} = 30 \text{ mm}$$

Nominell overdekning

Bjelkedimensjoner:

$b := 300 \text{ mm}$	Bredde på bjelke
$h := 600 \text{ mm}$	Antar en høyde på bjelken
$t := 280 \text{ mm}$	Tykkelse på dekke over
$\emptyset := 20 \text{ mm}$	Valgt armeringsdiameter
$\emptyset_b := 8 \text{ mm}$	Bøylearmering
$\emptyset_d := 12 \text{ mm}$	Armering dekke
$H := 880 \text{ mm}$	Total høyde
$d := H - \frac{\emptyset}{2} - \emptyset_b - C_{nom} = 832 \text{ mm}$	Effektiv høyde felt
$d_2 := H - \frac{\emptyset}{2} - \emptyset_b - \emptyset_d - C_{nom} = 820 \text{ mm}$	Effektiv høyde støtte

Effektiv flensbredde for felt 1 og 3:

$l := 7.2 \text{ m}$	Spennvidde
$b_w := 300 \text{ mm}$	Geometriske parametre etter EC2 5.2.3.1(3)
$b_1 := 3600 \text{ mm}$	
$b_2 := 3000 \text{ mm}$	
$l_{0,f13} := 0.85 \cdot 7.2 \text{ m} = 6.12 \text{ m}$	Avstand mellom momentnullpunkt, EC2 figur 5.2
$b_{eff.1} := \min(0.2 \cdot b_1 + 0.1 \cdot l_{0,f13}, 0.2 \cdot l_{0,f13}, b_1) = 1.22 \text{ m}$	
$b_{eff.2} := b_{eff.1} = 1.22 \text{ m}$	
$b_{eff.f13} := b_{eff.1} + b_{eff.2} + b_w = 2.75 \text{ m}$	

Effektiv flensbredde for felt 2:

$$l_{0,f2} := 0.7 \cdot 7.2 \text{ m} = 5.04 \text{ m} \quad \text{Avstand mellom momentnullpunkt}$$

$$b_{eff.11} := \min(0.2 \cdot b_1 + 0.1 \cdot l_{0,f2}, 0.2 \cdot l_{0,f2}, b_1) = 1.01 \text{ m}$$

$$b_{eff.22} := b_{eff.11} = 1.22 \text{ m}$$

$$b_{eff.f2} := b_{eff.11} + b_{eff.22} + b_w = 2.53 \text{ m}$$

Effektiv bredde for støtter:

$$l_{0,s} := 0.15 \cdot (7.2 + 7.2) \text{ m} = 2.16 \text{ m} \quad \text{Avstand mellom momentnullpunkt}$$

$$b_{eff.111} := \min(0.2 \cdot b_1 + 0.1 \cdot l_{0,s}, 0.2 \cdot l_{0,s}, b_1) = 0.43 \text{ m}$$

$$b_{eff.222} := b_{eff.111} = 0.43 \text{ m}$$

$$b_{eff.s} := b_{eff.111} + b_{eff.222} + b_w = 1.16 \text{ m}$$

Momenter fra SAP2000:

$$m_{13} := 441.51 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Største moment felt 1 og 3}$$

$$m_2 := 209.37 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Største moment felt 2}$$

$$m_s := 508.46 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Største moment midtopplegg}$$

Dimensjonerende last fra SAP2000:

$$q_{Ed} := 98.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dimensjonerende momenter:

Dimensjonerende moment blir beregnet med likning 4.33 i Sørensen:

For T-tverrsnitt, felt 1 og 3:

$$M_{Rd1} := f_{cd} \cdot b_{eff.f13} \cdot t \cdot (d - 0.5 \cdot t) = 10560.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Trykkspenning i flens:

$$\sigma_{cd.f13} := \frac{M_{Rd1}}{t \cdot b_{eff.f13} \cdot \left(d - \frac{t}{2}\right)} = 19.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{cd.f13} \leq f_{cd} \quad \text{OK! Trykksonen holder}$$

For T-tverrsnitt, felt 2:

$$M_{Rd2} := f_{cd} \cdot b_{eff.f2} \cdot t \cdot (d - 0.5 \cdot t) = 9730.24 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Trykkspenning i flens:

$$\sigma_{cd.f2} := \frac{M_{Rd2}}{t \cdot b_{eff.f2} \cdot \left(d - \frac{t}{2}\right)} = 19.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{cd.f2} \leq f_{cd} \quad \text{OK! Trykksonen holder}$$

Der flensen ligger på strekksiden, som over midtopplegget, regnes tverrsnittet som rektangulært med bredde lik b_w (Sørensen, s.53):

$$M_{Rd3} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2 = 1132.7 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Beregning av nødvendig armeringsmengde:

Største tillatte verdi for momentarm:

$$z := 0.95 \cdot d = 790.4 \text{ mm}$$

1. Felt 1 og 3

$$z_{13} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{13}}{M_{Rd1}} \right) dx$$

$$z_{13} = 0.99 \text{ dx}$$

Ikke OK, bruker 0.95d videre

$$A_{se} := \frac{m_{13}}{f_{yd} \cdot z} = 1285 \text{ mm}^2$$

Velger 5stkØ20 som gir $A_s = 1570 \text{ mm}^2$

2. I midtfelt:

$$z_2 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_2}{M_{Rd2}} \right) dx$$

$$z_2 = 1 \text{ dx}$$

Ikke OK, bruker 0.95d videre

$$A_{sm} := \frac{m_2}{f_{yd} \cdot z} = 609 \text{ mm}^2$$

Velger 2stkØ20 som gir $A_s = 628 \text{ mm}^2$

3. Over midtopplegg:

$$z_s := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_s}{M_{Rd3}} \right) dx$$

$$z_s = 0.92 \text{ dx}$$

OK!

$$A_{ss} := \frac{m_s}{f_{yd} \cdot z_s} = 1266 \text{ mm}^2$$

Velger 5stkØ20 som gir $A_s = 1570 \text{ mm}^2$

Kontroll av skjærkapasitet:

Kontroller for skjærkapasitet over støtte gjøres etter regler gitt i EC2, 6.2 og det kontrolleres for både strekkbrudd og trykkbrudd.

$$V_{Ed} := 424.42 \text{ kN}$$

Største skjærkraft over støtte

Kontroll skjærstrekkkapasitet:

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} = 1.49 \quad \text{OK!} < 2.0$$

$$C_{Rd.c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

$$\rho_l := \frac{1256 \text{ mm}^2}{(b_w \cdot d)} = 0.005 \quad \text{OK!} < 0.02$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.38 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$V_{Ed.min} := v_{min} \cdot b_w \cdot d = 94.027 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{\text{mm}^2}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{b}{\text{mm}} \cdot \frac{d_2}{\text{mm}} \cdot N = 114.461 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} > V_{Ed.min} \quad \text{OK!}$$

$$V_{Rd.c} < V_{Ed}$$

Ikke OK!

Det er beregningsmessig behov for skjærarmring

Beregningsmessig nødvendig skjærarmoring:

Følger eksempel 4.11 - Beregningsmessig nødvendig skjærarmoring i Sørensen:

Reduksjona av skjærkraft nær opplager etter EC2 6.2.2(6):

$$V_{Ed} = 424.42 \text{ m} \cdot \frac{kN}{m} \quad \text{Dimensjonerende skjærkraft}$$

$$\Delta V_{Ed} := q_{Ed} \cdot d = 81.769 \text{ m} \cdot \frac{kN}{m} \quad \text{Reduksjon nær opplegg}$$

$$V_{Ed,red} := V_{Ed} - \Delta V_{Ed} = 342.65 \text{ m} \cdot \frac{kN}{m}$$

$$V_{Ed,red} := 342.65 \text{ kN} \quad \text{Redusert dimensjonerende skjærkraft}$$

$$z := 0.9 \cdot d = 748.8 \text{ mm} \quad \text{EC2 6.2.3(1)}$$

$$f_{yd} = 435 \frac{N}{mm^2}$$

$$\cot\theta := 2.5$$

$$\tan\theta := 0.4$$

Gir det minste skjærarmoringstversnittet

Nødvendig skjærarmoringstversnitt pr lengdeenhet:

$$VR_{d,s} = A_{sw}/2 \cdot z \cdot f_{yd} \cdot \cot\theta > V_{Ed} = 342,65 \text{ kN}$$

$$A_{sw}/s = \frac{V_{Ed,red}}{f_{yd} \cdot z \cdot \cot\theta} = 0.399 \frac{mm^2}{mm}$$

Minimum skjærarmoringstversnitt:

$$\rho_{w,min} := 0.1 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot b \cdot \left(\frac{N}{mm^2} \right)^{0.5} = 0.355 \frac{mm^2}{mm}$$

Minimumskrav til skjærarmoringstversnitt er oppfylt

$$A_{sw} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{\emptyset_b^2}{4} = 100.5 \text{ mm}^2$$

Areal bøyler Ø8

$$s := \frac{A_{sw}}{0.399 \frac{mm^2}{mm}} = 252 \text{ mm}$$

Senteravstand mellom bøylene

$$h' := d - C_{nom} - \emptyset_b - \frac{\emptyset}{2} = 784 \text{ mm}$$

$$s_{I,max} := 0.6 \cdot h' = 470.4 \text{ mm}$$

Går for bøyer Ø8s250

Skjærtrykkkontroll:

$$v_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \frac{N}{mm^2}} \right) = 0.516$$

$$V_{Rd,max} := \frac{v_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z}{(\cot\theta + \tan\theta)} = 836.788 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} > V_{Ed}$$

OK! Skjærtrykkkapasiteten er tilstrekkelig

Vedlegg B: Dimensjonering av flatdekke

Vedlegg B.1 - Dimensjonering av flatdekke

Materialdata:

Betong B35:

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

Betongens karakteristiske trykkfasthet - Tab. 3.1

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Dimensjonerende trykkfaktor betong -
NA.3.1.6(1)P

$$\gamma_c := 1.5$$

Materialfaktor betong - Tab. 2.1N

$$f_{cd} := \frac{(\alpha_{cc} \cdot f_{ck})}{\gamma_c} = 19.8 \text{ MPa}$$

Trykkfasthet betong - EC2 3.1.6

$$f_{ctm} := 3.2 \text{ MPa}$$

Middelverdi av sentrisk trykkfasthet etter 28 døgn
- Tab. 3.1

$$\alpha := 0.412$$

Trykksonehøyde for normalarmert tverrsnitt -
Tab. 4.2, Sørensen

Armering B500C:

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

Karakteristisk flytegrense armering

$$\gamma_s := 1.15$$

Materialfaktor armeringsstål - Tab. 2.1N

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ MPa}$$

Dimensjonerende flytegrense armering

Nominell overdekning - EC2, 4.4.1:

$$C_{min} := 16 \text{ mm}$$

Minste overdekning

$$\Delta C_{dev} := 10 \text{ mm}$$

Tillatt avvik

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} = 26 \text{ mm}$$

Nominell overdekning

Dekkedimensjoner:

$$L_x := 7.2 \text{ m}$$

Spennvidde i x-retning for ramme 1

$$L_y := 7.2 \text{ m}$$

Spennvidde i y-retning for ramme 2

$$L := 7.2 \text{ m}$$

Lik spennvidde, settes lik L

$$\frac{L}{25} = 288 \text{ mm}$$

Minimum anbefalt dekketykkelse etter NB33/Sørensen

$$t := 280 \text{ mm}$$

Valgt platetykkelse lavere enn anbefalt for å kunne sammenligne dekkene

$$\emptyset := 16 \text{ mm}$$

Valgt armeringsdiameter

$$b := 1000 \text{ mm}$$

Bredde for beregning pr meter

$$d_x := t - C_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 246 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i x-retning

$$d_y := d_x - \emptyset = 230 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i y-retning

Beregning av flatdekke gjøres med ekvivalent rammemetode etter eksempel 2.4.8 - Eksempel på dimensjonering og nedbøyningsberegning (Sørensen, s.392)

Momentkapasitet:

Beregning av trykksonens momentkapasitet i begge retninger gjøres med likning 4.23 fra Sørensen:

$$M_{Rdx} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_x^2 = 330.1 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i x-retning}$$

$$M_{Rdy} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_y^2 = 288.5 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i y-retning}$$

Dimensjonerende momenter:

Dimensjonerende momenter for de ulike feltene og over støtter beregnes ved å modellere flatdekkestripen som en kontinuerlig bjelke i SAP2000:

Felt 1 og 3 (endefelt):

$$M_{ef} := 418.78 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad \text{Største dimensjonerende moment}$$

$$m_{xef} := \frac{M_{ef}}{L_y} = 58.164 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning}$$

$$m_{yef} := m_{xef} = 58.164 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning}$$

Støtte 2 og 3:

$$M_s := 481.19 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad \text{Største dimensjonerende moment}$$

$$m_{xs} := \frac{M_s}{L_y} = 66.832 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning}$$

$$m_{ys} := m_{xs} = 66.832 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning}$$

Felt 2 (innerfelt):

$$M_{if} := 210.83 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad \text{Største dimensjonerende moment}$$

$$m_{xif} := \frac{M_{if}}{L_y} = 29.282 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning}$$

$$m_{yif} := m_{xif} = 29.282 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning}$$

Beregning av minimumsarmering:

Bestemmes med følgende uttrykk gitt i EC2 NA 9.2.1(1):

$$A_{sx.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 409 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \quad \text{i x-retning}$$

$$A_{sy.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 383 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \quad \text{i y-retning}$$

Sjekke at minimumsarmering også er større enn:

$$A_{x.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 319.8 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sx.min} > A_{x.min} \quad \text{OK!}$$

$$A_{y.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 299 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sy.min} > A_{y.min} \quad \text{OK!}$$

Beregning av nødvendig armering:

For ramme 1 i x-retning:

Momentfordeling over endefeltene i x-retning:

$$m_{x_{ef1}} := 1.2 \cdot m_{x_{ef}} = 69.797 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$

$$m_{x_{ef2}} := 0.8 \cdot m_{x_{ef}} = 46.531 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Største tillatte verdien for den indre momentarmen z:

$$z := 0.95 \cdot d_x = 234 \text{ mm}$$

Nødvendig underkantarmring beregnes ut ifra momenter over endefelt:

1. Søylestripe

$$z_{f1} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{x_{ef1}}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 237 \text{ mm}$$

$$A_{fx.fs} := \frac{m_{x_{ef1}}}{f_{yd} \cdot z} = 687 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efx.fs} := \max(A_{fx.fs}, A_{sx.min}) = 687 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 16s290 = 693mm^2/m$$

2. Feltstripe

$$z_{f2} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{x_{ef2}}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 240 \text{ mm}$$

$$A_{fx.ff} := \frac{m_{x_{ef2}}}{f_{yd} \cdot z} = 458 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efx.ff} := \max(A_{fx.ff}, A_{sx.min}) = 458 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 16s400 = 503mm^2/m$$

Momentfordeling over støtte 2 og 3 i x-retning:

$$m_{xs1} := 1.8 \cdot m_{xs} = 120.298 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Indre søylestripe

$$m_{xs2} := 1.2 \cdot m_{xs} = 80.198 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Ytre søylestripe

$$m_{xs3} := 0.5 \cdot m_{xs} = 33.416 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Feltstripe

1. Indre søylestripe

$$z1 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs1}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 230.8 \text{ mm}$$

$$Asx.s1 := \frac{m_{xs1}}{f_{yd} \cdot z1} = 1199 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.s1} := \max(Asx.s1, A_{sx.min}) = 1199 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø16s160 = 1257 mm²/m

2. Ytre søylestripe

$$z2 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 235.8 \text{ mm}$$

$$Asx.s2 := \frac{m_{xs2}}{f_{yd} \cdot z} = 789 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.s2} := \max(Asx.s2, A_{sx.min}) = 789 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø16s250 = 804 mm²/m

3. Feltstripe

$$z3 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs3}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 242 \text{ mm}$$

$$Asx.f := \frac{m_{xs3}}{f_{yd} \cdot z} = 329 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.f} := \max(Asx.f, A_{sx.min}) = 409 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø12s250 = 452 mm²/m

Momentfordeling over innerfelt i x-retning:

$$m_{xif1} := 1.2 \cdot m_{xif} = 35.138 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$

$$m_{xif2} := 0.8 \cdot m_{xif} = 23.426 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Nødvendig underkantarmring beregnes ut ifra momenter over innerfelt:

1. Søylestripe

$$zf3 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xif1}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 242 \text{ mm}$$

$$Afy.fs := \frac{m_{xif1}}{f_{yd} \cdot zf3} = 335 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ifx.fs} := \max(Afy.fs, A_{sx.min}) = 409 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 12s250 = 452 \text{ mm}^2/m$$

2. Feltstripe

$$zf4 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xif2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 243 \text{ mm}$$

$$Afy.ff := \frac{m_{xif2}}{f_{yd} \cdot zf4} = 222 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ifx.ff} := \max(Afy.ff, A_{sx.min}) = 409 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 12s250 = 452 \text{ mm}^2/m$$

Ramme 2 i y-retning: De dimensjonerende momentene og fordelingen av momenter vil være den samme i y-retningen. Det vil derimot bli en liten forskjell i armeringsmengde fordi momentkapasiteten og den effektive høyden er litt annerledes.

Momentfordeling i endefelt:

Momentfordeling over innerfeltene i y-retning:

$$m_{yef1} := 1.2 \cdot m_{yef} = 69.797 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$

$$m_{yef2} := 0.8 \cdot m_{yef} = 46.531 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Største tillatte verdien for den indre momentarmen z:

$$z_y := 0.95 \cdot d_y = 219 \text{ mm}$$

Nødvendig underkantarming beregnes ut ifra momenter over endefelt:

1. Søylestripe

$$z_{f11} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{yef1}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 221 \text{ mm}$$

$$A_{efy.fs} := \frac{m_{yef1}}{f_{yd} \cdot z_y} = 735 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efy.fs} := \max(A_{efy.fs}, A_{sy.min}) = 735 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 16s270 = 745 \text{ mm}^2/m$$

2. Feltstripe

$$z_{f22} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xef2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_y = 224 \text{ mm}$$

$$A_{efy.ff} := \frac{m_{yef2}}{f_{yd} \cdot z_y} = 490 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efy.ff} := \max(A_{efy.ff}, A_{sy.min}) = 490 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 16s400 = 503 \text{ mm}^2/m$$

Momentfordeling over støtte 2 og 3 i y-retning:

$$m_{ys1} := 1.8 \cdot m_{ys} = 120.298 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Indre søylestripe

$$m_{ys2} := 1.2 \cdot m_{ys} = 80.198 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Ytre søylestripe

$$m_{ys3} := 0.5 \cdot m_{ys} = 33.416 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Feltstripe

1. Indre søylestripe

$$z_{11} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{ys1}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 213.7 \text{ mm}$$

$$A_{sy.s1} := \frac{m_{xs1}}{f_{yd} \cdot z_{11}} = 1295 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sy.s1} := \max(A_{sy.s1}, A_{sy.min}) = 1295 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø16s150 = 1340 mm²/m

2. Ytre søylestripe

$$z_{22} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{ys2}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 219.1 \text{ mm}$$

$$A_{sy.s2} := \frac{m_{ys2}}{f_{yd} \cdot z_y} = 844 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sy.s2} := \max(A_{sy.s2}, A_{sy.min}) = 844 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø16s230 = 874 mm²/m

3. Feltstripe

$$z_{33} := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{ys3}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 225 \text{ mm}$$

$$A_{sy.f} := \frac{m_{ys3}}{f_{yd} \cdot z_y} = 352 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sy.f} := \max(A_{sy.f}, A_{sy.min}) = 383 \frac{mm^2}{m}$$

Velger Ø12s250 = 452 mm²/m

Momentfordeling over innerfeltene i y-retning:

$$m_{yif1} := 1.2 \cdot m_{yif} = 35.138 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$

$$m_{yif2} := 0.8 \cdot m_{yif} = 23.426 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Nødvendig underkantarmring beregnes ut ifra momenter over innerfelt:

1. Søylestripe

$$zf33 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{yif1}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 225 \text{ mm}$$

$$Aify.fs := \frac{m_{yif1}}{f_{yd} \cdot z_y} = 370 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ify.fs} := \max(Aify.fs, A_{sy.min}) = 383 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 12s250 = 452 \text{ mm}^2/m$$

5. Feltstripe

$$zf44 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{yif2}}{\frac{M_{Rdy}}{m}} \right) \cdot d_y = 227 \text{ mm}$$

$$Aify.ff := \frac{m_{yif2}}{f_{yd} \cdot z_y} = 247 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ify.ff} := \max(Aify.ff, A_{sy.min}) = 383 \frac{mm^2}{m} \quad \text{Velger } \emptyset 12s250 = 452 \text{ mm}^2/m$$

Vedlegg B2 - Skjærkraftkapasitet

Kontroll av skjærkraftkapasitet - gjennomlokking ved søyler:

Gjennomlokkingskontroll utføres etter regler gitt i EC2, 6.4.

I dette vedlegget blir det kun utført kontroll for en av midtsøylene, men metoden vil være den samme for de andre søylene.

Søylene er kvadratiske med dimensjoner 300x300 mm.

$b_s := 300 \text{ mm}$	Sidelengden til søylene
$b = 1000 \text{ mm}$	Skjærkapasiteten beregnes pr meter bredde
$c_1 := b_s = 300 \text{ mm}$	Søylens dimensjon parallelt med lastens eksentrisitet (EC2)
$c_2 := c_1 = 300 \text{ mm}$	Søylens dimensjon parallelt med lastens eksentrisitet (EC2)
$d_{eff} := \frac{(d_x + d_y)}{2} = 238 \text{ mm}$	Platens effektive høyde (midlere høyde)
$u_1 := 2 \cdot (c_1 + c_2) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d_{eff} = 4191 \text{ mm}$	Lengde av kritisk kontrollsnitt

Dimensjonerte skjærkrefter for de ulike søylene (hentet fra SAP2000):

$$V_{Ed.midt} := 401.1 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.side} := 139.6 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.hjørne} := 69.8 \text{ kN}$$

Tilhørende β -verdier for beregning av skjærspenningen:

$$\beta_{midt} := 1.15$$

$$\beta_{side} := 1.4$$

$$\beta_{hjørne} := 1.5$$

Videre fortsettes det med kun en midtsøyle:

Dermed er:

$$\beta := \beta_{midt} = 1.15$$

Dimensjonerende skjærspenning for midtsøylen:

$$v_{Ed.midt} := \frac{(\beta \cdot V_{Ed.midt})}{u_1 \cdot d_{eff}} = 0.462 \frac{N}{mm^2}$$

Skjærkapasitet uten beregningsmessig behov for skjærarmering:

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{eff}}} = 1.92 \quad 1.92 < 2.0 \quad \text{OK!}$$

Armeringsforhold:

$$\rho_{lx} := \frac{1257 \frac{mm^2}{m} \cdot 1.896}{b \cdot d_{eff}} \cdot m = 0.01001$$

As*1,896 fordi armering over søyle og 3d til hver side

$$\rho_{ly} := \frac{1340 \frac{mm^2}{m} \cdot 1.896}{b \cdot d_{eff}} \cdot m = 0.01067$$

$$\rho_l := (\rho_{lx} \cdot \rho_{ly})^{0.5} = 0.01 \quad 0.01 \leq 0.02 \quad \text{OK!}$$

$$C_{Rd.c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

$$V_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{N}{mm^2} = 0.761 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Dimensjonerende skjærkapasitet}$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \left(\frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.55 \frac{N}{mm^2}$$

$$V_{Rd.c} > v_{min}$$

OK!

$$\frac{v_{Ed.midt}}{V_{Rd.c}} = 0.608$$

OK! Tilstrekkelig skjærkapasitet
Gjennomlokkingsarmering er ikke nødvendig

Skjærspenning ved søyleomkretsen u_0 :

$$u_0 := 2 \cdot (c_1 + c_2) = 1200 \text{ mm}$$

Søyleomkrets innersøyle
Annerledes for kant- og hjørnesøyle

$$v_{Ed} := \frac{V_{Ed.midt}}{u_0 \cdot d_{eff}} = 1.404 \frac{N}{mm^2}$$

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \frac{N}{mm^2}} \right) = 0.516$$

Gjennomlokkingskapasitet (skjærtrykkkapasitet) etter EC2:

$$V_{Rd.max} := \min \left(0.4 \cdot v \cdot f_{cd}, \frac{(16 \cdot V_{Rd.c} \cdot u_1)}{\beta_{midt} \cdot u_0} \right) = 4.094 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{v_{Ed}}{V_{Rd.max}} = 0.343$$

OK! Tilstrekkelig kapasitet

Vedlegg B3 - Nedbøyningsberegning

Nedbøyning for et innerfelt i dekket blir utført som eksempel 2.4.8 i Sørensen. Dette er en forenklet utregning av nedbøyning, siden det ikke blir tatt hensyn til tillegg i nedbøyning pga. svinn eller "tension stiffening".

Starter med å skalere momentene i bruddgrensetilstanden til bruksgrensetilstanden:

Laster på dekke:

$g_c := 25 \frac{kN}{m^3}$	Egenlast normalbetong
$g := g_c \cdot t = 7 \frac{kN}{m^2}$	Egenlast dekke
$\gamma_g := 1.2$	Lastfaktor egenlast
$p := 3 \frac{kN}{m^2}$	Nyttelast kontor
$\gamma_p := 1.5$	Lastfaktor nyttelast
$q_{Ed} := 1.2 \cdot g + 1.5 \cdot p = 12.9 \frac{kN}{m^2}$	Bruddgenselast
$q := g + 0.3 \cdot p = 7.9 \frac{kN}{m^2}$	Permanent bruksgrenselast
$f := \frac{q}{q_{Ed}} = 0.612$	Skaleringsfaktor

Nedbøyning i x-retning:

Skalering av momenter i søylestripe i x-retning:

$$m_1 := m_{xs1} \cdot f = 73.671 \frac{1}{m} \cdot m \cdot kN$$

$$m_2 := m_{xif1} \cdot f = 21.519 \frac{1}{m} \cdot m \cdot kN$$

Beregning av lengde med underkantstrekk:

$$m_2 = 1.2qa^2/8 \quad \text{- formel fra Sørensen, s.391}$$

$$a := \sqrt{\frac{8 \cdot m_2}{1.2 \cdot q}} = 4.26 \text{ m}$$

$$\beta_u := \frac{a}{L_x} = 0.592$$

Bøyestivhet i opprisset tilstand (Stadium II) ved søyle:

$$\rho_{sx} := \frac{1257 \text{ mm}}{1000 \cdot d_x} = 0.0051$$

Antar at krytall er $\phi = 2,2$ slik at langtids E-modul blir:

$$E_{c.lang} := 10000 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_s := 200000 \frac{N}{mm^2}$$

$$\eta := \frac{E_s}{E_{c.lang}} = 20$$

Trykksonehøydefaktor i x-retningen:

$$\alpha_{sx} := \sqrt{(\eta \cdot \rho_{sx})^2 + 2 \cdot \eta \cdot \rho_{sx}} - \eta \cdot \rho_{sx} = 0.361$$

Arealtreghetsmoment for 1 m platestripe i x-retningen:

$$I_{cs.x} := 0.5 \cdot \alpha_{sx}^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{sx}}{3}\right) \cdot b \cdot d_x^3 = (8.547 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_{sx} := E_{c.lanq} \cdot I_{cs.x} = (8.547 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Bøystivhet i felt:

$$\rho_{fx} := \frac{452 \text{ mm}}{1000 \cdot d_x} = 0.00184$$

$$\alpha_{fx} := \sqrt{(\eta \cdot \rho_{fx})^2 + 2 \cdot \eta \cdot \rho_{fx}} - \eta \cdot \rho_{fx} = 0.237$$

$$I_{cs.x2} := 0.5 \cdot \alpha_{fx}^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{fx}}{3}\right) \cdot 10^3 \cdot d_x^3 \text{ mm} = (3.845 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_{fx} := E_{c.lanq} \cdot I_{cs.x2} = (3.845 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Midlere bøystivhet for stripe i x-retning:

$$EI_{xm} := \beta_u \cdot EI_{fx} + (1 - \beta_u) \cdot EI_{sx} = (5.764 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Splitter deretter opp momentdiagrammet og regner nedbøyning med enhetslastmetoden og hurtigintegrasjonsfaktor:

$$m_f := m_1 + m_2 = 95.189 \frac{1}{m} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$m_s := -m_1 = -73.671 \frac{1}{m} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\delta_{sx} := \left(\frac{5}{12} \cdot m_f \cdot \frac{L_x^2}{4} + \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot \frac{L_x^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{EI_{xm}} \cdot m = 6.356 \text{ mm}$$

Nedbøyning i y-retning:

Skalering av momenter i feltstripe i y-retning:

$$m_3 := m_{ys3} \cdot f = 20.464 \frac{1}{m} \cdot m \cdot kN$$

$$m_4 := m_{yif2} \cdot f = 14.346 \frac{1}{m} \cdot m \cdot kN$$

Beregning av lengde med underkantstrekk:

$m_4 = 0.8qb^2/8$ - formel fra Sørensen, s.391

$$b := \sqrt{\frac{8 \cdot m_2}{0.8 \cdot q}} = 5.22 \text{ m}$$

$$\gamma_u := \frac{b}{L_y} = 0.725$$

Bøyestivhet i opprisset tilstand (Stadium II) ved søyle:

$$\rho_{sy} := \frac{452 \text{ mm}}{1000 \cdot d_y} = 0.002$$

$$E_{c.lanq} = 10000 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_s = 200000 \frac{N}{mm^2}$$

$$\eta = 20$$

$$\alpha_{sy} := \sqrt{(\eta \cdot \rho_{sy})^2 + 2 \cdot \eta \cdot \rho_{sy}} - \eta \cdot \rho_{sy} = 0.244$$

$$I_{cs.y} := 0.5 \cdot \alpha_{sy}^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{sy}}{3}\right) \cdot b \cdot d_y^3 = (3.322 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_{sy} := E_{c.lanq} \cdot I_{cs.y} = (3.322 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Bøyestivhet i felt:

$$\rho_{fy} := \frac{452 \text{ mm}}{1000 \cdot d_y} = 0.00197$$

$$\alpha_{fy} := \sqrt{(\eta \cdot \rho_{fy})^2 + 2 \cdot \eta \cdot \rho_{fy}} - \eta \cdot \rho_{fy} = 0.244$$

$$I_{cs,y2} := 0.5 \cdot \alpha_{fy}^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{fy}}{3}\right) \cdot 10^3 \cdot d_y^3 \text{ mm} = (3.322 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$EI_{fy} := E_{c,lang} \cdot I_{cs,y2} = (3.322 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Midlere bøyestivhet for stripe i y-retning:

$$EI_{ym} := \gamma_u \cdot EI_{fy} + (1 - \gamma_u) \cdot EI_{sy} = (3.322 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Splitter deretter opp momentdiagrammet og regner nedbøyning med enhetslastmetoden og hurtigintegrasjonsfaktor:

$$m_{f1} := m_3 + m_4 = 34.81 \frac{1}{m} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$m_{s2} := -m_3 = -20.464 \frac{1}{m} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\delta_{yf} := \left(\frac{5}{12} \cdot m_{f1} \cdot \frac{L_y^2}{4} + \frac{1}{2} \cdot m_{s2} \cdot \frac{L_y^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{EI_{fy}} \cdot m = 16.665 \text{ mm}$$

Total nedbøyning:

$$\delta_{sx} + \delta_{yf} = 23.021 \text{ mm}$$

Kontroll EC2, Maksimal tillatt nedbøyning:

$$\delta_{tillatt} := \frac{L}{250} = 28.8 \text{ mm} \quad \text{OK for dette tilfellet!}$$

Vedlegg C: Dimensjonering av BubbleDeck

Vedlegg C1 - Dimensjonering av Bubbledeck

Materialdata:

Betong B35:

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

Betongens karakteristiske trykkfasthet - Tab. 3.1

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Dimensjonerende trykkfaktor betong -
NA.3.1.6(1)P

$$\gamma_c := 1.5$$

Materialfaktor betong - Tab. 2.1N

$$f_{cd} := \frac{(\alpha_{cc} \cdot f_{ck})}{\gamma_c} = 19.8 \text{ MPa}$$

Trykkfasthet betong - EC2 3.1.6

$$f_{ctm} := 3.2 \text{ MPa}$$

Middelverdi av sentrisk trykkfasthet etter 28 døgn
- Tab. 3.1

$$\alpha := 0.412$$

Trykksonehøyde for normalarmert tverrsnitt -
Tab.42, Sørensen

Armering B500C:

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

Karakteristisk flytegrense armering

$$\gamma_s := 1.15$$

Materialfaktor armeringsstål - Tab. 2.1N

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \text{ MPa}$$

Dimensjonerende flytegrense armering

Nominell overdekning - EC2, 4.4.1:

$$C_{min} := 10 \text{ mm}$$

Minste overdekning

$$\Delta C_{dev} := 10 \text{ mm}$$

Tillatt avvik

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} = 20 \text{ mm}$$

Nominell overdekning

Dekkedimensjoner:

$$L_x := 5.0 \text{ m}$$

Spennvidde i x-retning

$$L_y := 5.0 \text{ m}$$

Spennvidde i y-retning

$$t := 230 \text{ mm}$$

Velger Bubbledeck med platetykkelse lik 230mm

$$\emptyset := 8 \text{ mm}$$

Valgt armeringsdiameter

Velger å bruke Ø8s100-nett (K503) i over- og underkant

$$b := 1000 \text{ mm}$$

Bredde for beregning pr meter

$$d_x := t - C_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 206 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i x-retning

$$d_y := d_x - \emptyset = 198 \text{ mm}$$

Effektiv høyde i y-retning

Dimensjonering av bubbledeck gjøres med flatdekkemodellen. Bruker ekvivalent rammemetode og følger samme beregningsgang som flatdekket.

Momentkapasitet:

Beregning av trykksonens momentkapasitet i begge retninger gjøres med likning 4.23 fra Sørensen:

$$M_{Rdx} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_x^2 = 231.5 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i x-retning}$$

$$M_{Rdy} := 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_y^2 = 213.8 \text{ m} \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{Kapasitet i y-retning}$$

Dimensjonerende momenter:

Dimensjonerende momenter for de ulike feltene og over støtter beregnes ved å modellere bubbledeckstripen som en kontinuerlig bjelke med redusert egenvekt i SAP2000:

Felt 1 og 3 (endefelt):

$$M_{ef} := 104.25 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Største dimensjonerende moment

$$m_{xef} := \frac{M_{ef}}{L_y} = 20.85 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning

$$m_{yef} := m_{xef} = 20.85 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning

Støtte 2 og 3:

$$M_s := 116.2 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Største dimensjonerende moment

$$m_{xs} := \frac{M_s}{L_y} = 23.24 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning

$$m_{ys} := m_{xs} = 23.24 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning

Felt 2 (innerfelt):

$$M_{if} := 57.25 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Største dimensjonerende moment

$$m_{xif} := \frac{M_{if}}{L_y} = 11.45 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i x-retning

$$m_{yif} := m_{xif} = 11.45 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentintensitet pr. meter bredde i y-retning

Beregning av minimumsarmering:

Bestemmes med følgende uttrykk gitt i EC2 NA 9.2.1(1):

$$A_{sx.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 343 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \quad \text{i x-retning}$$

$$A_{sy.min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 329 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \quad \text{i y-retning}$$

Sjekke at minimumsarmering også er større enn:

$$A_{x.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_x \cdot \frac{1}{m} = 267.8 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sx.min} > A_{x.min} \quad \text{OK!}$$

$$A_{y.min} := 0.0013 \cdot b \cdot d_y \cdot \frac{1}{m} = 257.4 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{sy.min} > A_{y.min} \quad \text{OK!}$$

Beregning av nødvendig armering:

For bubbledeck vil utregningen kun bli vist for ramme 1 i x-retning siden metoden vil være det samme i for rammen i y-retning.

I bubbledeck benyttes et øvre og nedre armeringsnett. I dette tilfellet er det valgt å bruke et Ø8s100-nett (K503) oppe og nede med tverrsnittsareal = 503 mm²/m.

Momentfordeling over endefelt i x-retning:

$$m_{xef1} := 1.2 \cdot m_{xef} = 25.02 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$
$$m_{xef2} := 0.8 \cdot m_{xef} = 16.68 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Største tillatte verdien for den indre momentarmen z:

$$z := 0.95 \cdot d_x = 196 \text{ mm}$$

Nødvendig underkantarmring beregnes ut ifra momenter over endefelt:

1. Søylestripe

$$zf1 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xef1}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 202 \text{ mm}$$

$$Afx.fs := \frac{m_{xef1}}{f_{yd} \cdot z} = 294 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efx.fs} := \max(Afx.fs, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnettet dekker den nødvendige armeringsmengden .

2. Feltstripe

$$zf2 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xef2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 203 \text{ mm}$$

$$Afx.ff := \frac{m_{xef2}}{f_{yd} \cdot z} = 196 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{efx.ff} := \max(Afx.ff, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnettet dekker den nødvendige armeringsmengden .

Momentfordeling over støtte 2 og 3 i x-retning:

$$m_{xs1} := 1.8 \cdot m_{xs} = 41.832 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Indre søylestripe

$$m_{xs2} := 1.2 \cdot m_{xs} = 27.888 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Ytre søylestripe

$$m_{xs3} := 0.5 \cdot m_{xs} = 11.62 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m$$

Feltstripe

1. Indre søylestripe

$$z1 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs1}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 199.7 \text{ mm}$$

$$A_{sx.s1} := \frac{m_{xs1}}{f_{yd} \cdot z1} = 482 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.s1} := \max(A_{sx.s1}, A_{sx.min}) = 482 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringnettet ganget med redusert indre momentarm (for å ta hensyn til at nettet ligger lavere enn tilleggsarmeringen)
dekker = $503 \cdot 0,7 = 355 \text{ mm}^2/\text{m}$.
 $482 - 355 = 127 \text{ mm}^2/\text{m}$
Ø8s390 legges inn som tilleggsarmering på byggeplass = $129 \text{ mm}^2/\text{m}$

Total = $484 \text{ mm}^2/\text{m}$

2. Ytre søylestripe

$$z2 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 201.8 \text{ mm}$$

$$A_{sx.s2} := \frac{m_{xs2}}{f_{yd} \cdot z} = 328 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.s2} := \max(A_{sx.s2}, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnett ganget med redusert indre momentarm
dekker = $503 \cdot 0,7 = 355 \text{ mm}^2/\text{m}$.
Ikke behov for tilleggsarmering

3. Feltstripe

$$z3 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xs3}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 204 \text{ mm}$$

$$A_{sx.f} := \frac{m_{xs3}}{f_{yd} \cdot z} = 137 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sx.f} := \max(A_{sx.f}, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnett ganget med redusert indre momentarm
dekker = $503 \cdot 0,7 = 355 \text{ mm}^2/\text{m}$.
Ikke behov for tilleggsarmering

Momentfordeling over innerfelt i x-retning:

$$m_{xif1} := 1.2 \cdot m_{xif} = 13.74 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Søylestripe}$$

$$m_{xif2} := 0.8 \cdot m_{xif} = 9.16 \frac{1}{m} \cdot kN \cdot m \quad \text{Feltstripe}$$

Nødvendig underkantarmring beregnes ut ifra momenter over innerfelt:

1. Søylestripe

$$zf3 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xif1}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 204 \text{ mm}$$

$$Afy.fs := \frac{m_{xif1}}{f_{yd} \cdot zf3} = 155 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ifx.fs} := \max(Afy.fs, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnettet dekker den nødvendige armeringsmengden .

2. Feltstripe

$$zf4 := \left(1 - 0.17 \cdot \frac{m_{xif2}}{\frac{M_{Rdx}}{m}} \right) \cdot d_x = 205 \text{ mm}$$

$$Afy.ff := \frac{m_{xif2}}{f_{yd} \cdot zf4} = 103 \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{ifx.ff} := \max(Afy.ff, A_{sx.min}) = 343 \frac{mm^2}{m}$$

Armeringsnettet dekker den nødvendige armeringsmengden .

I dette tilfellet var momentene så små at det valgte armeringsnettet var nok for å dekke den nødvendige armeringsmengden i de fleste stripene. Der armeringsnettet ikke dekker alt legges resterende armering til som tilleggsarmering. I overkant ganges arealet til armeringsnettet med en indre momentarm for å ta hensyn til plasseringen av nettet, som vil være lavere enn annen tilleggsarmering som legges på byggeplass.

Vedlegg C2 - Skjærkraftkapasitet

Kontroll av skjærkraftkapasitet - gjennomlokking ved søyler:

I et bubbledeck blir kulene i nærheten av søylene fjernet, og gjennomlokkingskontroll kan dermed utføres som for et massivtverrsnitt. Gjennomlokkingskontroll utføres etter regler gitt i EC2, 6.4, på samme måter som for flatdekket.

Søylene er kvadratiske med dimensjoner 150x150mm.

$b_s := 150 \text{ mm}$	Sidelengden til søylene
$b = 1000 \text{ mm}$	Skjærkapasiteten beregnes pr meter bredde
$c_1 := b_s = 150 \text{ mm}$	Søylens dimensjon parallelt med lastens eksentrisitet (EC2)
$c_2 := c_1 = 150 \text{ mm}$	Søylens dimensjon parallelt med lastens eksentrisitet (EC2)
$d_{eff} := \frac{(d_x + d_y)}{2} = 202 \text{ mm}$	Platens effektive høyde (midlere høyde)
$u_1 := 2 \cdot (c_1 + c_2) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d_{eff} = 3138 \text{ mm}$	Lengde av kritisk kontrollsnitt

Dimensjonerte skjærkrefter for de ulike søylene (hentet fra SAP2000):

$$V_{Ed.midt} := 139.600 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.side} := 49.325 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.hjørne} := 24.663 \text{ kN}$$

Tilhørende β -verdier for beregning av skjærspenningen:

$$\beta_{midt} := 1.15$$

$$\beta_{side} := 1.4$$

$$\beta_{hjørne} := 1.5$$

Videre fortsettes det med beregning av en midtsøyle:

Dermed er:

$$\beta := \beta_{midt} = 1.15$$

Dimensjonerende skjærspenning for midtsøylen:

$$v_{Ed.midt} := \frac{(\beta \cdot V_{Ed.midt})}{u_1 \cdot d_{eff}} = 0.253 \frac{N}{mm^2}$$

Skjærkapasitet uten beregningsmessig behov for skjærarmering:

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{eff}}} = 1.995 \quad 1.995 < 2.0 \quad \text{OK!}$$

Armeringsforhold:

$$\rho_{lx} := \frac{503 \frac{mm^2}{m} \cdot 1.776}{b \cdot d_{eff}} \cdot m = 0.00442 \quad \text{As} \cdot 1.776 = \text{Armering over søyle og i avstand } 3d \text{ på hver side av søylen}$$

$$\rho_{ly} := \frac{503 \frac{mm^2}{m} \cdot 1.776}{b \cdot d_{eff}} \cdot m = 0.00442$$

$$\rho_l := (\rho_{lx} \cdot \rho_{ly})^{0.5} = 0.004 \quad 0.004 \leq 0.02 \quad \text{OK!}$$

$$C_{Rd.c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

$$V_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{N}{mm^2} = 0.597 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Dimensjonerende skjærkapasitet}$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \left(\frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.58 \frac{N}{mm^2}$$

$$V_{Rd.c} > v_{min} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{v_{Ed.midt}}{V_{Rd.c}} = 0.424$$

OK! Tilstrekkelig skjærkapasitet
Gjennomlokkingsarmering er ikke nødvendig

Skjærspenning ved søyleomkretsen u_0 :

$$u_0 := 2 (c_1 + c_2) = 600 \text{ mm}$$

Søyleomkrets innersøyle
Annerledes for kant- og
hjørnesøyle!

$$v_{Ed} := \frac{V_{Ed.midt}}{u_0 \cdot d_{eff}} = 1.152 \frac{N}{mm^2}$$

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \frac{N}{mm^2}} \right) = 0.516$$

Gjennomlokkingskapasitet (skjærtrykkkapasitet) etter EC2:

$$V_{Rd.max} := \min \left(0.4 \cdot v \cdot f_{cd}, \frac{(16 \cdot V_{Rd.c} \cdot u_1)}{\beta_{midt} \cdot u_0} \right) = 4.094 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{v_{Ed}}{V_{Rd.max}} = 0.281$$

OK! Tilstrekkelig kapasitet



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway