

Jan-Erik Haraldsen Lu  
Jul Kristian Notø Karlsen

## Miljøgevinst ved bruk av basaltfiber i landbasert oppdrettsmerd

Environmental benefit from the use of basalt fiber in land-based fish farming corral

Bacheloroppgave i Byggingsteknikk  
Veileder: Torodd Skjerve Nord  
Mai 2022



Jan-Erik Haraldsen Lu  
Jul Kristian Notø Karlsen

## **Miljøgevinst ved bruk av basaltfiber i landbasert oppdrettsmerd**

Environmental benefit from the use of basalt fiber in  
land-based fish farming corral

Bacheloroppgave i Byggteknikk  
Veileder: Torodd Skjerve Nord  
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



## INSTITUTT FOR HAVROMSOPERASJONER OG BYGGTEKNIKK

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET

<b>Tittel:</b> Miljøgevinst ved bruk av basaltfiber i landbasert oppdrettsmerd Environmental benefit from the use of basalt fiber in land-based fish farming corral		
<b>Kandidatnummer(e):</b> 10024/10047		
<b>Dato</b> 20.05.2022	<b>Emnekode</b> BYGA 2900	<b>Emne</b> Bacheloroppgave, bygg
<b>Studium</b> Byggteknikk	<b>Ant sider/vedlegg:</b> 59 + 44	
<b>Veiledere</b> Dr.Ing. Steinar Trygstad Torodd Skjerve Nord		
<b>Sammendrag:</b> Fiberarmering forbedrer betongen ved å gjøre den mer duktil og motvirke riss med bedret strekkfasthet. Fiberne kan samtidig bedre kloridinntregningen til betong som er en stor skadeårsak i Norges utsatte kystlinje. Derfor fremstår fiber, og spesielt basaltfiber som en kompetent armering ettersom basalt (i motsetning til stål) ikke korroderer. Fiberbetong i lastbærende konstruksjoner er imidlertid lite brukt som følge av manglende erfaring og retningslinjer. Hensikten med oppgaven er å bedre forskningsgrunlaget for fiberarmering og samtidig se på potensielle miljøbesparelser I denne bacheloroppgaven studerer gevinst av basaltfiber i en betongkonstruksjon. Valgt konstruksjon er en prosjektert landbasert oppdrettsmerd som blir dimensjonert med kombinert spenn- og fiberarmering. Utarbeidelsen av bacheloren er i samarbeid med Dr. Ing. Trygstad AS som har spesialisert seg innen betongbruk i marine næringer og har erfaring med basaltfiber. Studien vinkles mot materialbesparelse og ekvivalente CO <sub>2</sub> -reduksjon som følge av fiberarmeringen. Det er varierende resultat på testing av basaltfiber. Det ble derfor gjennomført et laboratorieforsøk av den aktuelle basaltfiberen, og resultatene fra forsøket er brukt videre som beregningsgrunnlag for dimensjoneringen. Beregningene er hovedsaklig etter gjeldende regelverk fra Eurocode 2 og NB38 sine retningslinjer. Resultatene fra laboratorieforsøket viste en økning i karakteristisk trykkfasthet på 14% som antas å komme fra fiberarmeringen. Videre ga forsøket etter NS-EN 14651 gode resultater sammenlignet med tilsvarende forsøk. Disse resultatene ble brukt for dimensjoneringen og gav en besparelse i betong og armeringsmengde tilsvarende 6513,3kg CO <sub>2</sub> . Resultatene er ikke som forventet for materialbesparelser. Det var antatt en større besparelse som følge av fiberens styrkebidrag til konstruksjonen. Fra resulterende reduksjonen i CO <sub>2</sub> kan det konkluderes med at fiberarmering hadde virkning, men for å belyse resterende gevinster bær det gjøres en omfattende og helhetlig dimensjonering inkludert spennarmeringssystem og rissviddeberegninger.		

# Forord

Denne bacheloroppgaven (20 studiepoeng) utgjør vårt avsluttende arbeid ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Den markerer avslutningen av et 3-årig (180 studiepoeng) Bachelor i byggtknikk. Oppgaven er utarbeidet av to studenter med fordypning i konstruksjon.

Bacheloroppgaven er skrevet i samarbeid med Dr. Ing. Steinar Trygstad AS. Gruppen ønsket å undersøke fordelene ved å bruke kombinasjon av basaltfiber- og spennarmering i en landbasert oppdrettsmerd. Det ble valgt å studere basaltfiberens innvirkning på materialforbruk og miljø. I gjennom prosessen har gruppen arbeidet selvstendig, med veiledere og som team. Det sistnevnte bar på utfordring, da vi igjennom oppgaven ble igjen to studenter, fra en gruppe opprinnelig på tre. Dette har avgrenset omfanget av oppgaven, men all lærdom tas med i videre arbeidsliv. Prosessen innebar kunnskapstilegnelse i fiber- og spennarmering, som var ny innsikt for vår oppgaveløsning. Det krevde god støtte fra vårt akademiske og bedriftsmessige nettverk.

## Acknowledgment

Vi ønsker med det å benytte anledningen til å takke våre veiledere ved NTNU Ålesund for god oppfølging igjennom bachelorløpet. Vi vil videre takke vår bedriftsveileder Steinar Trygstad for svært god faglig innsikt i et nyskapende felt innen betongteknologi. Vi setter stor pris på å kunne få disponere hans lokaler med skrivearbeidet av oppgaven. Vi vil også rette en stor takk til Tor Kristoffer Klethagen ved NTNU Gjøvik for god gjennomgang under laboratorieforsøket. Vi vil også takke Len Miller ved ReforceTech for viktig forsøksmateriell. Til sist en stor takk til Ola Engelsen, han jobber som fysiker ved PET-senteret Universitetssykehuset i Tromsø for gode tips og råd om forming av oppgaven.

Veiledningen deres har bidratt til relevant kunnskap innen dimensjonering, fiber- og spennarmering. Videre har de gjennom hele bachelorløpet vært en verdifull kilde til hjelp med å avgrense og oppbygning av oppgaven. Vi setter stor pris på deres engasjement igjennom hele løpet med bacheloroppgaven.

# Sammendrag

Fiberarmering forbedrer betongen ved å gjøre den mer duktil og motvirker riss med bedret strekkfasthet. Fiberne kan samtidig bedre betongens motstandsdyktighet mot kloridinntregning som er en stor skadeårsak i Norges utsatte kystlinje. Derfor fremstår fiber og spesielt basaltfiber som en kompetent armering, ettersom basalt ikke korroderer. Fiberbetong i lastbærende konstruksjoner er imidlertid lite brukt som følge av manglende erfaring, standarder og retningslinjer. Hensikten med denne oppgaven er å bedre forskningsgrunnlaget for fiberarmering og samtidig se på potensielle material og miljøbesparelser.

I denne bacheloroppgaven studeres gevinst av basaltfiber i en betongkonstruksjon. Valgt konstruksjon er en prosjektert landbasert oppdrettsmerd som blir dimensjonert med kombinert spenn- og fiberarmering. Utarbeidelsen av bacheloren er i samarbeid med Dr. Ing. Trygstad AS som har spesialisert seg innen betongbruk i marine næringer og har erfaring med basaltfiber. Studien vinkles mot materialbesparelse og ekvivalent CO<sub>2</sub>-reduksjon som følge av fiberarmeringen. Det er varierende resultat på testing av basaltfiber. Det ble derfor gjennomført et laboratorieforsøk av den aktuelle basaltfiberen, og resultatene fra forsøket er brukt videre som beregningsgrunnlag for dimensjoneringen. Beregningene er gjennomført etter gjeldende regelverk og retningslinjer gitt i Eurocode 2 og NB38.

Resultatene fra laboratorieforsøket viste en økning i karakteristisk trykkfasthet på 14% som antas å komme fra fiberarmeringen. Videre ga forsøket etter NS-EN 14651 gode resultater sammenlignet med tilsvarende forsøk. Disse resultatene ble brukt for dimensjoneringen og gav en besparelse i betong og armeringsmengde tilsvarende 6513, 3kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

Resultatene er ikke som forventet for materialbesparelser. Det var antatt en større besparelse som følge av fiberens styrkebidrag til konstruksjonen. Fra resulterende reduksjonen i CO<sub>2</sub> kan det konkluderes med at fiberarmering hadde virkning, men for å belyse resterende gevinster bør det gjøres en mer omfattende dimensjonering av hele konstruksjonen, inkludert flere laboratorieforsøk og rissviddeberegninger.

# Abstract

Fiber reinforcement improves the concrete by making it more ductile and counteracting cracks by increasing tensile strength. Fibers can also prevent chloride penetration into concrete, which is a major cause of concrete deterioration in Norway's exposed coastal construction. Hence fiber, and especially basaltfiber, appears to be a capable candidate for reinforcement as basalt does not corrode. However, fiber reinforced concrete in load-bearing structures is rarely used due to lack of practical experience, national standards and guidelines. The purpose of this bachelor's thesis is to improve the research on fiber reinforcement and at the same time look at potential savings in material and resulting environmental savings.

In this bachelor's thesis, the main topic is to study the environmental benefits of basalt fiber in a concrete structure. The chosen structure is a planned land-based fish corral that is dimensioned with combined prestressed and fiber reinforcement. The elaboration of the bachelor's is done in collaboration with Dr. Ing. Trygstad AS. Trygstad specializes in concrete for industries in marine environment and has extensive experience on the subject of basalt fiber reinforcement. The study is written with emphasis on the material savings and correspondent CO<sub>2</sub> reduction achievable by utilizing fiber reinforcement in construction. Testing of basalt fibers has produced varying results. A laboratory test of the relevant basalt fiber was therefore conducted, and the results formed the basis of calculations associated with dimensioning. The calculations were done in accordance with current regulations and guidelines given in Eurocode 2 and NB38.

Results from the laboratory testing showed an increase in characteristic compressive strength of 14 % which is assumed to be a result of the fiber reinforcement. Furthermore, the experiment according to NS-EN 14651 gave good results compared to previous experiments. These results were used for calculating savings in materials and gave a resulting saving of concrete and reinforcement of 6513.3kg CO<sub>2</sub>-equivalents.

The results were not as expected for savings in materials. A larger saving was estimated as a result of the fibers contribution to the strength of the structure. Even so, from the resulting reduction in CO<sub>2</sub>, it can be concluded that fiber reinforcement had a positive effect. In order to shed light on the remaining benefits and drawbacks and their scope, a more comprehensive dimensioning of the entire structure should be made, including multiple laboratory tests and crack width calculations.



# Innhold

<b>Figurer</b>	<b>vii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>6</b>
2.1 Armert betong . . . . .	6
2.1.1 Risskontroll . . . . .	7
2.1.2 Kloridbestandighet . . . . .	7
2.2 Spennarmering . . . . .	8
2.2.1 Etteroppspenning . . . . .	9
2.2.2 Spennstål . . . . .	9
2.2.3 Injisert og uninjisert etteroppspenning . . . . .	10
2.2.4 Tap av spennkraft . . . . .	11
2.3 Fiberarmering . . . . .	12
2.3.1 Historisk . . . . .	12
2.3.2 Interaksjon med betong . . . . .	12
2.3.3 Økende bruksområder . . . . .	13
2.3.4 Basaltfiber . . . . .	14
2.4 Utslippsanalyse(CO <sub>2</sub> ) . . . . .	16
<b>3 Regelverk &amp; Metode</b>	<b>17</b>
3.1 Fiberarmering . . . . .	18
3.1.1 Bestemmelse av restbøyestrekfasthet . . . . .	18
3.2 Spennarmering . . . . .	21
3.2.1 Spennkraft . . . . .	21
3.2.2 Reduksjon av spennkraft . . . . .	21
3.3 Elastisitetsteori . . . . .	22
3.3.1 Elastisitetsteori for skall . . . . .	22
3.3.2 Momentkapasitet iht. EC2. . . . .	25
3.3.3 Momentkapasitet iht. NB 38. . . . .	25
3.3.4 Skjærkraftskapasitet . . . . .	26
3.4 Minimumsarmering . . . . .	27
3.4.1 Minimumsarmering iht. EC2 . . . . .	27
3.4.2 Minimumsarmering iht NB38 . . . . .	27
<b>4 Forutsetninger</b>	<b>29</b>
4.1 Materialvalg . . . . .	29

---

4.1.1	Betong . . . . .	30
4.1.2	Spennarmering . . . . .	31
4.1.3	Slakkarmering . . . . .	32
4.1.4	Fiberarmering . . . . .	32
4.2	Geometrisk utforming . . . . .	33
4.3	Laster . . . . .	35
4.4	Spennarmering . . . . .	35
4.4.1	Fri avstand for spennarmering . . . . .	35
4.4.2	Fri avstand for slakkarmering . . . . .	36
4.5	Idealisering . . . . .	37
4.5.1	Idealisert modell . . . . .	37
4.6	Utslippsanalyse . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>42</b>
5.1	Labresultater . . . . .	43
5.1.1	Trykkfasthet . . . . .	43
5.1.2	Restbøyestrekfasthet . . . . .	44
5.2	Kapasitetsberegninger . . . . .	45
5.2.1	Momentkapasitet . . . . .	45
5.2.2	Skjærkapasitet . . . . .	45
5.3	Materialer . . . . .	46
5.3.1	Armering . . . . .	46
5.3.2	Totalt materialbruk . . . . .	48
5.4	Komparativ analyse . . . . .	48
5.4.1	Referansemerd . . . . .	48
5.4.2	Fibermerd . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Drøfting</b>	<b>49</b>
6.1	Del I: Drøfting av resultat . . . . .	49
6.1.1	Labresultater . . . . .	49
6.1.2	Beregninger . . . . .	49
6.1.3	Sammenligning av minimumsarmering . . . . .	50
6.1.4	Komparativ analyse . . . . .	51
6.1.5	Materialbruk . . . . .	51
6.2	Del II: Drøfting av prosjekt . . . . .	52
6.3	Usikkerhet . . . . .	53
6.3.1	Regelverk og retningslinjer . . . . .	53
6.3.2	Utførelse . . . . .	53
6.3.3	Fibervirkningsgrad . . . . .	53
6.3.4	Utslippsanalyse . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Forslag til videre arbeid</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Laboratorierapport</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>MathCAD beregninger</b>	<b>70</b>

---

---

<b>C</b>	<b>Utslippsdata og beregning</b>	<b>91</b>
<b>D</b>	<b>Laboratorieberegninger</b>	<b>95</b>

# Figurer

1.2	Oversikt over prosjektert oppdrettsanlegg. Kilde: Artec Aqua . . . . .	4
2.1	Spennarmert bjelke KildeNawy 2010 . . . . .	8
2.2	Tønne oppbygning . . . . .	9
2.3	Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningkurver for spennstål . . . . .	10
2.4	Rissdannelse for uarmert (a) og fiberarmert (b) . . . . .	12
2.5	Fiberarmering brukt i bærende konstruksjoner . . . . .	13
2.6	HMS tiltak . . . . .	15
3.1	Norsk 3-punkt metode etter NS-EN 14651 for måling av rissvidde(CMOD). mål i mm. . . . .	18
3.2	Restfasthetsklasser fra NB38 tabell 2.2 . . . . .	19
3.3	Krefter i en sylindrisk tank. Kilde: Nawy 2010 . . . . .	23
3.5	Spennings- tøyningsdiagram for rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning . . . . .	26
4.1	Geometrisk utforming, mål i mm . . . . .	33
4.2	Detaljtegning av overgang mellom bunnplate og vegg . . . . .	34
4.3	Spennarmeringsystem . . . . .	35
4.4	Fri avstand mellom kabelkanaler . . . . .	36
4.5	Armeringsplassering og eksponeringsklasse . . . . .	36
4.6	Trykkrefter fordelt på lameller. . . . .	37
4.7	Utsnitt av lamell . . . . .	38
4.8	Armeringsplassering . . . . .	39
4.9	Flytdiagram over LCA-analysen sine fire første faser . . . . .	40

# Tabeller

4.1	Materialelegenskaper betong . . . . .	30
4.2	Materialelegenskaper spennarmering . . . . .	31
4.3	Materialelegenskaper slakkarmering, B500NC . . . . .	32
4.4	Basaltfiber RFT . . . . .	32
4.5	Oversikt CO <sub>2</sub> -ekvivalent for type materiale . . . . .	41
5.1	Testing av terninger i trykkfasthet . . . . .	43
5.2	Restbøystrekkfasthet ved CMOD <sub>j</sub> . . . . .	44
5.3	Dimensjonerende verdier . . . . .	44
5.4	Momentkapasitet . . . . .	45
5.5	Skjærkapasitet . . . . .	45
5.6	Armeringsmengde pr meter omkrets . . . . .	47
5.7	Differanse i armeringsmengde etter beregningsmetode . . . . .	47
5.8	Total materialbruk med og uten fiberarmering . . . . .	47
5.9	Referansemerd . . . . .	48
5.10	Fibermerd . . . . .	48

# Notasjon

I dette kapitlet beskrives alle notasjoner som er relevant for lesing av oppgaven

## Definisjoner

I oppgaven gjelder følgende definisjoner:

- **marint miljø** - Område påkjent av nedbrytningseffekter hovedsaklig fra klorid, enten luftbåren eller i direkte kontakt med saltvann
- **armert betong** - Betong armert med stangarmering
- **uarmert betong** - Betong uten noen form for armering
- **fiberarmert betong** - Betong armert med stangarmering og fiber
- **riss** - Små sprekker i betongen
- **førroppsant** - Førroppsant spennarmering
- **etterroppsant** - Etterroppsant spennarmering
- **fasthet** - Materialets evne til å motstå mekanisk spenning uten brud eller varig deformasjon.
- **bruddfasthet** - Maksimal spenning et materiale tåler før brudd inntreffer.
- **flytegrense** - En teknisk grenseverdi for metaller (og legeringer) sin evne til å tåle belastning (trykk eller spenn) før plastisk deformasjon inntreffer.
- **hydrotisering** - Kjemisk reaksjon mellom sement og vann som fører til bindinger som effektivt holder tilslaget i betong sammen
- **støping** - Prosessen der fersk flytende betongen fylles inn i forskalingen på byggeplass. Ofte i kombinasjon med vibrering som innebærer at en vibrerer ut luftbobler som oppstår
- **herding** - Etter støping skal betongen hydrotisere til ønsket styrke. i de påfølgende 28 dagene sier man betongen herder.
- **trykkfasthet** - Materialets sin evne til å motstå trykkbelastninger
- **strekkfasthet** - Materialets evne til å motstå strekkpåkjenninger
- **reststrekkfasthet** - strekkfasthet i fiberarmert betong etter opprissing.

---

## Forkortelser

Forkortelser av standarder og publikasjoner.

---

### *Standarder*

<b>Eurocode 2</b>	<b>EC2</b>
Prosjektering av betongkonstruksjoner	EC2
Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 3: Siloer og beholdere	EC2-3

### *Publikasjoner*

<b>Norsk Betongforening</b>	<b>NB</b>
Bestandighet av betongkonstruksjoner i marint miljø	NB35
Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner	NB38
<b>Concrete Innovation Centre</b>	<b>COIN</b>
Forslag til retningslinjer for dimensjoner, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner	COIN29
Final report	COIN15

---

# Kapittel 1

## Introduksjon



---

## Bakgrunn

Sjømatnæringen er i sterk vekst og den forventes å bli en stadig viktigere verdiskapning for Norges fremtid. Norge har samtidig en viktig rolle som produsent av bærekraftig mat globalt. Det har gitt vind i seilene for landbasert fiskeoppdrett. Landbasert oppdrett gir mulighet til resirkulering av vann og avfall i produksjonen. Slike alternative anlegg er også attraktivt for å begrense skadevirkninger på kyst- og havområder. I fremtiden kan veksten til oppdrettsnæringen føre til betydelig etablering av slike oppdrettsanlegg. De Forente Nasjoners (FN's) bærekraftsmål bør være førende for den framtidige veksten av slike oppdrettsanlegg. (fiskeridepartementet Hentet 07.02.2022);M. B. snl Hentet 11.02.2022)



(a) 12.2



(b) 12.4



(c) 14.4



(d) 14.5

FN's bærekraftsdelmål. Kilde: FN-sambandet

- (a) Oppnå bærekraftig forvaltning og effektiv bruk av naturressurser
- (b) Oppnå en mer miljøvennlig forvaltning av kjemikalier og alle former for avfall gjennom hele livssyklusen
- (c) Forhindre og i betydelig grad redusere alle former for havforurensning
- (d) Bevare minst 10 prosent av kyst- og havområdene på grunnlag av den beste vitenskapelige kunnskapen

En utfordring med landbasert oppdrettsanlegg er at anleggskonstruksjonen må takle det maritime miljøet. Tradisjonelt motvirkes det ytre miljøet ved å øke overdekningen. Økning i overdekning innebærer ofte mer betong som igjen gir høyere CO<sub>2</sub>-utslipp. For oppdrettsmerder stilles det også krav til vanntettheten i konstruksjonsløsningen. For å håndtere kravene og samtidig gi en slank konstruksjon brukes spennarmering. En armeringstype som er mindre utprøvd er fiberarmering. Av ulike fibertyper har basaltfiber vist potensialet til å innfri kravet om vanntetthet samtidig som den kan opprettholde en slankere konstruksjon. Basaltfiber er et korrosjonsmotstandig materiale som har god strekkstyrke. Samtidig viser forskning at fiberarmert betong gir bedret beskyttelse mot armeringskorrosjon fordi den bidrar til en tettere betong (Mohaghegh 2016; Jamshaid og Mishra 2016).

Imidlertid er det manglende regelverk og erfaringer med fiberarmering generelt. Det har ført til Norsk betongforening publikasjon 38 (NB38) ble utarbeidet og som gir retningslinjer for bruk av fiberarmering i bærende konstruksjoner. Veilederen trekker sammen flere internasjonale regelverk for å sammenfatte et nasjonalt dokument for praktisk bruk og dimensjonering av fiber i bærende konstruksjoner. (Kanstad mfl. 2020) Veiledningen i NB38 har som formål å åpne for bruken av fiber og gi grunnlag for videreutvikling. Studien skal se nærmere på en nyskapende måte å bygge en oppdrettsmerd med kombinert spenn- og fiberarmering for en sterkere konstruksjon. Det analyseres hvorvidt fiberarmering gir grunnlag for materialbesparelser og resulterende miljøgevinst, i form av redusert CO<sub>2</sub>-utslipp.

---

## Problemstilling & målsetning

Globalt har verden blitt bevisstgjort hvor mye klimaet endres av menneskeskapte klimagassutslipp. Det har gitt grunnlag for en internasjonal klimapolitikk, blant annet gjennom Parisavtalen og FN's bærekraftsmål. Begge har som hensikt å etablere førende målsetninger for å redusere globale klimagassutslipp, deriblant CO<sub>2</sub>-utslipp. Reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp har regjeringen i Norge satt som mål å redusere med 50-55% innen år 2030. Av CO<sub>2</sub>-utslipp utgjør betongindustrien omtrentlig 5-7%. (miljødepartementet Hentet 08.02.2022) Betongteknologi er derfor i stor videreutvikling fremskyndet av disse klimatiltakene.

Lokalt i Norge jobber Concrete Innovation Centre (COIN) med optimalisering av betong. Forskning fra COIN har vist gode resultater ved anvendelse av fiberarmering for bedret strekkapasitet i betongen. Videre viste forsøk fra (Mohaghegh 2016) at basaltfiberarmering bidro til å motvirke kloridintrengelse, og at det dermed hadde positiv effekt for konstruksjoner i maritim tilknytning. Men en vedvarende utfordring er at regelverk for fiberarmering fortsatt er manglende.

(Terje Kanstad, Juvik mfl. 2011; Å. L. Døssland 2008)

Basaltfiber har imidlertid i forsøk vist svært varierende resultat. Det fremkommer i funn fra tidligere forsøk som vanskeliggjør konkrete beregningsverdier. En delaktig problemstilling er da kvantitativ forsøksdata og erfaringer knyttet til basaltfiber i praksis. I tillegg er prøvingsmetoden fra Norsk standard forbeholdt metalliske fibere. Forbeholdet begrenser mulighetene for å teste ut og anvende alternative fibertyper. Oppgaven utarbeides derfor gjennom delmål som leder frem til studiens hovedmål presentert i tabellen under:

### Problemstillinger og korresponderende mål

Problemstilling	Mål
	<i>Delmål</i>
Litterærstudie i relativt ny konstruksjonsteknikk	<ul style="list-style-type: none"><li>• Forstå fiberarmering sine egenskaper</li><li>• Sammenfatte dagens gjeldende retningslinjer for fiberarmering i bærende konstruksjon.</li><li>• Innhente regelverk og teori til ukonvensjonell konstruksjonsmetode</li></ul>
Produsere konkrete verdier for materialegenskapene til basaltfiber	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gjennomføre prøvingsmetoden etter EN 14651 med siste og beste basaltfiber.</li></ul>
	<i>Hovedmål</i>
Gevinster fra basaltfiber	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fremskaffe material- og miljøbesparelser gjennom en komparativ analyse av prosjektert opp-drettsmerd.</li></ul>

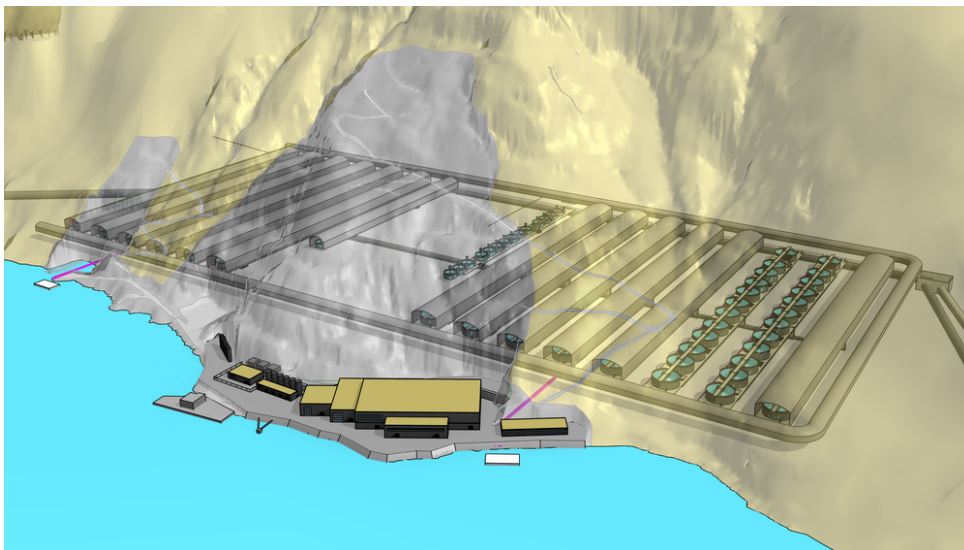
---

## Avgrensninger

Oppgaven studerer en prosjektert oppdrettsmerde fortsatt i konseptutvikling. Denne er tiltenkt plasstøpt og etteroppspent. Dimensjoneringsgrunnlaget tar utgangspunkt i betongresepter fra laboratorieforsøket (vedlegg A). Det blir dimensjonert to versjoner: Referansemerden og fibermerden til deres korresponderende betongklasse nærmere beskrevet i 4.1.1.

En helhetlig dimensjonering av en slik oppdrettsmerde omfatter svært mange faktorer. For å begrense omfanget blir studien kun rettet mot dimensjonering av veggen i konstruksjonen. I tillegg er det valgt fritt glidende underlag illustrert i figur 4.2 og utfyllende beskrevet i 3.3.1. Innledningsvis var ambisjonen å prosjektere en fullstendig oppdrettsmerde, med vegger, konsoller og bunnplate. Grunnet tidsbegrensning er konsoll og bunnplaten utelukket fra beregninger. Men forslag på løsning av konsollplassering er vist i figur 4.1. Rissberegninger er også utelukket fra oppgaven ettersom det blir for omfattende.

For å få dimensjoneringsgrunnlag i et marint utsatt miljø er område til prosjektert oppdrettsanlegg (avbildet i figur 1.2) i Geirangerfjorden valgt. Det innebærer at konstruksjonen vil stå inne i en nedlagt gruve direkte tilknyttet sjø. Konstruksjonen blir derfor avlukket fra utvendig værforhold og stående direkte på berg. Det utelukker flere dimensjonerende laster som snø, vind, temperaturdifferanser og ugunstige grunnforhold.



Figur 1.2: Oversikt over prosjektert oppdrettsanlegg. Kilde: Artec Aqua

Generell bruk av fiberarmering i Norge er lite utbredt. Det som er gjort er hovedsaklig i forskningsmiljøet, når det gjelder bærende konstruksjoner. Mangelen på offisielle standarder gir utfordringer for oppgaveløsningen. På bakgrunn av det gjøres beregninger for fiber nesten utelukkende med NB38 sine dimensjoneringsprinsipper.

Livsløpsvurderingen (LCA) ligger til grunn for å generere resultater fra materialbesparelsen oppnådd. Men en fullstendig LCA blir for omfattende for denne oppgaven. Derfor blir kun CO<sub>2</sub>-

---

utslippene til materiale i konstruksjonen vurdert. I tillegg baseres det kun på utslippene i de fire første LCA-fasene illustrert i figur 4.9

## Rapportens struktur

Oppgaven gjør innledningsvis rede for teori innen betong, spennarmering og fiberarmering. Teorien beskriver betong utsatt for maritim miljø, spesifikt risskontroll og påfølgende klorid-påkjønning. I tillegg presenteres de ulike metodene som begrenser riss, og samtidig motvirker kloridinntrengning.

Videre redegjøres gjeldende regelverk og beregningsmetoder for studiens metode. Deretter presenteres forutsetningene i oppgaven. Det fremlegges hvilke(n); materialvalg, geometri og laster som blir gjeldende for konstruksjonen. Deretter vises fremgangsmåten for beregningene utført. Fra dimensjonert konstruksjon vil vi trekke ut materialbesparelse og tilhørende miljøgevinst som kommer av fiberarmeringen.

Alle illustrasjoner og tabeller som ikke er sitert eller på annen måte kildehenvist til, er egenproduserte.

# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 Armert betong

Hovedkomponentene i betong er sement, fine tilslag (sand ol.), grove tilslag (knust stein ol.) og vann. Når sementen blandes med vann, skjer en kjemisk prosess kalt hydratisering. Resultatet er en herdet og solid kompositt kalt betong. Betong er formbar under støping som gir den et bredt spekter av mulige utforminger og dimensjoner. De mange bruksområdene av betong er grunnet flere faktorer, men hovedsaklig dens gode trykkfasthet. Samtidig består betong av komponenter som finnes i mangfold, eller er billig å produsere. Betong er derfor dominerende i bærende konstruksjoner.

*(Betong : regelverk, teknologi og utførelse 2015)*

En ulempe som begrenser bruken er betongens dårlige strekkfasthet. I 1850 løste franskmannen Joseph Monier problemet ved å finne opp armert betong. Armeringen er som regel stenger eller kabler i stål. De virker sammen med betongen ved overføring av opptredende krefter. Stålet tilfører betongkonstruksjonen strekkstyrke og duktilitet. Med duktilitet menes betongens evne til å deformeres uten at brudd oppstår. Mest vanlig er armeringsstål med “kammer” på overflaten, derav ordet “kamstål”. De tverrgående kammene på armeringsstengene gir en mekanisk forankring mellom armeringen og betongen. Forankringen er avgjørende for å oppnå god heft. Heft mellom materialene er grunnlaget for overføringen av krefter.

*(Betong : regelverk, teknologi og utførelse 2015)*

I tillegg har armeringsstål mekaniske egenskaper, utenom strekktøyning beskrevet i 2.1.1, nær perfekt tilpasset samvirke med betongmaterialet. Samtidig fungerer betongen som beskyttelse av armeringsstålet. Men for at stålet ikke skal være utsatt, stilles det visse krav til overdekningen fra armering til betongoverflaten. I utsatte konstruksjoner og aggressive miljøer må overdekningen økes betraktelig. Kloridinntrengelse er den mest fremtredende skadeårsaken for konstruksjoner i kystområder. Skadeårsaken utledes videre i 2.1.2, der det også utdypes om kravene betongkonstruksjoner i slike miljø må innfri.

*(J. V. T. snl Hentet 16.04.2022)*

---

### 2.1.1 Risskontroll

Armering tar som nevnt opp strekkreftene når betongen utsettes for bøyning. Siden betongens strekketøyning ved riss er mye lavere en armeringsens flytetøyning, utvikles vanligvis riss før nok krefter er overtatt av armeringsjernet. Det er tre måter å begrense rissviddene på;

- Økt mengde slakkarmering
- Spennarmering
- Fiberarmering

Økt slakkarmering innebærer å øke generell mengde armering for å hindre riss i å oppstå. Spennarmering utledes grundig i 2.2, men i korte trekk settes betongen i trykk ved oppspenning av armeringen. Trykket forhindrer dannelse av riss ved å begrense strekksonen. Fiberarmering fordeles i betongblandingen og bidrar til å ta opp lokale strekkspenninger. (Bentur og Mindess 2006) Denne prosessen utdypes nærmere i 2.3.2. God risskontroll fører til en tettere betong som gir grunnlag for bedre beskyttelse. (Mohaghegh 2016; *Eurokode 2-1-1* 2021)

### 2.1.2 Kloridbestandighet

Det er flere årsaker til nedbrytning av betongkonstruksjoner som utsettes for marin påkjenning. Den dominerende skadeårsaken er kloridinntrengning i betongen som forårsaker armeringskorrosjon. Andre nedbrytningsårsaker er frostspreng, karbonatisering, alkalireaksjoner og inntrenging av magnesium og andre sulfater. De resterende nedbrytningsprosessene er ivaretatt med moderne standarder eller sees på som relativt små, sammenlignet med kloridpåkjenning. (Mohaghegh 2016; Betongforening 2011)

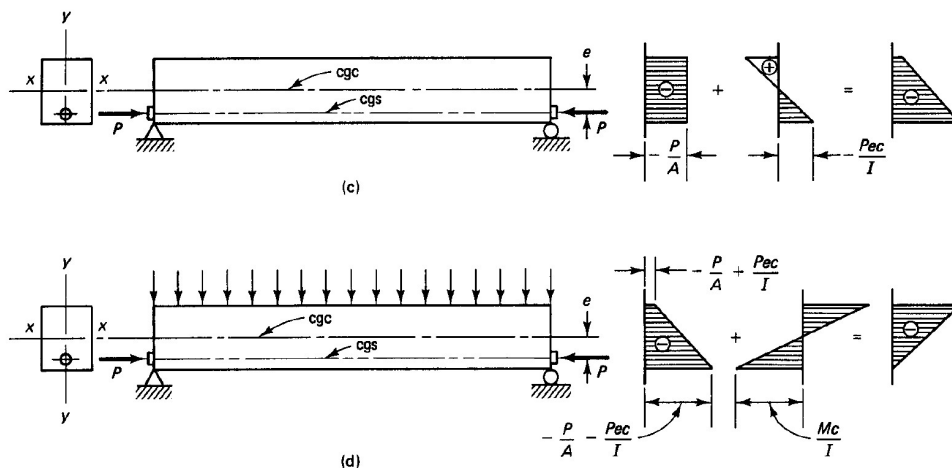
For å danne grunnlag for betongens holdbarhet mot slike miljøpåkjenninger blir den klassifisert etter bestandighet. For å fastslå dens bestandighet, stilles det krav til brukbarhet, styrke og stabilitet igjennom dens dimensjonerende brukstid. Det innebærer at det ikke skal oppstå vesentlig reduksjon av bruksverdi eller omfattende, uforutsett vedlikehold i dens brukstid. Herunder skal det hensyntas direkte eller indirekte virkninger fra miljøpåvirkning. (*Eurokode 2-1-1* 2021)

## 2.2 Spennarmering

Spennarmering er utført av kaldtrukket trådstål mer utdypende forklart i 2.2.2. Til forskjell fra slakkarmering som er varmvalset stål, gjør kaldtrekkingen at stålet får betraktelig høyere fasthet. (J. V. T. snl Hentet 16.04.2022)

Når en konstruksjonsdel i betong blir påført last, vil den øvre delen av tverrsnittet utsettes for trykk og nedre del utsatt for strekk. Over tid vil den øvre trykkdelen fortsette å trykkes sammen utover den momentane påkjenningen fra påført last. Denne tilleggsdeformasjonen kalles krep. Ved stor grad av krep vil det medføre større rissdannelse. (Nawy 2010)

Spennarmert betong vil motvirke denne vil si at armeringsjernet blir påført strekkrefter før eller etter betongstøping. Etter herding overføres trykkreftene fra armeringen til betongen. Trykkapasiteten til betongen utnyttes ved påført trykk som kompenserer for påførte laster, og resulterende strekkrefter. Figur 2.1 illustrerer konseptet på en frittstående opplagt bjelke. Den påføres last i strekksone fra oppspenning (c). Egenvekten til bjelken legges til (d). Resultatet blir at hele tverrsnittet fortsatt står i trykk, selv med egenvekt. (Sørensen 2017; snl Hentet 16.04.2022)



Figur 2.1: Spennarmert bjelke KildeNawy 2010

Spennarmeringen kan motvirke helt eller delvis normalspenningene som oppstår ved påføring av last. Dette reduserer eller eliminerer krep og dermed rissdannelse. Ved påføring av spennkraft øker også bøye, strekk og torsjonskapasiteten i tverrsnittet. Tverrsnittene har da muligheten til å oppføre seg elastisk og nesten hele trykkapasiteten til betongen kan anvendes gjennom hele tykkelsen når all last virker på konstruksjonen. Et vanlig kriterium for valg av spennkraft er at konstruksjonsdelen skal forbli uopprisset.

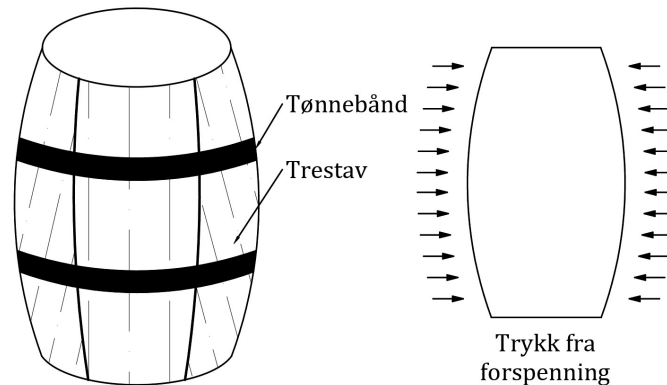
Typen forspenning og den tilhørende kraften, bestemmes på basis av konstruksjonstype, spenn og ønsket slankhet. Siden spennkraften er påført langsgående eller parallell til stavaksen, er forspenningsprinsippet best kjent som lineær forspenning.

(Sørensen 2017; Nawy 2010)

---

## Sirkulær forspenning

Sirkulær forspenning følger i hovedsak de samme prinsippene som lineær forspenning. Ved sirkulær forspenning legges kabler i sirkler rundt konstruksjonen slik at man oppnår en uniform radiell trykkspenning slik at det påførte indre trykket i konstruksjonen blir nøytralisert. Differansen mellom kreftene fører til ønsket spenning i betongen. Prinsippet blir det samme som for en tønne vist i figur 2.2 (Nawy 2010; Spenneteknikk 2011)



Figur 2.2: Tønne oppbygning

### 2.2.1 Etteroppspenning

Generelt vil hovedfordelene med etteroppspenning være slankere konstruksjoner, økt spenn, vanntetthet og redusert nedbøyning. Dette er fordi spennarmeringen virker positivt på nedbøyning i bruksgrensetilstanden ved å motvirke deformasjon fra ytre laster.

Trykket som oppstår i betongen som følge av oppspenning, begrenser opprissing og rissvidder. Det gir positiv innvirkning på tetthet, bøyestivhet og bestandighet. Trykkspenningene fra spennarmeringen vil også ha en gunstig effekt på skjærkapasiteten, som øker avhengig av trykkspenningene i betongen. (Arntsen og A. V. Olsen 2021)

Etteroppspenning benyttes derfor særlig i større plasstøpe konstruksjoner, bl.a. i broer og store rammekonstruksjoner med store spennvidder. Etteroppspenning benyttes også siloer og andre sylindriske beholdere, da disse ofte krever høy tetthet. (Nawy 2010)

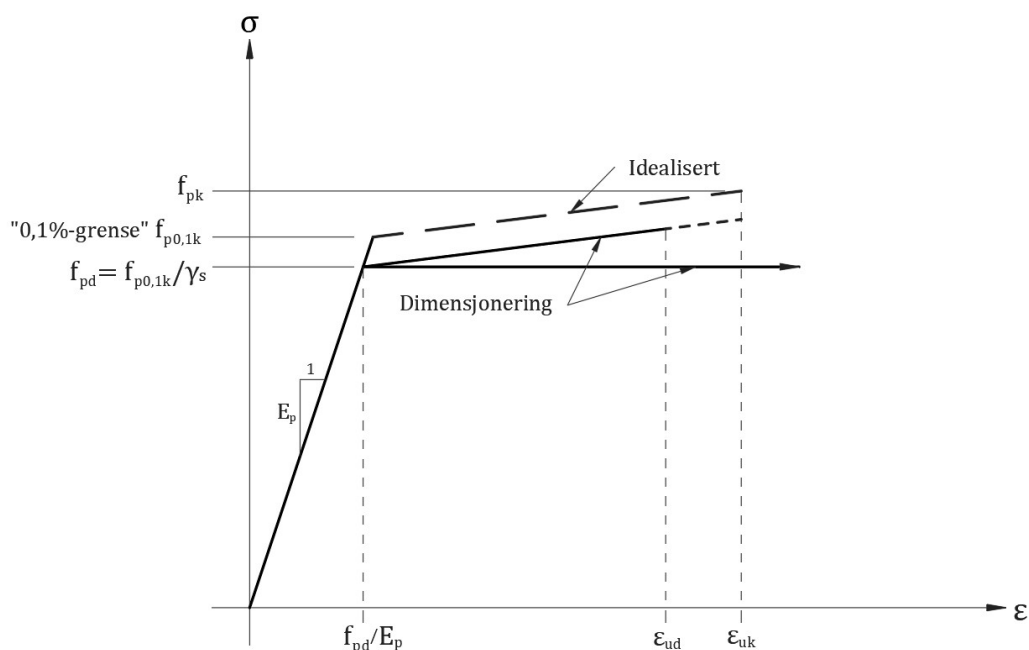
### 2.2.2 Spennstål

For å oppnå full forspenning av konstruksjonen, altså minimere strekkspenninger i bruksgrensetilstanden, er det nødvendig å benytte stål med høy fasthet. Dette er for å redusere spennetapet forårsaket av langtidseffekter som kryp og svinn i betongen, samt relaksjon i spennstålet.

Den karakteristiske fastheten defineres for spennstål som spenningen stålet har fått ved 0,1% inelastisk tøyning, og er definert som "0,1% - grensen"  $f_{p0,1k}$ . Figur 2.3 viser idealisert spennings-tøyningskurve for spennstål, og er bakgrunn for dimensjonering i bruddgrensetilstanden.

(Sørensen 2017)





Figur 2.3: Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningkurver for spennstål

Spennstålet blir ofte fremstilt i form av tråder med diameter 4-5 mm med karakteristisk fasthet mellom  $1500 - 1800 \text{ N/mm}^2$  og elastisitetsmodul på 195 MPa, dette er tre ganger høyere fasthet enn tradisjonell slakkarmering. Spenntrådene blir spunnet sammen til spenntau, som består av syv spenntråder.

### 2.2.3 Injisert og uninjisert etteroppspenning

Generelt vil man etter ferdig oppspenning av en konstruksjon injisere utsparringsrørene med en sementbasert injiseringsmørtel. Dette fører til heftforbindelse mellom spennarmeringen og betongen. Heftforbindelsen gjør videre at tøyningene blir kompatible, slik at tøyningssendringene i spennarmeringen og betongen i samme nivå i tverrsnittet vil være like. Konstruksjonen vil dermed oppføre seg på samme måte som en før oppspenning konstruksjon.

Etteroppspente konstruksjoner utføres også uten heftforbindelse, altså uten injiseringsmørtel i utsparringsrørene. Spenntauets er isteden omgitt av et plastrør fylt med fettmasse. Kombinasjonen av plastrør og fett gjør at friksjonstapet reduseres til et minimum, samt at fettmassene forhindrer korrosjon.

Etteroppspente sylindriske skallkonstruksjoner bruker vanligvis uninjiserede spenntau. Grunnen til at injisert kabler i skallkonstruksjoner sjeldent praktiseres i Norge, er dyr arbeidskraft og enklere utførelse (Trygstad, samtale). For oppgaven er det derfor valgt uninjisert etteroppspenning. (Spenneteknikk 2011)

---

## 2.2.4 Tap av spennkraft

Den initiale spennkraften påført betongen vil av forskjellige årsaker reduseres progressivt over en periode på rundt 5 år. Nawy 2010 På grunn av dette er det viktig å ta høyde for disse faktorene for å ha en viss oversikt over forspenningskraft i de forskjellige stadiene i en konstruksjons levetid. Tap av spennkraft tas høyde for i beregning av spennkraft gjort rede for i 3.2.2.

Tap av spennkraft ved etteroppspenning kan hovedsakelig deles inn i to grupper med tilhørende punkter:

- Umiddelbart elastisk tap under fabrikasjon eller byggeprosess.
  - Tap som skyldes umiddelbar deformasjon i betongen.
  - Tap på grunn av friksjon.
  - Tap ved forankringer.
- Tidsavhengige tap.
  - Tøyningsreduksjon forårsaket av deformasjon av betongen som skyldes kryp og svinn under permanente laster.
  - Spenningsreduksjon i stål på grunn av relaksjon.

---

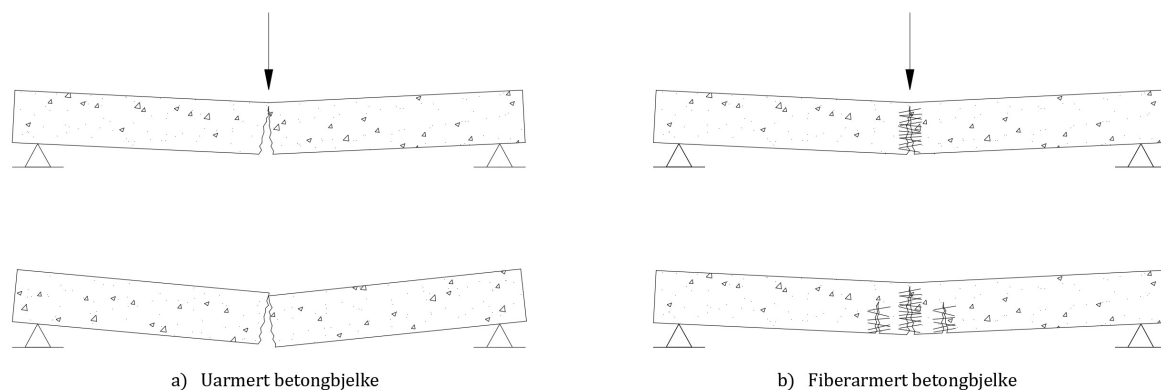
## 2.3 Fiberarmering

### 2.3.1 Historisk

Bruk av fibertilsetning som byggmateriale kan spores tilbake omkring tre og ett halvt tusen år i tid. Det ble da benyttet strå som armering i murhøyder, i det som blir dagens Baghdad. Fra 1898 utviklet fiberarmering seg til en lignende kompositt med kombinasjon av sement og asbestfiber. Blant annet grunnet helseskader fra asbestfibrene ble søkelyset satt på alternative fibertyper. Herfra begynte en omfattende utprøving av ulike fibertyper. (Bentur og Mindess 2006) Idag brukes som oftest stålfiber. Men stålet korroderer i motsetning til basalt. For denne oppgaven prosjekteres det med basaltfiber. Mer utdypende om dens fordeler kommer i 2.3.4.

### 2.3.2 Interaksjon med betong

Som nevnt i 2.1 har betong liten strekkfasthet. Som konvensjonell armering vil tilførsel av fiber øke dens strekkstyrke. Fiberarmeringen gjør betongen mer duktil, som vil si at betongen får en seigere og mindre sprø oppførsel når den utsettes for bøyning. Fibrene sin styrke aktiveres der betongen slår sprekker. Fibrene holder sammen sprekkene med heft til betongen som avbildet i figur 2.4. Fibrene fungerer som en bro over rissområdet og reduserer størrelsen på rissbredden. De minsker da utviklingsløpet fra mikro- til makroriss.



Figur 2.4: Rissdannelse for uarmert (a) og fiberarmert (b)

Så fiberne bidrar til økt strekkkapasitet før og under rissdannelse. Det gir betongen økt strekkfasthet og bedret bøyefasthet. Med bøyefasthet menes at fiberne øker strekkkapasitet når den overtar for betongens neglisjerbare strekkstyrke.

Fiber bidrar også til økning i momentkapasitet og skjærkapasitet (Å. L. Døssland 2008). Spesielt viktig er det at fiberne kan orienteres i hvilken som helst retning i planet. Til forskjell fra armeringsjern som bidrar i én retning, kan fiberne forsterke i hvilken som helst retning (Béton 2016). Dersom fiberne da orienteres parallelt med retningen kraften påføres vil virkningen være liten til neglisjerbar. (Bentur og Mindess 2006)

---

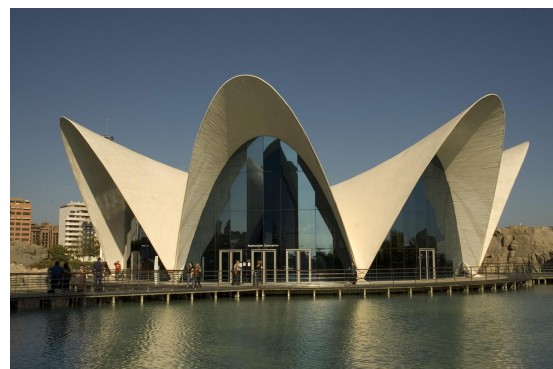
### 2.3.3 Økende bruksområder

Bruken av fiber har økt, men fortsatt innenfor et mindre bruksområde. De vanligste er gulv på grunn, sprøytebetong og prefabrikkerte elementer. Fiberarmering er fortsatt lite brukt i bærende konstruksjoner. En hovedårsak er at de fleste regelverkene dimensjonerer etter oftest etter maksimale laster. Som konsekvens utelukkes mye av fibrenes innvirkning siden den inntreffer før maksimal last. Bentur og Mindess 2006 Det betyr at for å virkelig utnytte fiber i konstruksjoner, bør en større endring i forskrifter og retningslinjer til. Det er forventet å komme et EC2 tillegg som tar for seg fiberarmering (Trygstad, muntlig formidlet).

Nye publikasjoner fra Norsk betongforening (Kanstad mfl. 2020) og COIN (Terje Kanstad, Juvik mfl. 2011) har bedret retningslinjer for bruk av fiberarmering. Som følge av dette har de siste årene gitt innsikt i nye muligheter for fiberens bruk utover det tradisjonelle. Omfattende testing av kombinert stang- og fiberarmering utviser gode resultater for samlet styrke og bæreevne. For bruk i bærende konstruksjoner har fiber blant annet blitt brukt på Trondheimsportalen. Det ble utført med teknisk godkjenning fra et testforsøk med etteroppspent flatdekker. (Terje Kanstad og Trygstad 2014)



(a)



(b)

Figur 2.5: Fiberarmering brukt i bærende konstruksjoner

(a) Trondheimsportalen Kilde: ARC Arkitekter AS

(b) L'Oceanografic i Valencia, Spania. Kilde: Thoralf Schade/Structurae

Et annet eksempel er L'Oceanografic i Spania vist i figur 2.5b. Den er utformet som en tynn skallkonstruksjon med vedvarende bøyning langs taket. Taket har en tykkelse på mellom 60-225 mm som gjør konvensjonell armerings svært begrenset. Det viser potensialet fiberarmering får, der konvensjonell armering ikke er mulig.

Figur 2.5a er kombinasjonsarmering med fiber- og spennarmering, mens 2.5b er bare fiberarmering. Eksempelene er ment for å illustrere variasjon av bruk, for å tilfredsstille ulike armeringsbehov. I de to nevnte eksempelene er det brukt stålfiber.

---

### 2.3.4 Basaltfiber

Basalt er en relativt ny og miljøvennlig fiberarmering. Basaltfiber har svært høy tyngdetetthet. Samtidig er basalt kjemisk stabilt, korrosjonsmotstandig og har særdeles god strekkstyrke. Produksjonen av basaltfiber er ukomplisert. Basaltstein smeltes ved 1,450-1,500 °C og blir deretter tvunnet til en kontinuerlig fiber som kuttes til ønsket lengde. Høyt smeltepunkt gjør at basalt ofte brukes som brannisolasjon. Basaltfiber har derfor en lav produksjonskostnad, med en enkel gjenvinningsprosess bestående av omsmelting.

(Qin mfl. 2018; Mohaghegh 2016; Jamshaid og Mishra 2016)

#### Mekaniske egenskaper

Forsøk på fiberbetong har vist større motstandsdyktighet mot vanninntrengning, og derav klorid. Funnene indikerer at en oppnår en «tettere» betong. Det betyr at både armeringsmetoden og fibertypen viser god korrosjonsmotstandsdyktighet.

Denne effekten blir svært fordelaktig sammen med basaltfibers naturlige motstandsdyktighet mot korrosjon. Basalten alene yter god motstand i seg selv fordi den ikke får en kjemisk reaksjon mot klorid, slik som stålfiber gjør. (Ha 2019; Wang mfl. 2019)

En særlig viktig innvirkning kommer fra fibernes orienteringsfaktor. Som nevnt 2.3.2 kan fiberne orienteres i hvilken som helst retning i planet. Dersom fiberne da orienteres parallelt med retningen kraften påføres vil virkningen være liten til neglisjerbar. (Bentur og Mindess 2006)

#### Praktiske fordeler & ulemper

Fiberarmering som erstatning til slakkarmering kan gi en redusert arbeidstid. Slakkarmering er som nevnt tradisjonelt mest brukte i betongkonstruksjoner. Slakkarmeringen monteres inn i forskalingen før betongen støpes. Dette er svært tidkrevende og fysisk tungt arbeid. Itillegg utgjør armeringsjernet en fare når montert opp, ved f.eks fall mot oppstikkende armering. På prosjektet Arena Sør sparte de 30% av arbeidstid sammenlignet med prosjektert tid med tradisjonell armering. (Terje Kanstad, Juvik mfl. 2011)

Fra Lövgren 2005 viser analyser at andel av arbeidskostnader utgjør rundt 40%. I et forsøk ved Chalmers University of Technology så man på økonomiske besparelser ved fiberarmering. For en 150 mm tykk plate (på grunn) ca. 11x6 m, ble det brukt 10 timer til legging av armering og jernbinding. Disse timene kan potensielt reduseres eller elimineres ved fiberarmering. I denne sammenligningen utgjorde besparelsen med fiberarmering 44%. Bengtsson og Sigström 2007 Fiberarmering kan også være en ettertraktet løsning for å unngå komplisert og tidkrevende utførelse av skjærarmering. Arntsen og A. V. Olsen 2021

#### HMS-tiltak

Et annet viktig aspekt er HMS-kravene for armeringsbinding. Når armeringen monteres må bygningsarbeidere gjøre omfattende tiltak for å sikre at byggeplassen er sikker å ferdes i. Blant

---

annet er armeringsjern og matter ugunstig å bære for hånd. Derfor flyttes armeringen oftest ved hjelp av kranløft som er tidkrevende. Videre når armeringen blir montert opp, stilles det krav til oppstikkende armeringsjern som skal kles med vernehylser vist på figur 2.6a. Det kan også innebære omfattende sikringstiltak som vist på figur 2.6b. Dersom fiberarmeringen reduserer eller erstatter vanlig armering, vil derfor HMS-forholdene også bedres.



(a)



(b)

Figur 2.6: HMS tiltak

- (a) Vernehylser for oppstikkende armeringsjern. Kilde: Norsk Stål AS  
(b) Sikringstiltak for jernbindingsarbeid. Kilde: Michael Macor/The Chronicle

## Innblanding

Balanseforholdet mellom optimal fiberutnyttelse og praktisk gjennomførbarhet er en utfordring for fiberarmering. Forsøk har vist at ved høy nok doseringsmengder kan fiberne teoretisk overstige slakkarmerings styrkebidrag. Men for høy dosering vanskeliggjør prosessen med innblanding. (Bentur og Mindess 2006)

Ved feil utførelse av innblanding kan lav konsentrasjon eller ugunstig retning til fibre oppstå, som resulterer i svakhetssoner. Fordelingen av fibre blir anisotrop, Et eksempel der dette skjer er ved bruk av stavvibrator som beskrevet i NB38. De så at det lett oppstår soner med lavere fiberkonsentrasjon når stavvibrator ble benyttet. Slike svakhetssoner er vanskelig å oppdage etter betongen er størknet, som betyr at utførelsen av blanding og utlegging blir essensiell for å oppnå god utnyttelse av fibrene. Det innebærer økt krav til selve støpingen sammenlignet med konvensjonell armering. Det er vanskelig å bedømme hvorvidt det overstiger tidsbruken for legging av armering. (Å. L. Døssland 2008; Bentur og Mindess 2006)

---

## 2.4 Utslippsanalyse(CO<sub>2</sub>)

Det er som nevnt et overordnet mål å redusere klimagassutslippene med 50-55% i Norge innen år 2030. Betong har svært høye utslipp ifra sementproduksjonen. Økning i utslippene er proporsjonal med mengden sement i betongen siden den utgjør opp mot 70% av totale CO<sub>2</sub>-utslipp. Derfor vil en reduksjon i bruken betong være avgjørende for miljøbesparelser i form av redusert CO<sub>2</sub>-utslipp.

Det vil også redusere utslipp ved mindre armeringsmateriale. Men største CO<sub>2</sub>-utslippsyteren er ikke selve armeringsmaterialet, men det som inngår i konstruksjons- og bruksfasen hos armeringen. Det kreves egnede anleggsmaskiner på byggeplassen for å flytte og behandle armeringen. Disse maskinene står for mye av utslippene i livsløpet til armering. Denne reduksjonen er imidlertid vanskelig å beregne og vil derfor ikke inkluderes i CO<sub>2</sub>-utslippsregnskapet.

Det vil i oppgaven kun beregnes etter materialene og deres respektive CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. (ecoinvent Hentet 18.04.2022; Kanstad mfl. 2020;

# Kapittel 3

## Regelverk & Metode

### Regelverk

Under følger en kortfattet oversikt over standarder og publikasjoner som gjelder for dimensjonering av merden. Det redegjøres også for hvilke programmer som er blitt brukt.

#### Standarder

- NS-EN NS-EN 1990:2002+NA:2008: Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner.
- NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008: Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.
- NS-EN 1992-3:2006+NA:2009: Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 3: Siloer og beholdere.
- NS-EN 206:2013+A2+NA, Betong. Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar.
- NS-EN 14651: Prøvmingsmetoder for betong med metalliske fibere - Måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter)

#### Publikasjoner

- Publikasjon 38, Norsk Betongforening.
- Publikasjon 29, COIN

#### Programmer

- For å løse beregninger i oppgaven er det benyttet MathCAD.
- For tegning av figurer er det brukt AutoCAD.
- For innhenting av utslippsdata (CO<sub>2</sub>) er det brukt Ecoinvent Impact Browser (Eibrowser) og Excel. (ecoinvent Hentet 18.04.2022)



---

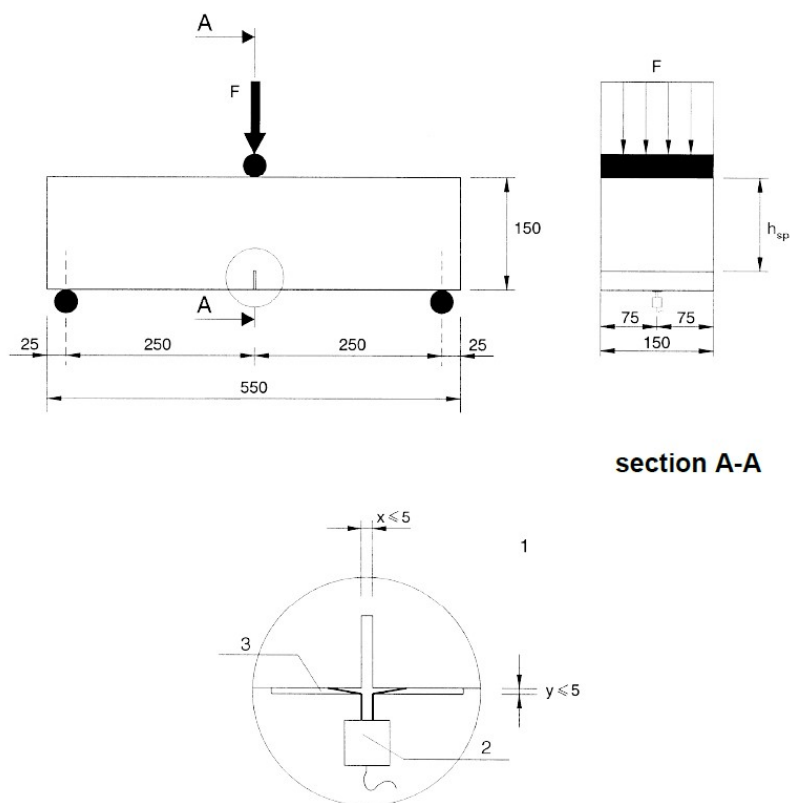
## Metode

### 3.1 Fiberarmering

Resttrekkfasthet er strekkfastheten til tverrsnittet etter opprissing. Resttrekkfastheten er den bestemmende faktoren for dimensjonering. Hvor god resttrekkfasthet fiberbetongen har avhenger av volumandel fiber, fibertype, betongkvalitet og fiberorientering.

#### 3.1.1 Bestemmelse av restbøyestrekfasthet

Bestemmelse av restbøyestrekfasthet gjøres ved 3-punkt metode iht. NS-EN 14651. Det er en standardisert bjelketest hvor bøyemomentene for fire forhåndsbestemte rissvidder, kalt CMOD (Crack mouth opening displacement), blir undersøkt. Oppsettet for 3-punkt metode er vist i figur 3.1.



Figur 3.1: Norsk 3-punkt metode etter NS-EN 14651 for måling av rissvidde(CMOD). mål i mm.

Ved beregning av restbøyestrekfastheten ved målt last, antas lineær spenningsfordeling og beregnes ved ligningen:

$$f_{R,i} = \frac{6M_{Ri}}{bh^2}$$

---

der

$M_{Ri}$  er moment ved spesifiserte rissvidder(CMOD).  
 $= F_{Ri} \cdot \frac{L}{4}$

$F_{Ri}$  er last ved spesifiserte rissvidder(CMOD).

$h_{sp}$  er avstand fra toppen av bjelken og ned til starten av slissen i figur 3.1

NB 38 klassifiserer fiberbetong etter restfasthetsklasse og duktilitetsklasse. Karakteristisk restbøyestrekkefasthet ved 0.5mm rissvidde( $CMOD_1$ ),  $f_{R,k1}$  bestemmer restfasthetsklasse, mens karakteristisk restbøyestrekkefasthet ved 2.5mm rissvidde( $CMOD_3$ ),  $f_{R,k3}$  bestemmer duktilitetsklassen. Tabell 3.2 viser klassifisering av restfasthetsklasse og duktilitetsklasse i henhold til NB 38.

$f_{R,1k}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
Duktilitetsklasse										
a	$f_{R,3k}=0,5f_{R,1k}$									
b	$f_{R,3k}=0,7f_{R,1k}$									
c	$f_{R,3k}=0,9f_{R,1k}$									
d	$f_{R,3k}=1,1f_{R,1k}$									
e	$f_{R,3k}=1,3f_{R,1k}$									

Figur 3.2: Restfasthetsklasser fra NB38 tabell 2.2

Karakteristisk restbøyestrekkefasthet er fra NB38 gitt ved ligningen:

$$f_{Rk,j} = f_{r,j} - k \cdot s$$

der

$f_{Rk,j}$  er midlere restbøyestrekkefasthet.

k er gitt for den gitte prøvingsmetoden som 1.7.

s er standardavvik.

NB38 (lign.4-1a/b) tillater kun å bruke opptil 60% av midlere restbøyestrekkefasthet,  $f_{R,1m}$  og  $f_{R,3m}$ , for å ikke oppnå for gunstige resultater fra spredning i fasthet fra bjelkeforsøk. Verdien på midlere restbøyestrekkefasthet forutsettes kjent, og de beregningsmessige reststrekkefasthetene blir dermed:

$$f_{R,1kber} = \min(f_{R,1k}, 0.6 \cdot f_{R,1m})$$

$$f_{R,3kber} = \min(f_{R,3k}, 0.6 \cdot f_{R,3m})$$

---

Midlere restbøyestrekfasthet er gjennomsnitt av alle målte restbøyestrekfastheter ved gitt rissvidde for gjennomførte tester. Når restbøyestrekfasthet bestemmes, er bøyemomentet beregnet basert på lineær spenningsfordeling. Dette gjenspeiler ikke reel oppførsel i det tverrsnittet opprisser, og beregnet restbøyestrekfasthet kan dermed ikke benyttes direkte i beregning.

Karakteristisk enaksiell reststrekfasthet bestemmes etter NB 38 (lign. 4-2a/b) som:

$$f_{ftsk,res} = 0.45 \cdot f_{Rk,1} \quad (\text{Bruksgrensetilstanden})$$

$$f_{ftsk,res} = 0.37 \cdot f_{Rk,1} \quad (\text{Bruddgrensetilstanden})$$

Videre benyttes det en effektiv reststrekfasthet som tar hensyn til fiberorientering ved å beregne med en fiberorienteringsfaktor  $\kappa_0$  som settes til 1,0 eller 0,5 avhengig av konstruksjonen. For vegger settes normalt  $\kappa_0$  til 0,5.

$$f_{Fts,ef} = \kappa_0 \cdot f_{ftsk,res}$$

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_0 \cdot f_{ftuk,res}$$

Dimensjonerende reststrekfasthet for bruddgrensetilstanden etter NB38 (lign. 4-4) er gitt ved:

$$f_{Ftud} = \frac{f_{Ftu,ef}}{\gamma_{sf}} \quad (3.1)$$

Materialfaktoren for fiberbetong,  $\gamma_{sf} = 1,5$ .

---

## 3.2 Spennarmering

### 3.2.1 Spennkraft

Fra EC2 5.10.2.1 har vi at største spennkraft i den aktive enden under oppspenning er gitt som:

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} \quad (3.2)$$

der

$A_p$  er tverrsnittsarealet av spennkabelen  
 $\sigma_{p,max}$  er største spenning påført spennkabelen  
 $= \min(k_1 \cdot f_{pk}; k_2 \cdot f_{p0,1k})$

Verdiene for  $k_1$  og  $k_2$  finnes i det nasjonale tillegget. De anbefalte verdiene er henholdsvis 0,8 og 0,9.

### 3.2.2 Reduksjon av spennkraft

Beregning av umiddelbare og tidsavhengige tap av forspenningskraft blir grundig gjennomgått i EC2: 5.10. Oppgaven benytter et konservativt uttrykk for spennkraft etter umiddelbare og tidsavhengige tap (Trygstad, samtale) gitt ved:

$$P_p = k_0 \cdot A_p \cdot \sigma_{p,max} \quad (3.3)$$

der

$k_0$  Er gitt som 0.85 og reduserer spennkraften med 15%

---

### 3.3 Elastisitetsteori

I elastisitetsteorien antas det at plane tverrsnitt forblir plane etter deformasjon er gjeldende og at sammenhengen mellom spenning og tøyning er lineær-elastisk.

I lineær-elastisk analyse tas det vanligvis ikke hensyn til rissdannelse for å beregne krefter og momenter. Når lastene nærmer seg bruddtilstanden vil mest påkjente tverrsnitt oppføre seg plastisk og krefter omfordeles. (Sørensen 2017)

#### 3.3.1 Elastisitetsteori for skall

Skall kan ses på som en kombinasjon av skive og plate. Den utsettes for membrankrefter som skiver og for bøyemomenter som plater. (Malmo og H. Ø. Olsen 2017) Konstruksjonen i oppgaven dimensjoneres som et tynt skall. Den defineres som tynne skall når tykkelsen ( $t$ ), er mindre enn en tiendedel av midlere radius. Altså  $t < \frac{r}{10}$ . Teorien for tynne skall baseres på disse antagelsene: (Nygaard 2017)

- Tykkelsen på skallet er neglisjerbar sammenlignet med kurvaturen middeflatene i skallet
- Materialet er homogent, elastisk og isotropt.
- Normalspenningene vinkelrett på middeflatene er neglisjerbare.
- Rette linjer som er normale på middeflatene forblir rette før og etter deformasjon. Denne antakelsen impliserer at alle tøyningsskikomponenter i retning normalt på middeflatene er små og kan neglisjeres.

For å få en membrantilstand hvor vi kan beregne konstruksjonen ved hjelp av likevektslikningene må visse kriterier oppfylles. Her må konstruksjonens bøyemoment og vridemomenter være null eller neglisjerbare og konstruksjonen ikke være fastholdt mot deformasjoner. (Nygaard 2017; Tøgersen 2015)

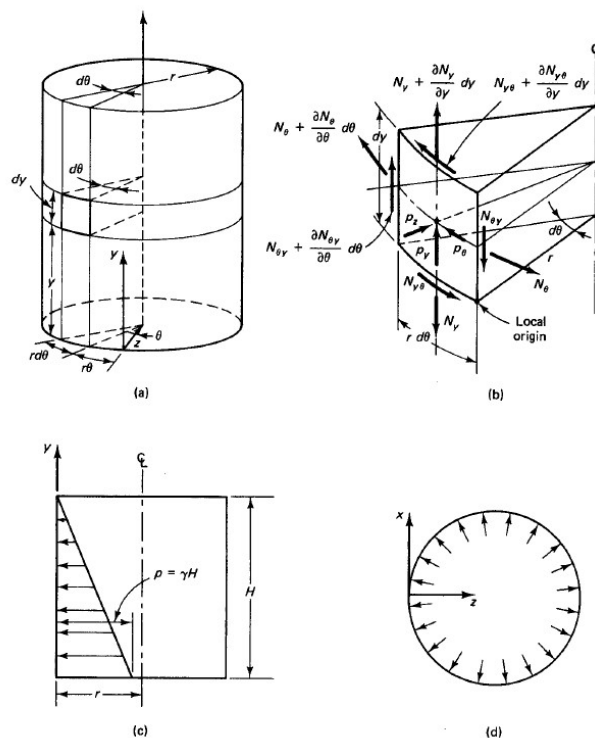
Den vertikale kraften  $N_y$ , ringkraften  $N_\theta$  langs omkretsen, samt skjærkreftene  $N_{y\theta}$  og  $N_{\theta y}$  er vist i figur.. Alle disse fire kreftene virker plant på skallet. De tre likevektslikningene er gitt ved:

$$\frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial N_{y\theta}}{\partial y} + p_\theta r = 0 \quad (5a)$$

$$r \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{\theta y}}{\partial \theta} + p_y r = 0 \quad (5b)$$

$$\frac{N_\theta}{r} = +p_z = 0 \quad (5c)$$

På grunn av symmetri har vi at  $\partial N_{y\theta} = \partial N_{\theta y}$ , det gjør at de ukjente reduseres til tre, og representerer en statisk bestemt konstruksjon kun utsatt for direkte krefter i form av indre



Figur 3.3: Krefter i en sylindrisk tank. Kilde: Nawy 2010

(a) skallgeometri. (b) krefter. (c) illustrasjon hydrostatisk trykk. (d) aksesymmetrisk indre trykk for et vilkårlig horisontalt plan.

trykk.

For aksesymmetrisk last som i figur.. har vi,  $p_\theta = p_y = 0$  og  $p_z = p \cdot f(y)$ , uavhengig av  $\theta$ , dermed har vi:

$$P_z = -\gamma(H - y) \quad (6)$$

Løsningen på ligning 5 blir da:

$$N_{y\theta} = N_y = 0$$

og

$$N_\theta = \gamma(H - y)r \quad (7)$$

$N_\theta$  er her ringkraften i et vilkårlig punkt under overflaten. og samstemmer med løsningen vi får for  $F$  fra utledning fra generell fluidmekanikk:

Ringkraft:

$$F = \frac{pd}{2} = pr \quad (3.4)$$

---

Ringspenning:

$$f_r = \frac{pd}{2t} = \frac{pr}{t} \quad (3.5)$$

der

d er diameter til cylinderen.

r er radius til cylinderen.

t er tykkelse på veggen.

p er enhet indre trykk på bunnen av tanken.

$$= \gamma H$$

$\gamma$  er tyngdetetthet til væsken.

Ringspenningene ved et vilkårlig punkt under overflaten er da gitt ved:

$$f_r = \gamma(H - y) \frac{d}{2t} \quad (3.6)$$

der

H er høyden til væsken inneholdt i tanken når tanken er fylt opp.

y er avstand over bunnplaten.

Den korresponderende ringkraften er gitt ved:

$$F = \gamma(H - y)r \quad (3.7)$$

I vår oppgave vil tanken være fylt opp med saltvann, som har en tyngdetetthet  $\gamma = 10,04 \text{ kN/m}^3$ .

---

### 3.3.2 Momentkapasitet iht. EC2.

Beregningene av momentkapasitet er gjort iht. (*Eurokode 2-1-1* 2021) og med retningslinjer beskrevet i betongkonstruksjoner. (Sørensen 2017)

Betongtrykksonens dimensjonerende momentkapasitet  $M_{Rd}$ , finnes ved:

$$M_{Rd} = K \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \quad (3.8)$$

For uarmert betong er mindre duktilt, bør i følge EC2: 12.3.1(1) verdien for  $\alpha_{cc,pl}$  være mindre enn  $\alpha_{cc}$  i beregning av  $f_{cd}$ . Verdi for  $\alpha_{cc,pl}$  finnes i det nasjonale tillegget. Anbefalt verdi er 0.8. For uarmert betong har vi dermed dimensjonerende trykkfasthet gitt ved:

$$f_{cd} = \alpha_{cc,pl} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.9)$$

### 3.3.3 Momentkapasitet iht. NB 38.

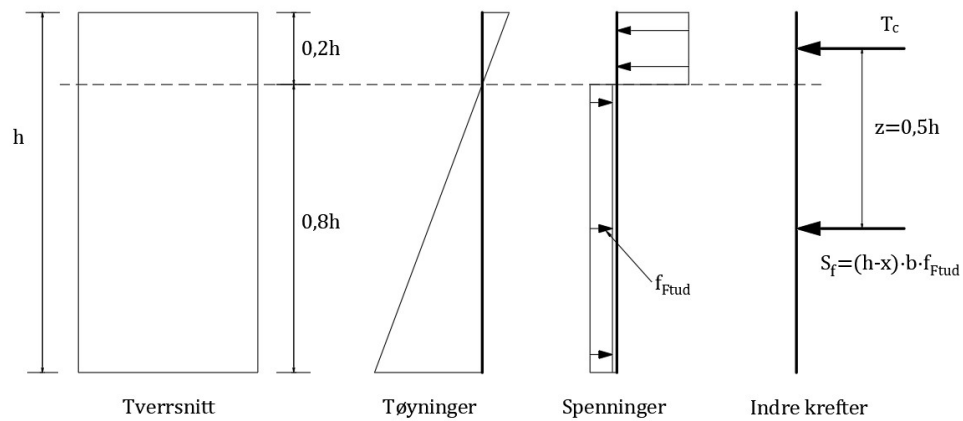
I henhold til NB 38 4.3.3 skal momentkapasiteten bestemmes basert på følgende prinsipper:

- Det skal påvises at samvirke mellom stangarmering og fiberarmering i konstruksjonsdelen bærer den dimensjonerende lasten.
- Stangarmeringen er forutsatt å følge arbeidsdiagrammet og retningslinjene i EC2 3.2.7.
- Betongen skal karakteriseres ved bestemmelsene gitt i EC2 3.1.7.
- Strekkapasiteten kan inkluderes med en konstant spenningsfordeling i strekksonen av tverrsnittet.
- Trykksonehøyden bestemmes ved aksiell likevekt ved beregning.
- Momenkapasiteten kan deretter bestemmes ved å ta likevekt om trykkresultantens angrepspunkt.

For fiberbetong med karakteristisk reststrekkfasthet,  $f_{Ftud}$  lavere enn  $2,5N/mm^2$  kan kapasiteten forenklet beregnes ved å anta at reststrekkfastheten,  $f_{Ftud}$  virker over  $0,8h$  og at den indre momentarmen er  $0,5h$ . Se figur 3.5 Momentkapasiteten for et rektangulært tverrsnitt er da gitt ved:

$$M_{Rd} = 0,4 \cdot f_{Ftud} \cdot b \cdot h^2 \quad (3.10)$$





Figur 3.5: Spennings- tøyningsdiagram for rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning

### 3.3.4 Skjærkraftskapasitet

Regler for beregning av skjærkapasitet er gitt i EC2: 6.2. Den gjelder for plater og bjelker hvor forholdet mellom spennvidde og høyde er minst 3,0 ved tosidig opplegg. (*Eurokode 2-1-1* 2021;Sørensen 2017)

---

## 3.4 Minimumsarmering

I følge EC2: 7.3.2(4) vil det for forspente konstruksjoner i bruksgrensetilstanden ikke være krav til minimumsarmering i tverrsnitt der betongen er i trykk. Det vil fortsatt være krav til minimumsarmering i bruddgrensetilstanden.

### 3.4.1 Minimumsarmering iht. EC2

EC2-3 gir kun retningslinjer for beregning av armering for skall i bruksgrensetilstanden. Her refereres det til EC2-1-1: 7.3.2, hvor det for forspente konstruksjonsdeler ikke er krav til minimumsarmering der betongen er i trykk, som er tilfelle for konstruksjonen i oppgaven.

I følge EC2: 9.3.1.1(1) skal minste og største armeringsmengde for plater beregnes ved bruk av EC2:9.2.1.1(1), her bør arealet av strekkarmeringen ikke antas mindre enn  $A_{s,min}$  som er gitt ved:

$$A_{s,min} = \begin{cases} 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \\ 0,0013 \cdot b_t \cdot d \end{cases} \quad (3.11)$$

der

$b_t$  er midlere bredde av strekksonen.

$f_{ctm}$  er strekkfasthet og bestemmes med hensyn til fasthetsklassen.

### 3.4.2 Minimumsarmering iht NB38

NB 38 gir retningslinjer for beregningmetode av minimumsarmering for både plater, skall og vegger. Det beregnes etter alle tre metodene som sammenlignes i drøfting.

Minimumskravet til armering for plater i begge retninger etter NB38 er gitt ved:

$$A_{s,min} \cdot f_{yk} = \begin{cases} 0,26 \cdot (f_{ctm} - 2,15 \cdot f_{Ftu,ef}) \cdot b_t \cdot d \\ 0,13 \cdot f_{ctm} \cdot b_t \cdot d \end{cases} \quad (3.12)$$

der det forutsettes at

$$\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0,005 \quad (3.13)$$

For konstruksjoner med nedstyrtningsfare kan armeringen ikke reduseres med mer enn 50%

For stangarmerte vegger, skiver og skall som også inneholder fiberarmering er kravet til minimumsarmeringens tverrsnittsareal på begge sider av stangarmerte vegger, skiver og skall gitt i NB38 ved:

---

Skiver og skall, begge retninger:

$$A_{s,min} = 0.3 \cdot A_c \cdot \frac{f_{ctm} - f_{Ftu,ef}}{f_{yk}} \quad (3.14)$$

Vegger for øvrig:

$$A_{s,min} = 0.15 \cdot A_c \cdot \frac{f_{ctm} - 1,7 \cdot f_{Ftu,ef}}{f_{yk}} \quad (3.15)$$

der

$A_c$  er arealet av den aktuelle tverrsnittsdelen.

For tynne vegger kan  $f_{Ftu,ef}$  økes med en faktor, 1,2 i disse uttrykkene.

# Kapittel 4

## Forutsetninger

### Forutsetninger

#### 4.1 Materialvalg

Oppdrettsmerden i oppgaven består av betong, spenn-, slakk og fiberarmering. Materialegenskapene for betong og slakkarmering er hentet fra EC2. Materialegenskapene for Spenn- og fiberarmering er hentet fra Spenneteknikk og RFT. (Spenneteknikk 2011; ReforceTech Hentet 27.04.2022)

---

### 4.1.1 Betong

Valgt fasthetsklasse er bestemt utifra trykktest utført iht. NS-EN 12390-3:2019 i sammenheng med laboratorieforsøk. Fasthetsklasser for fiber er definert på samme måte som for betong uten fiber. Fasthetsklassene er definert etter EC2-1-1, tabell 3.1. Det er i oppgaven sammenlignet betong uten armering med fiberarmert betong. Fasthetsklasser for betong med og uten fiber er gitt i tabell 5.10.

Tabell 4.1: Materialegenskaper betong

Egenskaper	Symbol	Referanse(B40)	Fiberarmert(B45)
Karakteristisk trykkfasthet	$f_{ck}$	40	45
Midlere strekkfasthet	$f_{ctm}$	3,5	3,8
Karakteristisk strekkfasthet, 5%-fraktil	$f_{ctk,0,50}$	2,5	2,7
Materialfaktor	$\gamma_c$	1,5	1,5
Lastkoeffisient	$\alpha_{cc}$	0,85	0,85
Dimensjonerende trykkfasthet	$f_{cd}$	22,7	25,5
Dimensjonerende strekkfasthet	$f_{ctd}$	1,4	1,5
Eksponeringsklasse		XS1/XS2	XS1/XS2
Største nominelle kornstørrelse i tilslaget	$D_{max}$	16mm	16mm

---

---

### 4.1.2 Spennarmering

Ettersom oppgaven omhandler en sylindrisk tank som skal inneholde vann, er det satt krav til at konstruksjonen skal være vanntett. I følge EC2-3:7.3.1, tabell 7.105 er konstruksjonen klassifisert etter tetthetsklasse 3. For den klassen anbefales det at konstruksjonen armeres med spennarmering for å sikre tetthet. Som nevnt tidligere, gjør dette også at vi får en slankere konstruksjon. Avgrensinger i oppgaven gir grunnlag for en forenklet spennkraft analyse. Modellen idealiseres til å utelukke dimensjonering av endeforankringene i konsoll og bunnplaten.

Materialeegenskapene for spennarmering er hentet fra Spenneteknikk 2011. Resterende spesifikasjoner er gitt av veileder. Alle spesifikasjoner benyttet i oppgaven er gitt i tabell 4.2:

Tabell 4.2: Materialeegenskaper spennarmering

Egenskaper spennarmering	Symbol	Verdi
Karakteristisk fasthet	$f_{pk}$	1860MPa
Bruddstyrke	$P_{pk}$	279kN
Karakteristisk "0,1%-grense"	$f_{p0,1k}$	1670MPa
Flytestyrke	$P_{p0,1k}$	250, 5kN
Elastisitetsmodul	$E_s$	196GPa
Materialfaktor	$\gamma_s$	1,15
Dimensjonerende fasthet	$f_{pd}$	1452.2MPa
Største spenning	$\sigma_{p,max}$	1488MPa
Spennkraft før tap av spennkraft	$P_{p,max}$	223, 2kN
Spennkraft etter tap av spennkraft	$P_p$	189, 7kN
Diameter spenntau	$\phi_p$	15, 70mm
Diameter plastrør	$\phi_{rør}$	20mm
Tverrsnittsareal	$A_p$	150mm <sup>2</sup>

---

### 4.1.3 Slakkarmering

Ved beregning av minimumsarmering (min.armering) er det tatt utgangspunkt i tradisjonell slakkarmering, B500NC. Materialelegenskapene er hentet fra EC2 og vist i tabell 4.3:

Tabell 4.3: Materialelegenskaper slakkarmering, B500NC

Egenskaper slakkarmering	Symbol	Verdi
Karakteristisk strkkfasthet	$f_{yk}$	500MPa
Elastisitetsmodul	$E_s$	200GPa
Materialfaktor	$\gamma_s$	1,15
Dimensjonerende fasthet	$f_{yd}$	434MPa

### 4.1.4 Fiberarmering

Fiberarmeringen er valgt på bakgrunn av eksponeringsklassen til betongen. Basaltfiber har et fortrinn i marint miljø ettersom det ikke korroderer ved klorideksponering. Materialelegenskapene til valgte basaltfiber er gitt i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Basaltfiber RFT

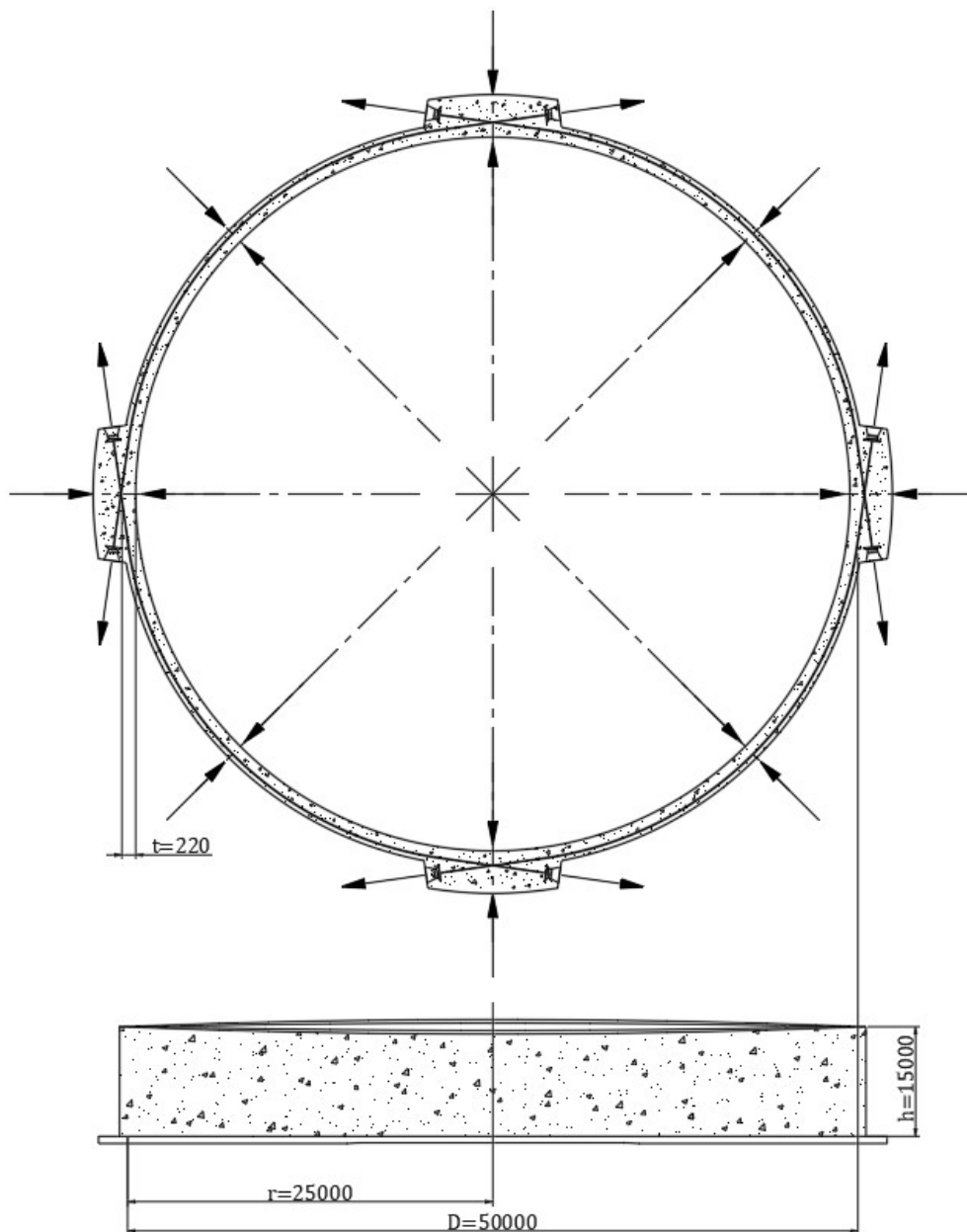
Spesifikasjoner	
Diameter:	0.65mm
Lengde:	55mm
Densitet:	2.1g/cm <sup>3</sup>
E-modul:	45GPa
Strekkfasthet:	1000MPa

---

## 4.2 Geometrisk utforming

Figur (4.1) viser oppspenningssystemet ovenfra. Det er ikke gjort beregninger på systemet, men det er tatt med for å illustrere en anbefalt løsning. Mer detaljert beskrivelse av oppspenningssystemet fås av Spennteknikk 2011.

Systemet vil med illustrerte oppsett fordele spennkraften uniformt i konstruksjonen. Konsoll med ankerne i figuren er kun med som illustrasjon, og representerer ikke faktiske dimensjoner. Videre fra EC2-3: NA.9.11.1 Settes krav til minste veggtykkelse på  $200\text{mm}$  for konstruksjoner i tetthetsklasse 3.



Figur 4.1: Geometrisk utforming, mål i mm



---

Konstruksjonens utforming er da med dimensjonene;

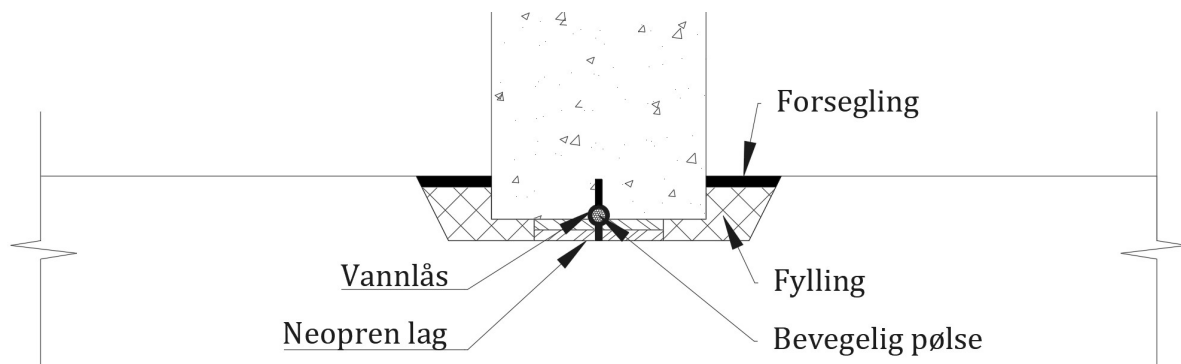
- **Diameter (D)** = 50m
- **Høyde (H)** =15m
- **Veggtykkelse (t)** =220mm

merden blir derfor definert som en tynnvegget beholder ettersom tykkelsen (t) er mindre enn en tiendedel av midlere radius (r). (Bell 2015)

$$t < \frac{r}{10} \quad (4.1)$$

Det forutsettes også at eneste lastpåkjenning kommer fra trykk, definert som differansen mellom indre og ytre trykk, som i vårt tilfelle kun er hydrostatisk trykk.

Ved beregning av merden benyttes elastisitetsteori for tynne skall, gjort rede for i seksjon 3.3.1. For å beregne etter elastisitetsteorien forutsettes det eneste lastpåkjenningen kommer fra indre trykk. I praksis vil betongen også være utsatt for krefter fra egenvekten. Disse kreftene er imidlertid neglisjerbar i forhold til kreftene fra indre trykkrefter og er derfor utelukket fra beregningen. Andre opptrædende krefter kompliseres ved en fastspent overgang. Det vil oppstå bøyemoment som vist i figur ???. Derfor er et fritt glidende underlag i overgangen mellom bunnplate og vegg valgt. Det gjør konstruksjonen statisk bestemt og er mest økonomisk gunstig.(Nawy 2010) En oppstående utfordring blir da vann tetthet i overgangen. For å løse problemet brukes et tilnærmet friksjonsfritt neopren underlag i overgangen mellom gulv og vegg, samt en vannlås som tåler horisontal forflytning. (Trygstad, Samtale) Momentinnvirkning fra friksjon i overgang blir da neglisjert. Løsningen er illustrert i figur (4.2) der veggen får mulighet til vandring ved opptrædende krefter fra oppspenning og hydrostatisk trykk.



Figur 4.2: Detaljtegning av overgang mellom bunnplate og vegg

---

## 4.3 Laster

Som nevnt tidligere, er det kun lasten fra hydrostatisk trykk som tas hensyn til, samt spennkraft for å balansere trykket. For å sikre at konstruksjonen er i konstant trykk etter oppfylling med vann og dermed også forsikrer vanntetthet, legges det til en sikkerhetsfaktor i beregningene,  $f_{cv} = 1,5 MPa$  (Nawy 2010). Ringkraften som da brukes i beregningene bygger på ligning 3.7 og er gitt ved:

$$F_{tot} = F + f_{cv} * t \quad (4.2)$$

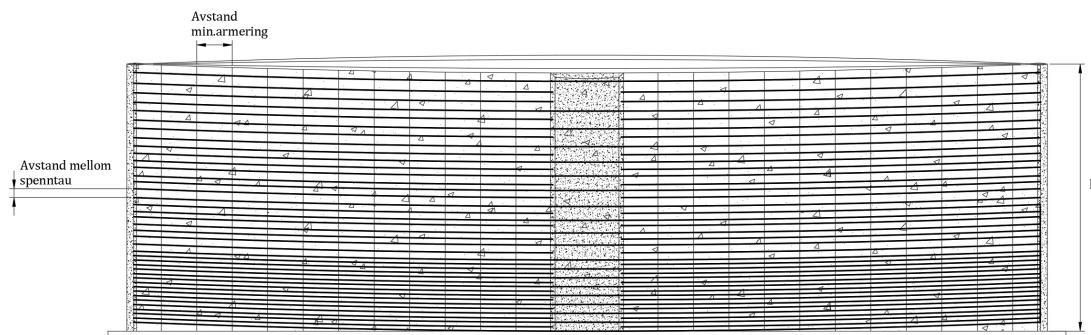
Ringkraften vil reduseres lineær opp mot overflaten.

## 4.4 Spennarmering

Som nevnt er det i oppgaven valgt å bruke uinjiserte spenntau til armering av merden.

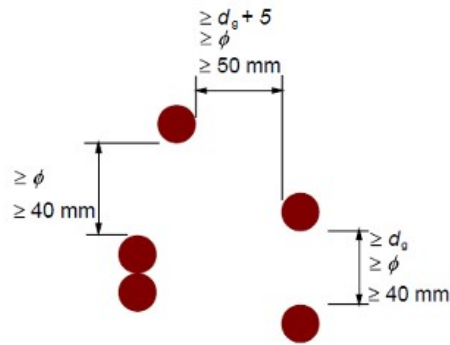
### 4.4.1 Fri avstand for spennarmering

Figur 4.3 illustrerer hvordan spenntauene er lagt horisontalt rundt konstruksjonen. Ettersom trykket varierer lineært med høyden vil antall spenntau pr meter være tett nederst og avta langs høyden i veggen.



Figur 4.3: Spennarmeringsystem

Figur (4.4) viser krav til fri avstand mellom kabelkanaler (*Eurokode 2-1-1* 2021). Det er derfor lagt spenntau dobbelt der kravet til fri avstand ikke kan overholdes. Utfyllende om beregningene for avstand mellom spenntau finnes i vedlegg B



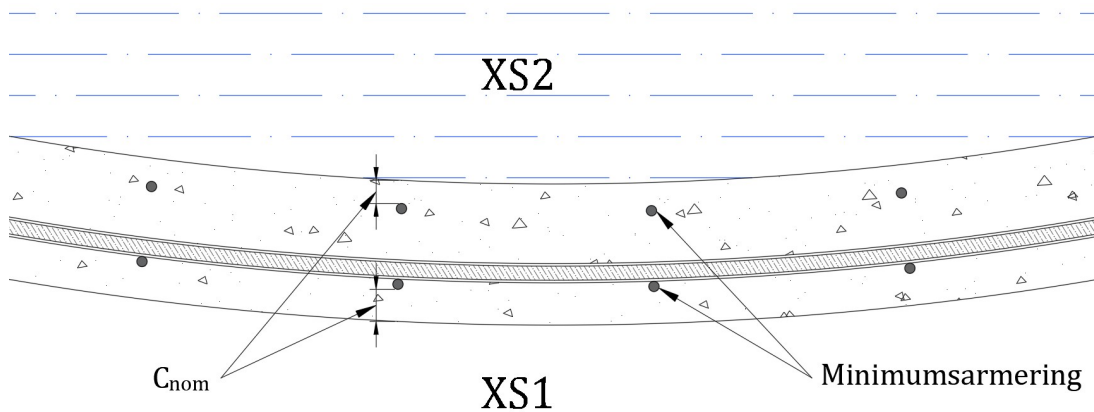
Figur 4.4: Fri avstand mellom kabelkanaler

#### 4.4.2 Fri avstand for slakkarmering

Avstanden mellom slakkarmeringen bestemmes av nødvendig min.armering pr meter. Figur 4.5 viser plassering av min.armering i tverrsnittet. Det legges minimumsarmering på begge sider av veggen med overdekning valgt i henhold til eksponeringsklassene XS1 for utsiden av merden og XS2 for innsiden av merden.

Eksponeringsklasse med tilhørende overdekningskrav ifølge EC2: 4.4.1:

Eksponeringsklasse	$C_{min}$	$C_{dev}$	$C_{nom}$
XS1	45mm	10mm	55mm
XS2	50mm	10mm	60mm



Figur 4.5: Armeringsplassering og eksponeringsklasse

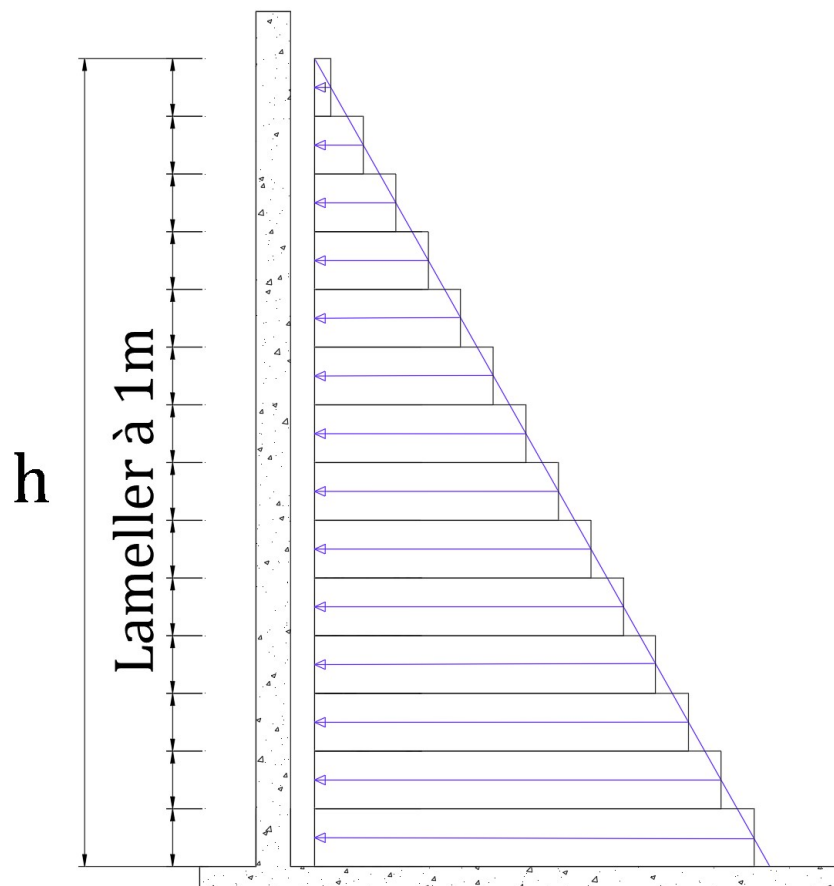
---

## 4.5 Idealisering

I oppgaven studeres lastpåvirkning i de uarmerte områdene mellom spenntauene. Det beregnes hvilken kapasitetsøkning fiberarmeringen tilfører.

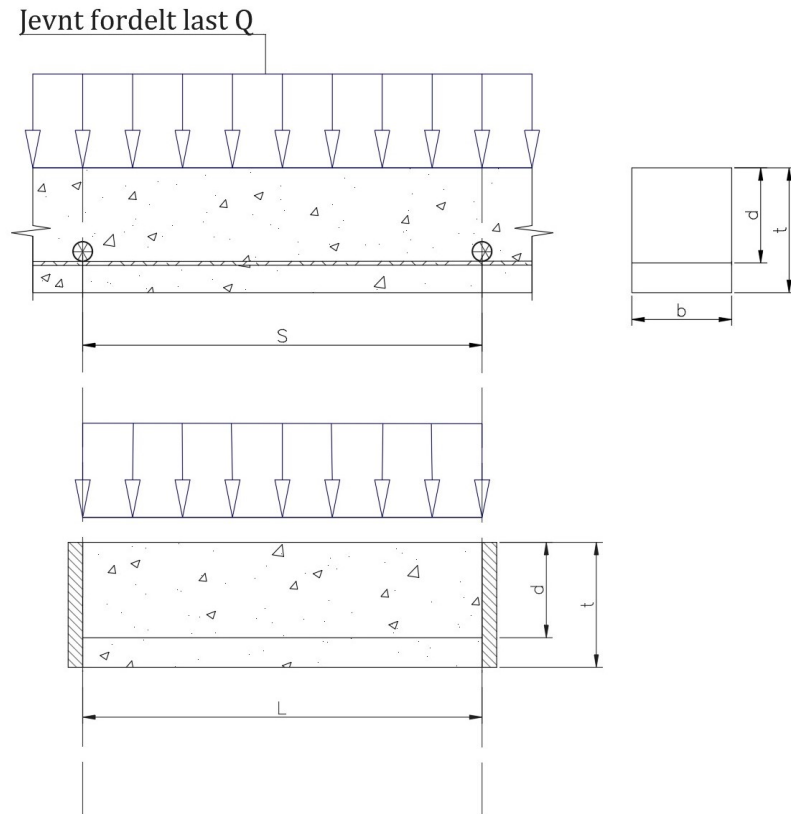
### 4.5.1 Idealisert modell

Som grunnlag brukes en forenklet statisk modell for å finne lastvirkninger mellom spenntau. Avstanden mellom spenntau vil som nevnt variere med høyden på veggen. De lineære trykkref-tene påført skallet er fordelt slik illustrert i figur 4.6 for å forenkle beregningene. Det resulterer i 15 lameller med armeringsmengde beregnet iht. korresponderende trykkraft lamell. (Trygstad, samtale)



Figur 4.6: Trykkrefter fordelt på lameller.

For å beregne moment og skjærkraft mellom spenntauene legges vegg horisontalt og beregnes som en plate. Hvert snitt representerer avstanden mellom spenntau i den respektive lamellen, illustrert i figur 4.7. lamellen legges som en flatliggende plate slik illustrert i figur 4.7. Indre hydrostatisk trykk blir idealisert til en jevnt fordelt last så man kan anvende og hvert spenntau beregnes som en fast innspenning da dette beskriver hvordan kraftoverføring i praksis vil fungere.



Figur 4.7: Utsnitt av lamell

Jevnt fordelt last pr lamell finnes ved formelen:

$$Q = \gamma \cdot (H - y) \cdot h_l \quad (4.3)$$

der

$h_l$  er lamellhøyde.

$$= 1000mm$$

Dimensjonerende moment er beregnet ved bruk av formel for moment for en fast innspent bjelke i begge ender:

$$\text{ved endene: } M_{max} = \frac{Ql^2}{12} \quad (4.4)$$

---

og

$$\text{p\aa midten: } M_{felt} = \frac{Ql^2}{24} \quad (4.5)$$

Som dimensjonerende moment er det brukt  $M_{Ed} = M_{felt}$  da det er her det er uarmert.

Antall spenntau per lamell bestemmes ut i fra likevekt, hvor spennkraften skal balansere det indre hydrostatiske trykket. Diameter p\aa spennarmering og spennkraft er bestemt ut fra materialegenskaper gitt fra Spenneteknikk 2011 samt medregnet tap.

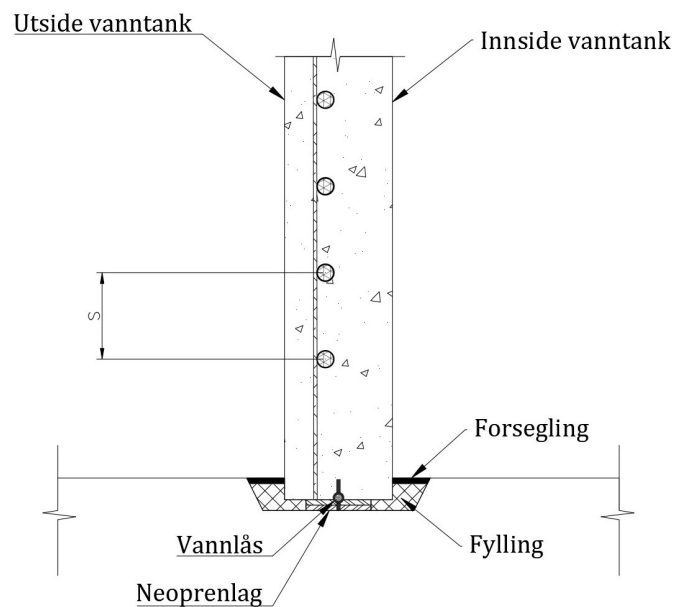
Antall spenntau per lamell finnes ved likevektsligningen:

$$Antall = \frac{F_{tot}}{F_p} \quad (4.6)$$

Videre finnes senteravstanden mellom kabelkanalene illustrert i figur 4.8 ved:

$$Senteravstand = \frac{h_l}{Antall} \quad (4.7)$$

Senteravstand justeres iht. krav tidligere illustrert i figur 4.4



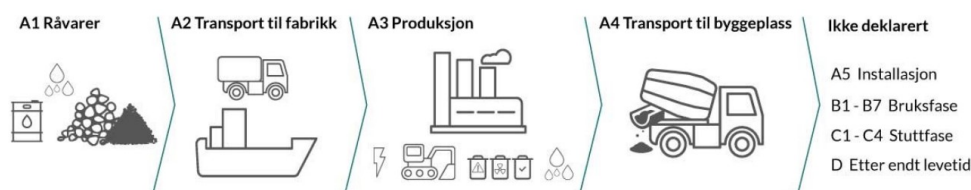
Figur 4.8: Armeringsplassering

---

## 4.6 Utslippsanalyse

Det gjøres en forenklet versjon av livsløpsanalyse (LCA). Omfanget av en helhetlig LCA er komplisert og tidkrevende. Det vil kreve veldig mange flere forutsetninger som ikke kan innhentes fordi merden er i tidlig prosjekteringsfase. Det gjøres derfor en CO<sub>2</sub>-utslippsanalyse for de gjeldende materialene som blir brukt i konstruksjonen.

CO<sub>2</sub>-utslippene for de ulike materialene er hentet fra gjeldende miljødeklarasjoner (EPD) og Ecoinvent Impact Browser (Eibrowser). Det er variert grad av krav til LCA-analyse som gjør at det tas utgangspunkt i utslipp fra prosessene vist i flytskjema vist i figur 4.9.



Figur 4.9: Flytskjema over LCA-analysen sine fire første faser

Verdier hentet fra ecoinvent Hentet 18.04.2022 og kontrollert opp mot EPD'er som brukes. Følgende søkeord er benyttet:

- concrete, 35MPa
- reinforcing steel
- basalt

Verdier for EPD'ene fra lokale aktører som ble brukt til fordel for verdiene fra Eibrowser:

- For betong er verdier fra Dyrøy Betong AS Hentet: 10.05.2022
- For armeringjern er verdier fra ecoinvent Hentet 18.04.2022
- For Basaltfiber er verdier fra ReforceTech AS Hentet: 10.05.2022

Det var ikke mulig å innhente EPD for spennarmeringen som brukes. Verdier fra armeringsjern i EIB blir utgangspunkt for verdiene til både slakkarmering og spennarmering.

Parameteren for vurderingen er iht. bestemmelsene i TK EPD Norge. Den vil kun omfatte **Global oppvarmingspotensialet (GWP)** som har enhetsmengden *Kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter*. Oppgavens gjeldende verdier er gitt i tabell 4.5 som viser oversikt over enhet materialer brukt, og deres respektive CO<sub>2</sub>-ekvivalent:

---

Tabell 4.5: Oversikt CO<sub>2</sub>-ekvivalent for type materiale

<b>Materialer</b>	<b>Benevning</b>	<b><i>Kg</i> ekvivalenter</b>	<b>CO<sub>2</sub>-</b>
Betong	1m <sup>3</sup>	983	
Spennarmering	1kg	4,12	
Slakkarmering	1kg	4,12	
Basaltfiber	1kg	2,36	

---



## Kapittel 5

## Resultat

---

## 5.1 Labresultater

### 5.1.1 Trykkfasthet

Det ble testet seks terninger i trykkfasthet. Av disse var tre uten fiberarmering og tre med. Ved prøvetidspunktet hadde terningene herdet i nøyaktig 28 dager. Resultater fra trykktestingen er presentert i tabell 5.1. Fra trykktesten fikk de fiberarmerte terningen en økning i karakteristisk trykkfasthet på 14%, sammenlignet med terningene uten fiber. Økningen i trykkfasthet antas å være resultat av fiberinnholdet.

Økning i trykkfasthet innehar usikkerhet som drøftes i 6.3.3.

Tabell 5.1: Testing av terninger i trykkfasthet

Resultater fra trykktesting		
Terning nr.	Bruddlast ( $kN$ )	Fasthet ( $MPa$ )
<i>Uten fiber</i>		
1	499,1	49,9
2	530,3	53,0
3	509,0	50,9
<i>Med fiber</i>		
4	593,0	59,3
5	586,6	58,7
6	574,1	57,4

### 5.1.2 Restbøystrekkfasthet

Det ble i forsøket testet seks basaltfiberarmerte bjelker (iht. *NS-EN 14651* 2007). Ved prøvetidspunktet hadde bjelkene herdet i nøyaktig 28 dager. Spenningskurver og utfyllende informasjon finnes i laboratorierapport, vedlegg A, og beregningsresultat, vedlegg D. Resultater for restbøystrekkfasthet samt restfasthetsklasse og duktilitetsklasse er oppsummert i tabell 5.2

Tabell 5.2: Restbøystrekkfasthet ved  $CMOD_j$

Restbøystrekkfasthet (MPa)	CMOD <sub>1</sub>	CMOD <sub>2</sub>	CMOD <sub>3</sub>	CMOD <sub>4</sub>
Midlere restbøystrekkfasthet:	3,58	3,79	3,62	3,10
Standardavvik:	0,25	0,21	0,28	0,20
Karakteristisk Restbøystrekkfasthet:	3,16	3,43	3,14	2,76
Beregningsmessig restbøystrekkfasthet:	2,15	2,27	2,17	1,86
<b>Restfasthet og duktilitetsklasse iht. NB38 tabell 2.2:</b>	<b>B45 M40 R3,0c</b>			

Basert på resultatene i tabell 5.2 beregnes følgende dimensjonerende verdier: Beregning av dimensjonerende verdier basert på resultatene fra tabell 5.2 er gitt i tabell 5.3 og vist utregnet på side 8 og 9 i vedlegg B.

Tabell 5.3: Dimensjonerende verdier

Bruksgrensetilstanden		
Egenskaper	Symbol	Verdi
Beregningsmessig restbøystrekkfasthet:	$f_{R,1kbe}$	2,15MPa
Karakteristisk enaksiell restbøystrekkfasthet	$f_{Ftsk}$	1,42MPa
Effektiv reststrekkfasthet:	$f_{Fts.ef}$	0,71MPa
Dimensjonerende reststrekkfasthet :	$f_{Ftsd}$	0,47MPa
Bruddgrensetilstanden		
Egenskaper	Symbol	Verdi
Beregningsmessig restbøystrekkfasthet:	$f_{R,3kbe}$	2,17MPa
Karakteristisk enaksiell restbøystrekkfasthet	$f_{Ftuk}$	1,16MPa
Effektiv reststrekkfasthet:	$f_{Ftu.ef}$	0,58MPa
Dimensjonerende reststrekkfasthet :	$f_{Ftud}$	0,39MPa

---

## 5.2 Kapasitetsberegninger

Kapasitetsberegningene i oppgaven er utført ved hjelp av mathCAD og vises i vedlegg B samt i tabeller nedenfor. De ulike kapasitetene ble beregnet etter metodene beskrevet i ???. Det presiseres at beregningsmetodene gitt i NB38 i utgangspunktet kun gjelder ved bruk av stålfiber.

Beregningene av skjærkapasitet er beregnet etter metode gitt i EC2:6.2. Metoden gjelder for tilfeller hvor forholdet mellom spenn og tykkelse er 3,0 eller mer. Dette forholdstallet er ikke gjeldende mellom noen av spenntauene. Metoden hensyntar heller ikke fiberens virkning på skjærkapasitet. Sammenligningsgrunnlaget tar derfor kun hensyn til forskjell i trykkfasthet. Beregningene gir derfor et resultat som illustrerer kapasiteten, men belyser ikke fiberpåvirkningen.

### 5.2.1 Momentkapasitet

Resultatene fra beregningene på side 9 i vedlegg B er vist i tabell 5.4. Her viser beregninger en økning i momentkapasitet i det fiberarmerte tverrsnittet på 25% sammenlignet med det uarmerte tverrsnittet.

Tabell 5.4: Momentkapasitet

Tverrsnitt	Momentkapasitet	Bidrag fra fiber
Uarmert	135,5kNm	-
Fiberarmert	169,5kNm	7,5kNm

### 5.2.2 Skjærkapasitet

Beregningene av skjærstrekk og skjærtrykkkapasitet er vist i figur 5.5 og på side 18 til 20 i vedlegg B. Som nevnt gir beregningene et grovt anslag over kapasitet og tar ikke hensyn til fiberens påvirkning utenom endring i trykkfasthet. Vi ser fra resultatet at vi får en reduksjon i skjærstrekkkapasitet for det fiberarmerte tilfellet, dette kan begrunnes i at det er benyttet en lavere mengde minimumsarmering for dette tilfellet. Det fremkommer også en økning i skjærtrykkkapasitet, dette kan begrunnes i økningen i trykkfasthet for fiberbetongen.

Tabell 5.5: Skjærkapasitet

Tverrsnitt	skjærstrekkkapasitet	Skjærtrykkkapasitet
Uarmert	70,7kN	817,2kN
Fiberarmert	66,5kN	953,5kN

---

## 5.3 Materialer

Ettersom konstruksjonen er i konstant trykk fant vi ingen endring i veggtykkelse på bakgrunn av fiberens påvirkning. Veggtykkelse ble valgt i samråd med veileder og med hensyn til krav gitt i EC2.3: NA9.11.1. Som vist i seksjon 5.1 fikk fiberbetongen en høyere fasthetsklasse enn betong uten fiber. Det utgjør en forskjell i materialbruk, da en kan bruke betongresept for B35 og ende opp med B45.

### 5.3.1 Armering

#### Spennarmering

Behovet for spennarmering er uavhengig av om konstruksjonen er fiberarmert eller ikke. Mengden spennarmering og nødvendig spennkraft likt for begge tilfellene og er vist utregnet i side 2 til 4 i vedlegg B.

#### Minimumsarmering

For beregning av minimumsarmering er det gjort en sammenligning av beregning av minimumsarmering i henhold til EC2 for uarmert tverrsnitt mot tre forskjellige beregningsmetoder i henhold til NB38. De utførte beregningene finnes på side 12 til 14 i Vedlegg B. Grunnen til at det er valgt å sammenligne flere metoder fra NB38 er fordi beregningsmetodene gjelder stålfiberarmering i bærende konstruksjoner. Vi har i videre resultater tatt utgangspunkt i mengden minimumsarmering vi fikk ved beregning av metoden for "vegger for øvrig" for den fiberarmerte konstruksjonen. Da dette er den minst konservative beregningsmetoden. Valget av metoden drøftes videre i 6.1.3. Resultatene fra de forskjellige beregningsmetodene kan leses i Tabell 5.6. Beregning av differansen i minimum armeringsmengde for beregningsmetodene iht NB38 mot beregningsmetoden iht til EC2 kan leses i tabell 5.7. (Sørensen 2017)

Tabell 5.6: Armeringsmengde pr meter omkrets

Armeringsmengde etter beregningsmetode		
Beregningsmetode	Nødvendig armering	Minimumsarmering
Lineær-elastisk metode iht. EC2. Uarmert.	$0,979 \frac{mm^2}{m}$	
Lineær-elastisk metode iht. EC2. Fiberarmert.	$0,979 \frac{mm^2}{m}$	
Plater, EC2. Uarmert		$553,28 \frac{mm^2}{m}$
Plater, NB38. Fiberarmert		$403,021 \frac{mm^2}{m}$
Skall, NB38. Fiberarmert		$818,936 \frac{mm^2}{m}$
Vegger, NB38. Fiberarmert		$344,976 \frac{mm^2}{m}$

Tabell 5.7: Differanse i armeringsmengde etter beregningsmetode

Differanse i armeringsmengde mellom metoder fra NB38 og EC2.	
Beregningsmetode	Differanse
Plater, NB38.	$150,259 \frac{mm^2}{m}$
Skall, NB38.	$-265,656 \frac{mm^2}{m}$
Vegger, NB38.	$208,304 \frac{mm^2}{m}$

### Sammenligning av materialbruk

Ved å ta utgangspunkt i beregningsmetoden for vegger for øvrig får vi totalt materialbruk for konstruksjonen med og uten fiber i tabell 5.7. Reduksjon i totalt betongforbruk for uarmert konstruksjon skyldes at fiberen tar opp noe av volumet i betongen.

Tabell 5.8: Total materialbruk med og uten fiberarmering

Tverrsnitt	Spennarmering	Betong	Min.armering	Fiberarmering
Uarmert:	$68,953 kg/m^3$	$514,604 m^3$	$20,291 kg/m^3$	-
Fiberarmert:	$68,953 kg/m^3$	$512,642 m^3$	$12,652 kg/m^3$	$10,0 kg/m^3$

---

### 5.3.2 Totalt materialbruk

## 5.4 Komparativ analyse

Fra beregninger fremkommer følgende resultater for referanse- og fibermerden. Fiberarmering førte ikke til noen endring i mengden spennarmering. Spennarmingens verdier er derfor utelatt fra CO<sub>2</sub>-tabellene.

CO<sub>2</sub>-utslippstallene er avgrenset til de fire fasene A1-A4 som er beskrevet nærmere i vedlegg C.

### 5.4.1 Referansemerd

Tabell 5.9: Referansemerd

Materialer	Benevning	<i>Kg</i> ekvivalenter	CO <sub>2</sub> -
Betong	515,1m <sup>3</sup>	506 343,3	
Slakkarmering	10451,8kg	43 061,4	
Basaltfiber	-	-	
	<b>Totalt</b>	549 404,7	

### 5.4.2 Fibermerd

Tabell 5.10: Fibermerd

Materialer	Benevning	<i>Kg</i> ekvivalenter	CO <sub>2</sub> -
Betong	512,6m <sup>3</sup>	503 885,8	
Slakkarmering	6516,8kg	26 849,2	
Basaltfiber	5151,0kg	12 156,4	
	<b>Totalt</b>	542 891,4	

Fra beregninger fremkommer en mindre reduksjon i betong, og en vesentlig reduksjon i slakkarmering. Begge reduksjonene antas å ha direkte korrelasjon med fiberarmeringen. Reduksjon av betong er fiberne som opptar betongens volum, mens reduksjon i slakkarmering er kapasitetsøkning som tilfredstiller kravet til minimumsarmering. Den totale differanse gir en reduksjon hos fibermerden beregnet til 6513,3 *Kg* CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

# Kapittel 6

## Drøfting

I dette kapitlet vurderes fremgangsmåte for metode og oppnådde resultater. Drøftingen deles i to deler. Først diskuteres de tekniske resultatene. Her drøftes oppnådd resultat fra laboratorieforsøk, beregninger og eventuelle endringer, samt deres aktuelle feilkilder belyses.

Den andre delen drøfter selve prosjektet og læringsutbytte av utarbeidelsen til oppgaven. Her drøftes organisering og erfaringer knyttet til det. I tillegg gjengies hele litterærstudien og dens tilpassing/endringer underveis.

### 6.1 Del I: Drøfting av resultat

#### 6.1.1 Labresultater

Resultatene fra testene viste seg å være relativt gode i forhold til tidligere tester vi har gjennomgått, (Ha 2019) og det samsvarer med gruppens tanker om kvaliteten av arbeidet. Det ble gjennomført i samarbeid med en laboratorieansvarlig ved NTNU i Gjøvik. Han hadde lengre erfaring med oppgavens labforsøket og hadde ferdiglagd betongresept og utregnings skjema. Det begrenser usikkerheten ytterligere at det var lite variasjon i testresultatene. Resultatets betydning for oppgaven er derfor svært positiv. En usikkerhet for resultatene er få prøvinger. Det kunne med fordel testes flere terninger og bjelker for et sterkere beregningsgrunnlag. Økningen på 14% var overraskende da det i tidligere studier er funnet at basalfiber uten blanding med flygeaske ikke ga økning i trykkfasthet. (Salice mfl. 2021) Det ble i vårt forsøk tilsatt silikastøv, som har lignende egenskaper som flygeaske og det kan antas at dette hadde innvirkning på resultatene. Trykkfasthetene for terningene med og uten fiber ble brukt i kapasitetsberegninger i oppgaven og påvirket derfor resultatene. Videre drøfting av resultater fra laboratorieforsøket gjøres i rapporten i Vedlegg A.

#### 6.1.2 Beregninger

Det var spesielt utfordrende å kombinere beregninger fra to så omfattende fagfelt som fiberarmring og spennarmering. For dimensjonering av hver enkelte metode kreves mange faktorer å ta hensyn til, flere av disse er ikke mulig å oppdrive ettersom merden er i tidlig prosjekteringsfase.



---

Ettersom det i tillegg ble begrenset med tid, og gruppens kompetanse på fagfeltene er begrenset, ble det gjort flere antakelser og avgrensinger. Det måtte til for å nå frem til problemstillingen oppgaven skal besvare.

Blant annet er det benyttet elastisitetsteori for sylindriske skall. Der det antas at konstruksjonen er i en membrantilstand, med et fritt glidende underlag. Antakelsen gir en ideell forutsetning for dimensjoneringen, men helt friksjonfritt underlag er vanskelig å oppnå i praksis. Realistisk sett er det potensiale for en viss friksjon fra veggens egenvekten mot underlaget. Grunnen til at friksjon utelukkes helt er fordi det ville ført til en beregning av 2. ordens lastvirkninger på konstruksjonen. Dette gjør at resultatene fra oppgaven passer godt med den idealiserte modellen, men at det i praksis vil være flere faktorer å ta hensyn til.

Beregningsmodellen bar på usikkerhet som derfor ble drøftet med flere av gruppens veiledere. Det ble gjort en vurdering på hva som er satt som problemstilling og hvor grundig beregningene må være for å besvare den godt nok. Det gjør at resultatet blir veldig forenklet og gir en konservativ tilnærming til realiteten.

Samtidig viser beregningene at NB38 er svært konservativ. Det blir nesten på nivå med at fiberets nytteverdi blir neglisjerbart. Fra resultater i (Arntsen og A. V. Olsen 2021) ble NB38 konkludert som mest konservativ. Den ble sammenlignet med andre europeiske standarder og viste seg å ha gjennomsnittlig lavere utnyttelsesgrad (16-27%). Grunnen antas å være at NB38 dimensjoneres som bærende konstruksjoner med styrtningsfare. Det innebærer at det ikke kan dimensjoneres med mindre en 50%

For å undersøke fiberets sine mekaniske egenskaper og påvirkninger på konstruksjonen på et mer dyptgående nivå ville det vært nødvendig å gjennomføre flere testforsøk. I tillegg er det svært hensiktsmessig å gjennomføre omfattende rissberegninger, da spesielt for tidsforløpet etter forskalingen er tatt av, men før konstruksjonen etteroppspennes (Trygstad, samtale). I dette tidsrommet vil kun fiberet fungere som armering, og forskning har vist risskontrollerende effekt i dette stadiet (Mazzoli mfl. 2015).

### **6.1.3 Sammenligning av minimumsarmering**

Minimumsarmeringen for tilfellet med fiberarmering er utført etter de metodene som er beskrevet i 3. Som nevnt i 5.3.1 er det valgt å ta utgangspunkt i den laveste verdien av de tre beregningsmetodene. Dette er fordi alle metodene gir konservative verdier som er basert på dimensjonering av stålfiberarmerte bærende konstruksjoner. Vi ser spesielt fra beregningen av minimumsarmering for skall en konservativ verdi, hvor det med denne beregningsmetoden fører til en økning i armeringsmengde. Den dimensjonerende reststrekkfastheten som benyttet i beregningen er også kraftig redusert for å ta høyde for usikkerhet rundt de mekaniske egenskapene til fiber i praksis. Dette i tillegg til at hverken EC2 eller NB38 gir retningslinjer for dimensjonering i bruddgrensetilstanden av minimumsarmering for skallkonstruksjoner i trykk, gjorde at det var rimelig å vurdere til minimumsarmeringen beregnet ut fra metoden for “vegger for øvrig” som tilstrekkelig for det fiberarmerte tilfellet.

---

#### 6.1.4 Komparativ analyse

Metoden for studien ble valgt for å undersøke endringer i materialmengde basert på styrkebidraget til fiber. CO<sub>2</sub>-utslipp tilsvarende materialbesparelsen sammenlignes og gir grunnlag for bidraget fra fiberarmeringen.

Resultatet for materialbesparelser er ikke som gruppen forventet. Det var forventet en reduksjon i veggens tykkelse som følge av fiberbidraget i moment-, og skjærkapasitet. I gjennom utarbeidelsen ble det innlysende at vi ikke kom til å få forventet resultat når det gjaldt materialbesparelser.

#### 6.1.5 Materialbruk

Ut ifra litteraturstudier tidlig i prosessen gjorde vi en antagelse om at vi ville kunne finne betydelige materialbesparelser ved å kunne dimensjonere med en tynnere vegg. Vi fant senere ut at siden konstruksjonen er påført et konstant trykk, en tilstand betong egner seg meget godt i, har fiberarmeringen ingen betydning på tykkelsen som er valgt. Dette resulterte i at det ikke er en direkte materialbesparelse i form av betong for prosjektet.

---

## 6.2 Del II: Drøfting av prosjekt

Innhenting av problemstillinger begynte allerede i oktober 2021. Etter en gjesteforelesning av Dr. Ing. Steinar Trygstad fikk gruppen kjennskap til konseptet fiberarmering. Fiberarmering var av større interesse med den vedvarende globale utfordringen med klimagassutslipp. I gjennom prosjektet har gruppen valgt en sammensatt metode for å besvare et hovedmål, gevinst ved bruk av basaltfiber i landbasert oppdrettsmerd. Ettersom det var svært varierende resultat fra prøving av basaltfiber, ble et delmål å gjennomføre et eget forsøk for å ha egne verdier å beregne utifra. Oppgaven ble formet til å omfatte tre deler: laboratorieforsøk, dimensjonering av merd og beregning av basaltfiberens innvirkning på konstruksjonens klimagassutslipp. Hensikten var innledende å unngå omfattende beregninger i stedet for å gjøre forenklete beregninger med allerede tillærte fagtekster som gruppen var kjent med. Fra disse beregningene skulle materialendringer som følge av fiberarmeringen danne grunnlag for CO<sub>2</sub>-utslippsanalysen til prosjektert oppdrettsmerd. Med en problemstilling klar begynte prosessen med litterærstudien.

Med en fullstendig dimensjonering av en oppdrettsmerd med praktisert armeringsteknologi (både etteroppspent og fiberarmert er svært lite omtalt for sirkulære skallkonstruksjoner i Norge), måtte oppgaven avgrenses betraktelig fra start. Før det ble besluttet å skrive om oppdrettsmerd, måtte litteraturgrunnlaget fastslås. Informasjon fra ulike lokale aktører i en relativt nisjebransje ble forsøkt innhentet. Det ble fra samtaler med dem og egenstudie innlysende hvor få standarder og regelverk som inkluderer bruk av fiberarmering. For sirkulære skallkonstruksjoner og spennarmering kombinert med fiberarmering var det lite fagstoff å forholde seg til. Litterærstudien til både fiber- og spennarmering ble derfor mer omfattende enn planlagt. Det er vanskelig å fastslå grunnen, men den oppfattes som sammensatt.

Delvis kommer det av varierende begrep i EC2 og NB38 når det gjelder vegg, flater og tynn skallberegninger. Samtidig er det et fagfelt som er lite utprøvd i Norge, og slike beregninger skjer derfor i stor grad manuelt, for hånd. Dette gjaldt for både etteroppspente sylindriske beholdere samt fiberarmering generelt. Det førte til ytterligere antakelser og avgrensninger. Som konsekvens førte det til at oppgaven ble mer omfattende enn planlagt fordi det ikke er spesifikke retningslinjer som fører til avgrensningene. Disse måtte oppdages i gjennom gruppens litterærstudie.

Det oppsto en større tidsbegrensning med et emne planlagt midt i kjernetiden av bachelorskrivingen. Det innebar at gruppen som helhet måtte legge fra seg bachelorskrivingen, til fordel for det sidestilte emnet. Etter emnets slutt tok det tid å på nytt sette seg inn i allerede gjennomført arbeid, som førte til atskillig lengre tidsbruk.

Som konsekvens ble mange avgjørende aspekter ved oppgaven ikke oppklart før veldig sent i prosessen. Gruppen møtte også på en utfordring med deltakelse fra enkelte i gruppen som førte til at gruppen gikk fra tre til to studenter. Gjennom prosessen har vi tilegnet oss verdifull kunnskap innen spenn- og fiberarmering som vi håper vi kan ta med oss videre i arbeidslivet. Det har vært en svært lærerik prosess, der en har utnyttet hverandres gode egenskaper. Samtidig har utarbeidelsen understreket viktigheten av å ta tak i interne problemer tidlig i prosessen.

---

## 6.3 Usikkerhet

Usikkerheten deles i tre underkategorier.

### 6.3.1 Regelverk og retningslinjer

Det er usikkerhet rundt bruken av EC2 og NB38, da ingen av disse gir klare retningslinjer for dimensjonering av tynne skall med spennarmering. Det er kun tatt utgangspunkt i disse, men tar forbehold om at metodene som er brukt på bakgrunn av disse kan gi feilaktige resultater for vår oppgave.

### 6.3.2 Utførelse

Et usikkerhetsmoment blir hvorvidt laboratorieforsøkets resultater er oppnåelig i en konstruksjon av betydelig større dimensjoner. Som NB38 presiserer legges det stor vekt på korrekt og nøyaktig utførelse under innblanding. Under gruppens forsøk var det særlig fokus på dette. Innblandingen ble nøye overvåket under hele innblandingsprosessen. Det ga et godt grunnlag til å eliminere feil.

Det vil være svært krevende å oppnå denne graden av kontroll i en oppskalert betongproduksjon. I dialog med Dyrøy Betong AS kom dette godt frem. De fremhevet at innblandingen krever spesielle maskiner tilrettelagt for basaltfibre. Etersom de ikke har slikt utstyr, kan de heller ikke lage særegne rutiner for innblanding, og de har dermed gått bort fra bruk av basaltfiber. Det er etter deres mening utførbart, men betyr en mer omfattende prosess enn konvensjonell betong. Samtidig som det innebærer økte kostnader i form av egnede maskiner.

Videre utfordring ligger i utstøpning. Spesielt viktig blir det grunnet veggens tykkelse og kabelkanalenes svært korte senteravstand. Dersom det ikke utføres riktig kan fordelingen bli anisotrop ved at det dannes opphoping av fiber og svakhetssoner. Et eksempel der dette skjer er ved bruk av stavvibrator som beskrevet i NB38. Man så at det lett oppstår soner med lavere fiberkonsentrasjon ved feil utførelse. Dette fører i verste fall til at fiberene får motsatt effekt av hva som er ønskelig og gjør konstruksjonen svakere.

### 6.3.3 Fibervirkningsgrad

Vi oppnår i testen en økning av karakteristisk trykkfasthet på 7,2MPa (tilsvarende 13%). Det finnes lite testing av basaltfiber og derav lite kvantitativ data. Men understøttende funn fra et forsøk med nesten samme fiber (43mm lang), viste at trykkfasthet økte med 2-6%. Disse forsøkene utgjør totalt 6 prøvestykker, men etter NS-EN 14889-1:2006 er det satt et minimum på tolv testforsøk for å kunne ta utgangspunkt i prøvetakingens karakteristiske verdier. Ved å ta utgangspunkt i resultater fra vårt forsøk alene innfris ikke overnevnte krav. Det foreligger derfor usikkerhet hvorvidt det er realistiske økninger.

Det foreligger også usikkerhet når det gjelder kryp og brannmotstand. For kryp er det utført

---

eksperimenter, men i såpass liten grad at det finnes lite resultater og derav ikke tilstrekkelig dokumentasjon.

NB38 veilederen tar kun utgangspunkt i stålfiber for kombinasjonsarmering. Den nevner komposittfibre som basalt, men har ikke utelukket den eksklusivt. Men den må fortsatt deklarerer ihht. gjeldende standarder som CE-sertifisering eller evt. teknisk godkjenning. Det innebærer også at basaltfiberens egenskaper ved langtidsbelastning må kunne dokumenteres.

Relatert til basaltfiberens brannmotstand viser funn fra Å. L. Døssland 2008 at makrofibre har en ulempe grunnet deres lave smeltepunkt. Det beregnes derfor som at hele effekten til fibrene forsvinner i et brannscenario. For valgt basaltfibre har man i selve basalten god brannmotstand, men overflatebehandlingen i vinylester ikke har tilsvarende motstand. Det er ikke dokumentert hvorvidt det får konsekvenser for fibrenes virkning, men basert på avvikende brannmotstander betyr det usikkerhet.

#### **6.3.4 Utslippsanalyse**

Avgrensingene i LCA-analysen utelukker svært viktige deler av alle materialenes totale livssløp. Det gir et grunnlag for et veldig smalt tidsforløp av materiale og gir rom for usikkerhet. Spesielt blir

## Kapittel 7

# Konklusjon

Denne bacheloroppgaven har studert miljøgevinst ved bruk av basaltfiberarmering i en prosjektert oppdrettsmerd. Utarbeidelsen er basert på gjeldende regelverk i EC2, utført laboratorieforsøk og retningslinjer gitt i NB38. Eventuelle miljøgevinst er beregnet ut fra materialenes CO<sub>2</sub>-utslipp. Resultatet viser at basaltfiber har potensialet til å redusere mengden minimumsarmering. Det er også en mindre reduksjon i mengde betong, men den største miljøgevinsten kommer i form av redusert minimumsarmering. Men for å få et mer nøyaktig bilde av et totalt karbonfotavtrykk og materialbesparelse trengs det en mer omfattende livsløpsanalyse og dimensjonering av hele konstruksjonen som inkluderer rissviddeberegninger og laboratorieforsøk.

For beregning med fiberarmering ble NB38 fulgt som beregningsveileder. Fra resultatet i beregninger synliggjøres NB38's konservative tilnærming til dimensjonerende verdier. Spesielt for skall ga NB38 så konservative dimensjonerende faktorer at fibervirkningen endte opp med å gi økt mengde minimumsarmering. NB38 kan med fordel utvides til å omfatte flere beregningsmetoder som er dekkende for flere konstruksjonsløsninger.

Videre resultater kom fra testforsøk av trykkfasthet. I testen viste de fiberarmerte terningene en relativt høy økning i karakteristisk trykkfasthet. Resultatet fra forsøket antas å komme fra basaltfiberne. Men det er fortsatt forbundet med usikkerhet til hvorvidt fiberne alene utgjør økningen eller som en kombinasjon med andre faktorer i forsøksprosessen.

Ytterligere resultater kom fra beregning av momentkapasitet. Momentkapasitet økte ved bruk av fiberarmering i konstruksjonen. Ettersom beregninger viste at det ikke oppstår dimensjonerende momentkrefter, blir kapasitetsøkningen mindre synlig. Men det er styrkebidrag som kommer utelukkende av basaltfiberen som kan være gunstig for andre typer konstruksjonsløsninger.

## Kapittel 8

# Forslag til videre arbeid

For videre arbeid anbefales:

- fiberens påvirkning på rissdannelse i tidlig fase og påvirkning på risslast.
- Fra tidligere tester ihht. NS-EN 14651, fremkommer det stor variasjon i resultater oppnådd. Det vil derfor være fordelaktig å gjennomføre flere forsøk, slik at det gir karakteristiske verdier som er basert på kvantitativ data.
- Etterprøving av trykkfasthetstesting på tilsvarende basaltfiber. Det vil være interessant å få flere målinger som kan bekrefte eller avkrefte økningen på 14% eller tilsvarende.
- Dimensjonering av oppgavens illustrerte spennarmeringssystem. Det kan være av stor interesse å finne økningen i skjærkapasitet ved bruk av basaltfiber. kan redusere mengden skjærarmering
- Sammenstille et formelverk som kan benyttes direkte til beregning av sylindriske skall.
- Dimensjonering av bunnplate og teknisk løsning for overgang til vegg.
- undersøke fiberens virkning på skjærkapasitet i ankerfestene til spennarmeringen.
- Kostnadsanalyse av den totale fremdriften og om den effektiviseres ved bruk av fiberarmering.

# Bibliografi

- Arntsen, Eirik Svartsund og Alexander Vanberg Olsen (2021). «Etteroppspente flatdekker med fiberarmering». Masteroppg. NTNU.
- Bell, Kolbein (2015). *Konstruksjonsmekanikk : D. 2 : Fasthetslære*. ISBN: 9788245018486 Place: Bergen Volume: D. 2.
- Bengtsson, Johan og Daniel Sigström (2007). «Stålfiberarmerad betong-En økonomisk jämförelse». B.S. thesis. Chalmers University of Technology.
- Bentur, Arnon og Sidney Mindess (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press.
- Béton, FIB-Féd Int du (2016). *Fibre-reinforced concrete: From design to structural applications: ACI-fib workshop proceedings*. Bd. 79. FIB-Féd. Int. du Béton.
- Betong : regelverk, teknologi og utførelse* (2015). ISBN: 978-82-8021-126-2 Place: Oslo.
- Betongforening, Norsk (2011). *Bestandighet av betongkonstruksjoner i marint miljø*. [https://betong.net/wp-content/uploads/woocommerce\\_uploads/NB-Publikasjon-35-ruh4xe.pdf](https://betong.net/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/NB-Publikasjon-35-ruh4xe.pdf).
- Dyrøy Betong AS, Østfoldforskning AS (Hentet: 10.05.2022). *EPD Betong B35*. [https://www.epd-norge.no/getfile.php/1310221-1641830670/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-1746-719\\_B-35-M-45-22mm.pdf](https://www.epd-norge.no/getfile.php/1310221-1641830670/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-1746-719_B-35-M-45-22mm.pdf).
- Døssland, Åse Lyslo (2008). «Fibre reinforcement in load carrying concrete structures: laboratory and field investigations compared with theory and finite element analysis». I.
- ecoinvent (Hentet 18.04.2022). *Ecoinvent Impact Browser*. <http://eibrowser.indecoll.no/>.
- Eurokode 2-1-1* (2021). Nor. 1992-1-1:2004+NA:2021 Prosjektering av betongkonstruksjoner. : Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger = Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Oslo: Standard Norge.
- fiskeridepartementet, Nærings- og (Hentet 07.02.2022). *Norge som produsent av bærekraftig mat globalt*. <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/fiskeri-og-havbruk/Norsk-havbruksnaring/id754210/>.



- 
- Ha, Duy Quang (2019). «Effekt av basaltfiber for betongkvalitet= Effect of basalt fiber for quality of concrete». Masteroppg. UiT Norges arktiske universitet.
- Jamshaid, Hafsa og Rajesh Mishra (2016). «A green material from rock: basalt fiber – a review». I: *The Journal of The Textile Institute* 107.7. Publisher: Taylor & Francis \_eprint: <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>, s. 923–937. DOI: 10.1080/00405000.2015.1071940. URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>.
- Kanstad, T mfl. (2020). «Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner». I: *Norsk betongforening*.
- Kanstad, Terje, Dan Arve Juvik mfl. (2011). «Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner. FA 2 Competitive constructions. SP 2.2 High tensile strength all round concrete». I.
- Kanstad, Terje og Steinar Trygstad (2014). «Design, testing and evaluation of a fullscale post-tensioned steelfibre reinforced flat slab». I: *NORDIC CONCRETE RESEARCH* 50.2, s. 211–214.
- Lövgren, Ingemar (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction—a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Chalmers Tekniska Högskola (Sweden).
- Malmo, Cathrine Johansson og Helene Østebøvik Olsen (2017). «Etteroppspente flatdekker med fiberarmering». Masteroppg. NTNU.
- Mazzoli, Alida, Saveria Monosi og Eleonora Stella Plescia (2015). «Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods». I: *Construction and Building Materials* 101, s. 596–601. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305110>.
- miljødepartementet, Klima- og (Hentet 08.02.2022). *Norges klimamål*. <https://www.regjeringen.no/no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/>.
- Mohagheh, Ali (2016). «Use of Macro Basalt Fibre Concrete for Marine Applications». Ph.d.-avh. KTH Royal Institute of Technology.
- Nawy, Edward G (2010). *Prestressed concrete : a fundamental approach*. eng. Upper Saddle River, N.J.
- NS-EN 14651 (2007). Eng. NS-EN 14651:2005+A1:2007 Prøvmingsmetode for betong med metalliske fibre - Måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter) = Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Oslo: Standard Norge.

- 
- Nygaard, Ole Andreas (2017). «Beregning av sylindriske skall og flenser, håndberegningmetoder versus FEM». Masteroppg. Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Qin, Xiao mfl. (2018). «Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers». I: *Construction and Building Materials* 159, s. 508–516. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817322225>.
- ReforceTech (Hentet 27.04.2022). *Minibars*. <https://reforcetech.com/wp-content/uploads/2016/12/Basalt-MiniBars.pdf>.
- ReforceTech AS, Østfoldforskning AS (Hentet: 10.05.2022). *EPD RFT Basalt minibars*. [https://www.epd-norge.no/getfile.php/1322213-1642529635/EPDer/Byggevarer/St%20C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-3317-1954\\_Basalt-MiniBars-TM%281%29.pdf](https://www.epd-norge.no/getfile.php/1322213-1642529635/EPDer/Byggevarer/St%20C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-3317-1954_Basalt-MiniBars-TM%281%29.pdf).
- Salice, Veronica Eek, Bendik Selmer-Anderssen Kråkenes og Bjørnar Hognestad Fauske (2021). «Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner: Beregningsmodeller og eksperimentelle undersøkelser». Masteroppg. University of Agder.
- snl (Hentet 16.04.2022). *spennbetong i Store norske leksikon*. <https://snl.no/spennbetong>.
- snl, Jan Vincent Thue (Hentet 16.04.2022). *armeringsstål i Store norske leksikon*. <https://snl.no/armeringsstål>.
- snl, Misund Bård (Hentet 11.02.2022). *Fiskeoppdrett i Norge*. <https://snl.no/fiskeoppdrett>.
- Spenneteknikk (2011). *BBR VT CONA Single Spennetausystem*. <https://www.spenneteknikk.no/wp-content/uploads/2018/05/BBR-VT-CONA-Single-spenntausystem-24022011.pdf>.
- Sørensen, Svein I (2017). *Betongkonstruksjoner : beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. nob. Bergen.
- Tøgersen, Thomas André (2015). «Beregningmetoder for skallkonstruksjoner». Masteroppg. NTNU.
- Wang, Xin, Xing Zhao og Zhishen Wu (2019). «Fatigue degradation and life prediction of basalt fiber-reinforced polymer composites after saltwater corrosion». I: *Materials & Design* 163, s. 107529. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518308724>.

Tillegg A

# Laboratorierapport

# Laboratorieforsøk av basaltfiber-armerte bjelker

Jan-Erik Haraldsen Lu, Jul Kristian Notø Karlsen, Jonas Krogh Fevang

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for havoperasjoner og byggtknikk, Ålesund, vår 2022

## Sammendrag

Laboratorieforsøket målte og beregnet restbøyestrekfastheten til seks 10kg/m<sup>3</sup> basaltfiber-armerte bjelker, samt trykkfastheten til tre basaltfiber-armerte kuber og tre uten fiberarmering. De basaltfiber-armerte bjelkene ble klassifisert som B45 M40 R3,0c, selv om betongresepten var for trykkfasthet B35 M40. Restfasthetsklasse og duktilitetsklasse R3,0c er et godt resultat, som viser at basaltfiberarmeringen tar opp strekkrefter og fordeler strekkspenningen på samme vis som annen fiberarmering. Resultatet tilsier at type og mengde basaltfiber brukt i dette forsøket kan brukes ved bærende konstruksjoner for fasthetsklasser B12-B90. Forsøket inneholder to nevneverdige feilkilder som kan påvirke resultatet med ukjent effekt.

## Innledning

Laboratorieforsøkets hensikt er å måle restbøyestrekfastheten til basaltfiber-armerte bjelker, i sammenheng med bacheloroppgave skrevet våren 2022. Basaltfiber korroderer ikke og kan derfor være gunstig for betong eksponert for klorider. Dette forsøket er gjennomført i henhold til NS-EN 14651:2005+A1:2007 - prøvingsmetode for betong med metalliske fibre, måling av bøyestrekfasthet. Vi har valgt å teste restbøyestrekfastheten til B35 M40 støpte bjelker med 10kg/m<sup>3</sup> 55mm «minibars 32mm helix» basaltfiber. Basaltfibrene er produsert av ReforceTech og har vært tilgjengelige for oss til å utføre dette forsøket. I henhold til NS-EN 14651 vil det støpes seks like bjelker, med samme mengde basaltfiber. Det blir også støpt tre kuber på 100mm x 100mm x 100mm med basaltfiber og tre uten for å klassifisere betongbjelkene, samt måle ulikheten i fastheten til betongen, i henhold til NS-EN 12390-3:2019.

Blanding og støping av bjelker ble foretatt 7. Februar 2022 ved NTNU Gjøvik sitt betonglaboratorium. Forsøket ble veiledet av Laboratorieansvarlig Tor Kristoffer Klethagen, som tidligere har utført samme forsøk i henhold til NS-EN 14651. Testing og måling av bjelkene ble foretatt 7. Mars ved NTNU Gjøvik, også veiledet av Tor Kristoffer Klethagen.

## Teori

CMOD = Crack mouth opening displacement, slisse-munnåpningens forskyvning.

$CMOD_j$  = CMOD i punkt j, (j = 1,2,3,4).

Restbøyestrekfastheten er gitt ved

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

der  $f_{R,j}$  er restbøyestrekfastheten som samsvarer med  $CMOD_j$  (j = 1,2,3,4), i Newton per kvadratmillimeter.  $F_j$  er lasten som samsvarer med  $CMOD_j$  (j = 1,2,3,4), i Newton.  $l$  er lengden til bjelken, i millimeter.  $b$  er bredden til bjelken, i millimeter.  $h_{sp}$  er avstanden fra slissen til topp av bjelke.

Karakteristisk restbøyestrekfasthet er gitt ved:

$$f_{R,jk} = f_{R,j} - k \cdot s$$

Der  $s$  er standardavviket og  $k = 1,7$  i henhold til Norsk Betongforenings publikasjon nr. 38 - fiberarmert betong i bærende konstruksjoner.

NB38 4.1 tillater kun å bruke opptil 60 % av midlere restbøyestrekfasthet,  $f_{R,1m}$  og  $f_{R,3m}$ , for å ikke oppnå for gunstige resultater fra spredning i fasthet fra bjelkeforsøk. Verdien på midlere restbøyestrekfasthet forutsettes kjent, og de beregningsmessige restbøyestrekfasthetene blir dermed:

$$f_{R,1,kb} = \min(f_{R,1k}, 0,6 \cdot f_{R,1m})$$

$$f_{R,3,kbe} = \min(f_{R,3k}, 0,6 \cdot f_{R,3m})$$

Midlere restbøystrekkfasthet er gjennomsnitt av restbøystrekkfasthet for gjennomførte tester.

Når restbøystrekkfasthet bestemmes, er bøyemomentet beregnet, basert på lineær spenningsfordeling. Dette gjenspeiler ikke reel oppførsel i det tverrsnittet opprisser, og beregnet restbøystrekkfasthet kan dermed ikke benyttes direkte i beregning.

Karakteristisk enaksiell reststrekkfasthet bestemmes iht. NB 38 som:

$$f_{ftsk,res}=0,45 \cdot f_{RK,1} - \text{Bruksgrensetilstanden}$$

$$f_{ftuk,res}=0,37 \cdot f_{RK,3} - \text{Bruddgrensetilstanden}$$

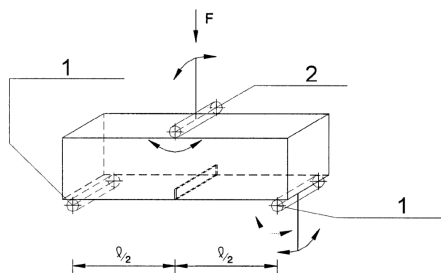
Videre benyttes det en effektiv restbøystrekkfasthet som tar hensyn til fiberorientering ved å beregne med en fiberorienteringsfaktor  $\kappa_0$  som settes til 1,0 eller 0,5 avhengig av konstruksjonen. For vegger settes normalt  $\kappa_0$  til 0,5.

$$f_{Fts,ef} = \kappa_0 \cdot f_{ftsk,res}$$

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_0 \cdot f_{ftuk,res}$$

Reststrekkfastheten brukes sammen med NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 til å klassifisere fiberarmert betong.

Testing av restbøystrekkfasthet gjennomføres ved å bruke en en-aksiell strekk- og trykkprøvemaskin der midtpunktet av bjelken påføres trykkrefter ovenfra. Bjelken vil forskyves nedover med en konstant fart på 0,05mm/minutt frem til 0,1mm er forskjøvet. Deretter økes farten til 0,2mm/minutt, og varer frem til 4mm er forskjøvet. Trykkreftene som trengs for å forskyve bjelken vil variere underveis og måles kontinuerlig med fem datapunkter i sekundet.



Figur 1 - Trykkpresse for testing av restbøystrekkfasthet.

Fire ulike forskyvningspunkter er her brukt for å sammenligne bjelkenes last-verdier.

CMOD,1	=	0,5mm	forskyvning
CMOD,2	=	1,5mm	forskyvning
CMOD,3	=	2,5mm	forskyvning
CMOD,4	=	3,5mm	forskyvning

Endelig klassifisering av betong vil ta utgangspunkt resultat i CMOD,1 og CMOD,3. Restfasthetsklassifisering settes etter resultat fra 0,5mm forskyvning, og duktilitetsklasse gis ved  $\frac{f_{R,k3}}{f_{R,k1}}$  i henhold til tabell 2.2 i Norsk

Betongforenings publikasjon nr. 38. Etter blanding og støping skal basaltfiberen være isotropt fordelt for best mulig resultat. Dette sikres ved å løse opp fiberoppsamlinger før støping.

## Metode og verktøy

### Blanding og støping av betong, 7. Februar.

Utstyr: Materialer og tilsetningsstoffer fra betongresepten, frittfalls-betongblander, tidtaker, vernebriller, hørselsvern, hansker, murskje, beholdere for tilslag, tralle til beholdere, 6stk 150mm x 150mm x 600mm støpeformer, 6stk 100mm x 100mm kubiske støpeformer, forskalingsolje, avrettingsbrett og dekkplast.

Betongresept for 93 liter ferdigblandet B35 M40, samt nødvendig materialer ble gitt til oss av Tor Kristoffer Klethagen ved NTNU Gjøvik.

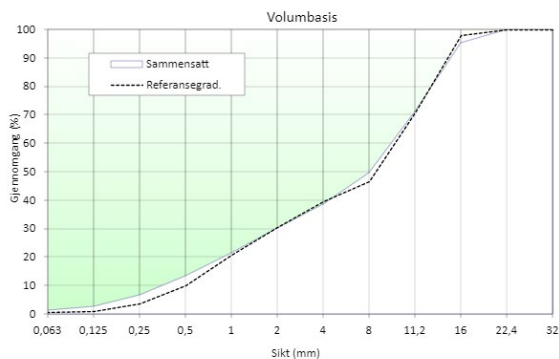
Tabell 1 - Betongresept

Materialer	kg/m <sup>3</sup>
Norcem standard FA (sement)	30,676
Eikem Microsilica	1,615
Fritt vann	17,404
Absorbent vann	1,223
Årdal 0/8mm nat.vask (sand)	77,645
Årdal 8/16mm (tilslag)	90,565
Mapei Dynamon SX-N (superplastiserende)	0,258
MiniBars 55mm (basaltfiber)	0,977

Siktekurve for tilslag ble gitt av produsent.

Tabell 2 - Sammensetting av tilslag

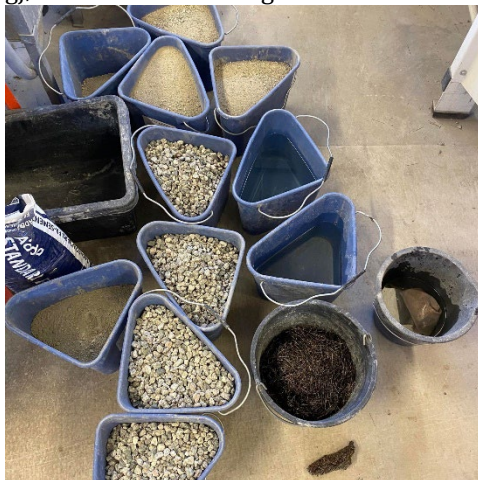
Åpning	Gjennomgang		Ref.gad. vol.[%]	Vekt ved tilpasning
	vol.[%]	vekt [%]		
32	100,0	100,0	100,0	1
22,4	100,0	100,0	100,0	1
16	95,2	95,1	97,9	1
11,2	71,3	71,1	70,8	1
8	49,8	49,5	46,6	1
4	38,7	38,4	39,5	1
2	30,3	30,1	30,7	1
1	21,5	21,4	20,7	2
0,5	13,3	13,2	10,2	2
0,25	6,9	6,8	3,8	2
0,125	2,6	2,6	1,2	2
0,063	1,4	1,4	0,6	2



Figur 2 - Siktekurve

Sementblander skal gå i 5 minutter, deretter varierende tid ved tilsetning av basaltfiber.

- a. Alt til blandingsresepten veies opp og gjøres klar i egne beholdere.



Figur 3 - Materialer ferdig veid og i egne beholdere før miksing.

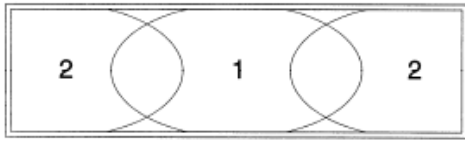
- b. Fuktig klut ble brukt for å mette betongblander, hvis ikke vil denne tiltrekke seg fukt fra sementblandingen.
- c. 90% av 8-16mm tilslag og sement, 25% av sand og 75% av vannet ble tilsatt.
- d. Blanderen ble startet i en tiltet posisjon. Vi starter tidtaking. Sand ble tilført videre i porsjoner på 25% hver, hvor blanderen går noen runder mellom hver. All sand er nå tilført.
- e. Silica ble tilført. Estimerte 2 gram silica ble mistet ved tilføring.
- f. Superplastiserende tilsetningsstoff ble tilført.
- g. Stoppet og løste opp ublandede klumper.
- h. Resten av materialer ble tilsatt.
- i. Blanderen ble stoppet når det hadde gått 5 minutter, noen klumper ble løst opp, og deretter blandet i 2 minutter.
- j. Sementmiksen er godt blandet, det støpes tre kuber **uten** basaltfiber. Disse ristes for å frigjøre eventuelle hulrom av luft
- k. Betongblander startes igjen, og basaltfiberen blir «strødd» inn. Det er viktig at disse fordeles rolig i små håndfuller og ristes fra hverandre for å oppnå isotrop fordeling.



Figur 4 - Basaltfiber tilsettes i frittfalls-blander.

- l. Støpeformer strammes og smøres med forskalingsolje.
- m. Sementmiksen helles over i en stor beholder og trilles på bære til bord der former er forberedt.
- n. Det støpes tre kuber **med** basaltfiber. Disse ristes for å frigjøre eventuelle hulrom av luft.
- o. De seks bjelkene med basaltfiber støpes. Disse fylles på følgende måte.

1. Punkt en fylles først med to fulle skuffer.
2. Punkt to fylles med en full skuff.
3. Fortsetter med beskrevet metode til formen er nesten full.



Figur 5 - fordelingsinstruksjon til basaltfiber-armert sementmiks.

- p. Formene ristes 10 ganger med kraftig store bevegelser, deretter toppes siste del av formen med sementmiksen og avrettes med avrettingsbrett.



Figur 6 - Formene er fylt og avrettes med et avrettingsbrett.

- q. Betongen herder i en time, før det legges plast over.
- r. Etter 24 timer fjernes plasten og kubene og bjelkene tas ut av formene, merkes, og legges i et vannbad som holder  $22 \pm 2$  grader celsius.

#### Kapping av spor utført 4. Mars.

Utstyr: Vernebriller, hørselsvern, vannavkjølt bord betongsag, tynn sprittusj, meterstokk, høydemal 125mm og 2stk avstandsklosser 100mm.

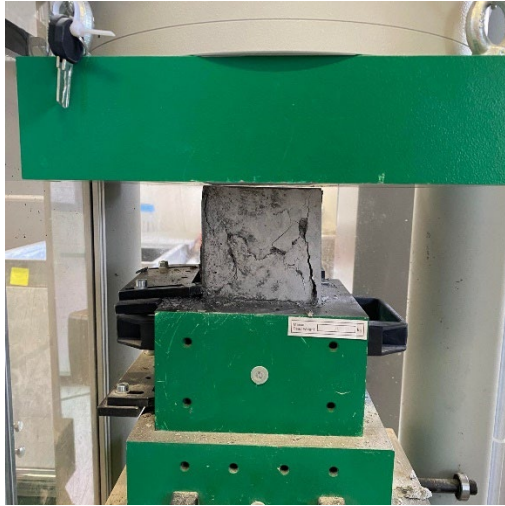
- a. Plasser høydemalen på sagen, før sagbladet ned til malen og lås sagbladet på plass.
- b. Fjern høydemalen og legg på avstandsklossene på sagebrettet.

- c. Bjelken som kappes legges på sagebrettet. Bjelken legges på siden med støpeflate mot sagbladet.
- d. Måler 30cm fra en av kortendene på siden nærmest sagbladet og merk med tusj.
- e. Før sagebrettet mot sagbladet til betongen har kontakt med sagbladet og plasser sagbladet i senter av tusjstreken.
- f. Brettet føres tilbake, start sagen og sett på vann.
- g. Hold fast i bjelken og før sagebrettet sakte mot sagbladet.
- h. Sagebrettet føres frem til det stanser og føres rolig tilbake til start. Sagen stanses og bjelken legges tilbake i vannbad.
- i. Steg a – h gjentas for alle bjelker.

#### Testing av bjelker og kuber, 7. Mars.

Utstyr: Vernebriller, Blyant, digital skyvelære 300mm, dor, hammer, målebånd, målestokk, vinkel i metall, registreringsskjema, 17mm fastnøkkel, 2stk 10mm nedbøyingsensorer, pc for styring av presse, pc for styring av sensorer, rigg til montering av nedbøyingsensorer, aluminiumsplate, CATMAN DAQ 800E.

- a. Bjelkene tas opp fra vannbad 1 time før de skal testes, med spor på siden så vannet renner ut.
- b. Kubene tas opp samtidig og lufttørker i 30 minutter før testing.
- c. Presseprogram og sensorprogram (CATMAN DAQ 800E) blir klargjort av laboratorieansvarlig Tor Kristoffer Klethagen.
- d. Kuben legges inn i prøveavlukket med støpeflaten på siden.
- e. Døren lukkes, og pressen kjører til brudd.



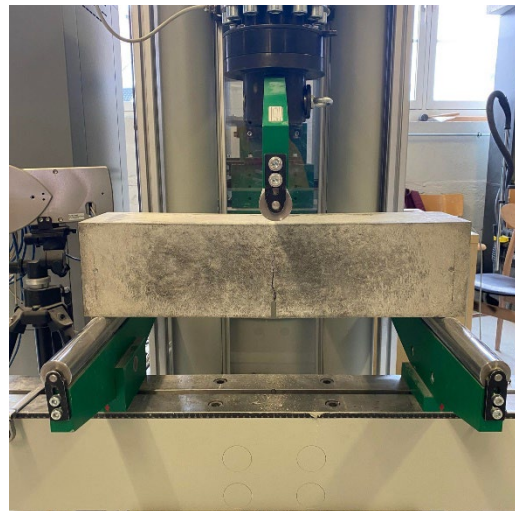
Figur 7 - Bildeeksempel av ferdig utført trykktest av kube.

- f. Resultat blir registrert, kubene tas ut og kontrolleres.
- g. Steg d-f gjentas for alle seks kuber.
- h. Bredder og slissehøyde måles med skyvelære på begge sidene av bjelken og registreres i skjema.
- i. Målebånd brukes for å måle lengden, 27,5cm fra slisse og utover mot begge ender, setter merke.
- j. Vinkelen brukes til å forlenge mot midten av bjelken.
- k. Målestokk brukes til å måle 7,5cm i bredderetning fra siden med sporet og mot midten av bjelken. Vinkel brukes for å forlenge sentermerket i lengderetning.
- l. Plasser dor i strekkrysset og gi det et slag med hammeren. Et lite krater på 3-4mm lages.
- m. Dataprogrammet programmeres i henhold NS-EN 14651, for å utføre test på bjelken.
- n. Bjelken plasseres i nedbøyingpressen med sporet ned og sentrert på opplagre og under kraftarmen.
- o. Rigg monteres og festes i krafter for stabilitet.
- p. Nedbøyingssensorer festes inn i griperen på riggen og kontrolleres at ligger inntil aluminiumsplatene.



Figur 8 - Bildet av bjelke klar til test. Rigg montert, sensorer justert til kontakt med aluminiumsplate.

- q. Pressen starter og registrer 5 datapunkter per sekund, til 4mm forskyvning er utført, ca. 22 minutter.
- r. Når testen er ferdig demonteres riggen og settes til side.



Figur 9 - Bildet av bjelke etter utført test, merk rissdannelse fra slisse mot topp.

- s. Steg h-r gjentas for alle seks bjelker.

## Resultat og drøfting

Kubene uten basaltfiber målte i gjennomsnitt 51,28Mpa, kubene med basaltfiber målte i gjennomsnitt 58,46Mpa, det er en økning på 14,0%. Den karakteristiske trykkfastheten var henholdsvis 48,0MPa og 56,5MPa. I henhold til NS-EN 1992-1-1+NA kategoriseres betongen uten basaltfiber som B40, og betongen med basaltfiber som B45. Dette er over vår B35



betongresept, og antas å være grunnet fiberarmeringen i betongen.

Tabell 2 - Resultat av trykktest av terninger med og uten basaltfiber.

Terning	Basaltfiber	Fasthet (MPa)	Karakteristisk trykkfasthet (MPa)
1	uten	49,9	51,3
2	uten	53,0	
3	uten	50,9	
4	med	59,3	58,5
5	med	58,7	
6	med	57,4	

Tabell 3 - Vekt og mål av terningene iht. NS 12390

Terning	Vekt luft	Vekt vann	Trykkflate(cm <sup>2</sup> )
1 (uten)	2386,1	1369,8	100
2 (uten)	2392,3	1376	100
3 (uten)	2400,7	1383,5	100
4 (med)	2387,6	1362,9	100
5 (med)	2359,5	1342,6	100
6 (med)	2360,6	1342,1	100

Bjelkene ble støpt i 150mm x 150mm x 600mm, men noe avvik er forventet. Bredden og slissehøyde brukes til å finne restbøyestrekfastheten, derfor er målene til registrert før testing. Lengden til selve bjelken brukes ikke til å finne restbøyestrekfastheten, men den må være ha lengde fra 550mm til 700mm for å gjennomføre målingene. Slissehøyden avviker fra krav i NS-EN 14651:2005+A1:2007, men beregningsformel tar i bruk målt slissehøyde.

Tabell 4 - Mål av bredde og slissehøyde på begge sider av bjelkene.

Mål av bjelker	Bredde,1	Bredde,2	Høyde,1	Høyde,2
Bjelke 1	149,4	150,4	122,3	123,0
Bjelke 2	150,3	149,8	122,9	122,5
Bjelke 3	150,3	149,1	123,2	122,4
Bjelke 4	150,3	150,2	123,0	122,7
Bjelke 5	151,3	151,3	122,8	123,3
Bjelke 6	150,6	149,5	123,1	123,7

Bjelkene sin last ved ulik CMOD,j, vises i tabell 5.

Tabell 5 - Last (kN) målt ved CMOD,j (1,2,3 og 4).

Last (kN) ved CMOD,j	CMOD,1	CMOD,2	CMOD,3	CMOD,4
Bjelke 1	11,49	12,26	12,13	10,09
Bjelke 2	10,64	10,9	10,38	8,9
Bjelke 3	11,17	10,7	10,2	9,1
Bjelke 4	9,73	11,88	10,35	8,77
Bjelke 5	10,11	10,95	10,44	9,13
Bjelke 6	11,77	12,1	12,17	10,32

Restbøyestrekfastheten er gitt ved

$$f_{R,j} = \frac{3f_{jl}}{2bh_{sp}^2}$$

Denne kan vi nå anvende for å finne restbøyestrekfastheten i CMOD,j. Resultatene ved CMOD,1 og CMOD,3 fører til klassifisering som restfasthetsklasse 3,0, og duktilitetsklasse c, i henhold til klassifisering av fiberarmert betong i Norsk Betongforenings publikasjon nr 38. Betongen klassifiseres altså som **R3,0c**.

Tabell 6 - Restbøyestrekfastheten til Bjelke 1-6 ved CMOD,j.

Restbøyestrekfasthet (MPa) ved CMOD,j	CMOD,1	CMOD,2	CMOD,3	CMOD,4
Bjelke 1	3,82	4,08	4,04	3,36
Bjelke 2	3,53	3,62	3,45	2,95
Bjelke 3	3,71	3,56	3,39	3,02
Bjelke 4	3,22	3,93	3,42	2,90
Bjelke 5	3,31	3,58	3,42	2,99
Bjelke 6	3,86	3,97	4,00	3,39
Gjennomsnitt	3,58	3,79	3,62	3,10

Tabell 7 viser restbøyestrekfastheten med tilhørende karakteristisk restbøyestrekfasthet ved CMOD,j. De beste resultatene ble oppnådd ved CMOD,2 med en karakteristisk restbøyestrekfasthet på 2,27MPa.

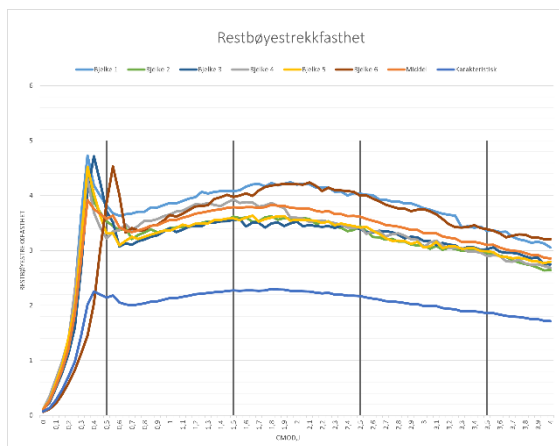
Tabell 7 - Gjennomsnittlig restbøyestrekfasthet, standardavvik, karakteristisk- og beregningsmessig restbøyestrekfasthet ved CMOD,j.

Restbøyestrekfasthet (MPa) ved CMOD,j	CMOD,1	CMOD,2	CMOD,3	CMOD,4
Midlere restbøyestrekfasthet	3,58	3,79	3,62	3,10
Standardavvik	0,25	0,21	0,28	0,20
Karakteristisk restbøyestrekfasthet	3,16	3,43	3,14	2,76
Beregningsmessig restbøyestrekfasthet	2,15	2,27	2,17	1,86

Testingen av basaltfiber-armerte betongkuber og bjelker resulterer i en endelig klassifisering **B45 M40 R3,0c**.

## Drøfting

Figur 9 er en grafisk fremstilling av bjelkene sin beregnede restbøyestrekfasthet, samt den karakteristiske restbøyestrekfastheten. Grafen viser et relativt jevnt resultat for de ulike bjelkene, som antyder at miksing og støping var jevnt, og at vi har oppnådd nær isotropisk fordelt basaltfiber-armering i bjelkene.



Figur 10 - Graf for restbøyestrekfastheten og karakteristisk restbøyestrekfasthet fra CMOD 0mm til 4mm.

Et minstekrav for å utnytte fiberbetong i bærende konstruksjoner i henhold til Norsk Betongforenings publikasjon nr. 38 er at karakteristisk restbøyestrekfasthet ved 0,5mm forskyvning tilsvarer minimum 50% av fasthetsklassens karakteristiske strekkfasthet. Dette tilsier at resultatet fra forsøket, med klassifisering R3,0c ved bruk av 10kg/m<sup>3</sup> 55mm basaltfiber vil kunne brukes til bærende konstruksjoner i fasthetsklasse B12-B90.

Resultatet tilsier at basaltfiber-armering i betong kan brukes for å øke fasthetsklassen til betongen, samt vil sinke prosessen av større rissdannelser ved fordeling av strekkspenninger.

På bakgrunn av egne erfaringer fra dette forsøket med blanding og støping av basaltfiber-armert betong bør det bemerkes at dette er en krevende prosess som kan være spesielt utfordrende på større skala. Basaltfiber klumper seg raskt sammen, noe som førte til at vi flere ganger måtte løse opp fiberklumper for å sikre isotrop fordeling av fiberen.

## Feilkilder

Estimerte 1-2 gram silica ble mistet når det skulle mikses inn i frittfalls-blanderen. Dette utgjør <0,2% og vil påvirke betongresepten og den endelige betongen minimalt. Dette ansees som neglisjerbart i dette tilfelle.

Estimerte 0,5kg sement satt fast i bunn av frittfalls-blanderen når støpingen av kubene var utført og bjelkene påbegynt. Klumpen ble løsnet og sementmiksen i bjelkeformene ble tømt tilbake i blanderen. Det ble blandet videre og deretter tømt tilbake i bjelkeformer. Det er ikke forventet avvik i den ferdig støpte betongen av dette. Kubene var allerede fordelt med og uten basaltfiber, og ved å ikke tømme tilbake sementmiksen med basaltfiber vil vi få en gyldig test av forskjell i fasthet mellom basaltfiber-armerte kuber og ikke. Det vil samtidig si at resepten ikke vil gi samme resultat ved senere anledning, siden avviket av sement var >1,5%. Klassifisering av betongbjelkene er også påvirket av denne feilkilden, ettersom trykkfastheten til kubene er grunnlag for klassifiseringen. Det er samtidig ikke forventet lavere trykkfasthet, ettersom v/c tallet øker og trykkfastheten minker ved mindre sement.

I henhold til NS-EN 14651:2005+A1:2007 skal avstanden fra slissen til topp av bjelke være 125mm ± 1mm. Våre bjelker har hatt varierende slisse til topp avstand fra 123,7mm til 122,3mm. Det vil si at ingen av våre bjelker oppfyller kravet. Det er usikkert hva som har hendt under kapping av slissene, men uansett har det hatt en ukjent påvirkning på resultatene våre.

## Konklusjon

Det er bevist at basaltfiber tar opp strekkrefter i betongelementer, figur 9 viser visuelt denne egenskapen, med bjelkene i dette forsøket som eksemplarer. Dette kan videre sammenlignes med andre fibertyper. Testene av kuber viste at trykkfastheten økte fra klasse B40 til B45 ved bruk av basaltfiber, og var positivt overraskende. Bjelkene klassifiseres som B45 R3,0c. Restfasthetsklasse og duktilitetsklasse R3,0c er et godt resultat, og det ble kun brukt 10kg/m<sup>3</sup> basaltfiber i dette forsøket. Det kan forventes en høyere restfasthetsklasse ved å øke mengde basaltfiber-armering til eksempelvis 20kg/m<sup>3</sup>.

Resultatet viser at 10kg/m<sup>3</sup> 55mm basaltfiber kan brukes i bærende konstruksjoner. Dette er spesielt lovende siden det er videre mulig å øke mengden basaltfiber per kubikkmeter, som antakeligvis vil resultere i en høyere restfasthetsklasse.

Det må påpekes at det det er en feilkilde mellom betongen til de støpte kubene og bjelkene, der det er estimert at ca. 0,5kg sement ikke ble mikset inn før støpingen av kubene. Slissen på bjelkene er også ikke i henhold til krav NS-EN 14651, og har også påvirket resultatet oppnådd her, med ukjent effekt.

## Referanser

NS-EN 14651:2005+A1:2007

NS-EN 12390-1:2021

NS-EN 12390-2:2019

NS-EN 12390-3:2019

Norsk Betongforenings publikasjon nr. 38

NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021

NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2021

---

# Vedlegg

## A - Utvidet resultatark fra test av bjelker.

CMOD_j	CMOD(mm)	Last(kN)	Last(kN)	Last(kN)	Last(kN)	Last(kN)	Last(kN)	Restbøystre	Restbøystre	Restbøystre	Restbøystre	Restbøystre	Restbøystre	Gjennomsnitt	Standard avvik	K	1,7	Karakteristisk
		Bjelke 1	Bjelke 2	Bjelke 3	Bjelke 4	Bjelke 5	Bjelke 6	ekkkfasthet Bjelke 1	ekkkfasthet Bjelke 2	ekkkfasthet Bjelke 3	ekkkfasthet Bjelke 4	ekkkfasthet Bjelke 5	ekkkfasthet Bjelke 6					
		0,00	0,32	0,32	0,34	0,35	0,20	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,07	0,10	0,02	0,07	0,07	
		0,05	0,83	0,94	0,69	1,04	0,83	0,35	0,28	0,31	0,23	0,34	0,27	0,11	0,26	0,07	0,13	0,13
		0,10	1,78	1,87	1,49	1,99	1,81	0,65	0,59	0,62	0,50	0,66	0,59	0,21	0,53	0,15	0,27	0,27
		0,15	2,85	2,90	2,33	2,97	2,79	1,16	0,95	0,96	0,77	0,98	0,91	0,38	0,83	0,21	0,47	0,47
		0,20	4,20	4,11	3,37	4,20	4,31	1,79	1,40	1,36	1,12	1,39	1,41	0,59	1,21	0,30	0,71	0,71
		0,25	6,75	6,36	4,81	6,90	6,05	2,51	2,25	2,11	1,60	2,28	1,98	0,82	1,84	0,51	0,98	0,98
		0,30	10,98	9,45	8,09	10,15	9,69	3,44	3,65	3,14	2,69	3,36	3,17	1,13	2,86	0,82	1,46	1,46
		0,35	14,21	13,34	12,26	13,01	13,82	4,43	4,73	4,43	4,07	4,30	4,52	1,45	3,92	1,12	2,01	2,01
		0,40	12,58	11,71	14,19	11,16	12,31	6,20	4,18	3,89	4,72	3,69	4,03	2,04	3,76	0,83	2,34	2,25
		0,45	12,01	11,12	12,74	10,33	11,10	9,21	4,00	3,69	4,23	3,42	3,63	3,02	3,67	0,39	3,00	2,20
		0,50	11,49	10,64	11,17	9,73	10,11	11,77	3,82	3,53	3,71	3,22	3,31	3,86	3,58	0,25	3,16	2,15
		0,55	11,05	10,39	10,57	10,12	10,12	13,80	3,68	3,45	3,51	3,35	3,31	4,53	3,64	0,42	2,93	2,18
		0,60	10,92	10,15	9,24	10,20	9,45	12,24	3,63	3,37	3,07	3,37	3,09	4,02	3,43	0,33	2,87	2,06
		0,65	11,00	10,28	9,42	10,51	9,71	10,13	3,66	3,41	3,13	3,48	3,18	3,33	3,36	0,18	3,06	2,02
		0,70	11,04	9,67	9,34	10,21	9,93	10,38	3,67	3,21	3,10	3,38	3,25	3,41	3,34	0,18	3,03	2,00
		0,75	11,14	9,89	9,54	10,43	9,81	10,25	3,71	3,28	3,17	3,45	3,21	3,37	3,36	0,18	3,06	2,02
		0,80	11,14	10,03	9,63	10,72	9,93	10,27	3,71	3,33	3,20	3,37	3,25	3,37	3,40	0,17	3,10	2,04
		0,85	11,38	10,20	9,78	10,71	10,05	10,50	3,79	3,39	3,25	3,54	3,29	3,45	3,45	0,18	3,15	2,07
		0,90	11,37	10,04	9,86	10,80	10,15	10,56	3,78	3,33	3,28	3,57	3,32	3,47	3,46	0,18	3,16	2,08
		0,95	11,50	10,12	10,06	10,96	10,26	10,80	3,83	3,36	3,34	3,62	3,36	3,55	3,51	0,18	3,21	2,11
		1,00	11,62	10,27	10,25	11,06	10,27	11,11	3,87	3,41	3,41	3,66	3,36	3,65	3,56	0,18	3,25	2,13
		1,05	11,60	10,31	10,04	11,22	10,41	11,02	3,86	3,42	3,34	3,71	3,41	3,62	3,56	0,19	3,24	2,14
		1,10	11,73	10,32	10,17	11,27	10,61	11,18	3,90	3,43	3,38	3,73	3,47	3,67	3,60	0,19	3,28	2,16
		1,15	11,86	10,33	10,33	11,44	10,51	11,38	3,95	3,43	3,43	3,78	3,44	3,74	3,63	0,20	3,28	2,18
		1,20	11,94	10,48	10,36	11,62	10,66	11,58	3,97	3,48	3,44	3,84	3,49	3,80	3,67	0,21	3,32	2,20
		1,25	12,22	10,55	10,35	11,60	10,66	11,60	4,07	3,50	3,44	3,84	3,49	3,81	3,69	0,23	3,30	2,21
		1,30	12,14	10,64	10,57	11,69	10,68	11,65	4,04	3,53	3,51	3,87	3,50	3,82	3,71	0,21	3,36	2,23
		1,35	12,22	10,61	10,55	11,58	10,86	11,99	4,07	3,52	3,51	3,83	3,55	3,94	3,74	0,22	3,36	2,24
		1,40	12,26	10,67	10,62	11,52	10,87	12,09	4,08	3,54	3,53	3,81	3,56	3,97	3,75	0,22	3,38	2,25
		1,45	12,28	10,71	10,63	11,72	10,94	12,23	4,09	3,56	3,53	3,88	3,58	4,02	3,77	0,23	3,39	2,26
		1,50	12,26	10,90	10,70	11,88	10,95	12,10	4,08	3,62	3,56	3,93	3,58	3,97	3,79	0,21	3,43	2,27
		1,55	12,31	10,82	10,73	11,69	10,86	12,19	4,10	3,59	3,57	3,87	3,55	4,00	3,78	0,22	3,41	2,27
		1,60	12,51	10,85	10,34	11,74	11,00	12,31	4,16	3,60	3,44	3,88	3,60	4,04	3,79	0,26	3,35	2,27
		1,65	12,63	10,62	10,55	11,72	11,10	12,16	4,20	3,53	3,51	3,88	3,63	3,99	3,79	0,26	3,35	2,27
		1,70	12,66	10,65	10,53	11,49	10,78	12,47	4,21	3,54	3,50	3,80	3,53	4,09	3,78	0,28	3,29	2,27
		1,75	12,52	10,86	10,29	11,56	10,91	12,66	4,17	3,60	3,42	3,82	3,57	4,16	3,79	0,29	3,30	2,27
		1,80	12,71	10,92	10,51	11,69	11,00	12,74	4,23	3,62	3,49	3,87	3,60	4,18	3,83	0,29	3,35	2,30
		1,85	12,58	10,73	10,56	11,53	11,07	12,78	4,18	3,56	3,51	3,81	3,62	4,20	3,81	0,28	3,34	2,29
		1,90	12,67	10,82	10,36	11,41	11,08	12,84	4,21	3,59	3,44	3,77	3,63	4,22	3,81	0,30	3,30	2,29
		1,95	12,75	10,81	10,51	10,89	10,83	12,81	4,24	3,59	3,49	3,60	3,54	4,21	3,78	0,32	3,24	2,27
		2,00	12,62	10,64	10,60	10,88	10,88	12,81	4,20	3,53	3,52	3,60	3,56	4,21	3,77	0,31	3,25	2,26
		2,05	12,67	10,82	10,35	10,83	10,88	12,79	4,21	3,59	3,44	3,58	3,56	4,20	3,76	0,32	3,23	2,26
		2,10	12,64	10,77	10,42	10,65	10,85	12,91	4,20	3,57	3,46	3,52	3,55	4,24	3,76	0,33	3,20	2,26
		2,15	12,46	10,51	10,36	10,71	10,83	12,73	4,15	3,49	3,44	3,54	3,54	4,18	3,72	0,31	3,19	2,23
		2,20	12,47	10,58	10,32	10,73	10,70	12,44	4,15	3,51	3,43	3,55	3,50	4,08	3,70	0,29	3,20	2,22
		2,25	12,46	10,65	10,36	10,66	10,78	12,62	4,15	3,54	3,44	3,53	3,53	4,14	3,72	0,30	3,21	2,23
		2,30	12,23	10,35	10,27	10,58	10,58	12,49	4,07	3,44	3,41	3,50	3,46	4,10	3,66	0,30	3,15	2,20
		2,35	12,24	10,28	10,37	10,49	10,67	12,47	4,07	3,41	3,45	3,47	3,49	4,09	3,66	0,30	3,16	2,20
		2,40	12,03	10,10	10,35	10,34	10,59	12,44	4,00	3,35	3,44	3,42	3,47	4,08	3,63	0,30	3,12	2,18
		2,45	12,16	10,17	10,30	10,33	10,53	12,39	4,05	3,38	3,42	3,45	3,45	4,07	3,63	0,30	3,11	2,18
		2,50	12,13	10,38	10,20	10,35	10,44	12,17	4,04	3,45	3,39	3,42	3,42	4,00	3,62	0,28	3,14	2,17
		2,55	12,07	10,10	10,03	9,99	10,47	12,19	4,02	3,35	3,33	3,30	3,43	4,00	3,57	0,31	3,04	2,14
		2,60	12,05	9,78	10,03	10,15	10,26	12,01	4,01	3,25	3,33	3,36	3,36	3,94	3,54	0,31	3,01	2,12
		2,65	11,81	9,76	10,11	10,13	10,09	11,86	3,93	3,24	3,36	3,35	3,30	3,89	3,51	0,28	3,03	2,11
		2,70	11,80	9,63	10,08	9,85	9,86	11,68	3,93	3,20	3,35	3,26	3,23	3,83	3,47	0,30	2,96	2,08
		2,75	11,70	9,68	10,04	9,97	9,71	11,57	3,89	3,21	3,34	3,30	3,18	3,80	3,45	0,28	2,97	2,07
		2,80	11,71	9,53	9,89	10,02	9,72	11,47	3,90	3,16	3,29	3,31	3,18	3,77	3,43	0,29	2,95	2,06
		2,85	11,59	9,53	9,70	9,89	9,69	11,46	3,86	3,16	3,22	3,27	3,17	3,76	3,41	0,29	2,92	2,04
		2,90	11,60	9,36	9,78	9,70	9,53	11,32	3,86	3,11	3,25	3,21	3,12	3,72	3,38	0,30	2,87	2,03
		2,95	11,48	9,32	9,75	9,67	9,65	11,40	3,82	3,09	3,24	3,20	3,16	3,74	3,38	0,29	2,88	2,03
		3,00	11,33	9,30	9,55	9,25	9,34	11,43	3,77	3,09	3,17	3,06	3,06	3,75	3,32	0,32	2,78	1,99
		3,05	11,25	9,13	9,54	9,53	9,39	11,31	3,74	3,03	3,17	3,15	3,07	3,71	3,31	0,30	2,81	1,99
		3,10	11,13	9,29	9,32	9,62	9,65	11,14	3,70	3,08	3,10	3,18	3,16	3,66	3,31	0,26	2,87	1,99
		3,15	11,03	9,08	9,44	9,35	9,29	10,89	3,67	3,01	3,14	3,09	3,04	3,58	3,25	0,26	2,81	1,95
		3,20	10,97	9,18	9,35	9,20	9,40	10,59	3,65	3,05	3,11	3,04	3,08	3,48	3,23	0,24	2,83	1,94
		3,25	10,92	9,12	9,31	9,23	9,40	10,43	3,63	3,03	3,09	3,05	3,08	3,42	3,22	0,23	2,83	1,93
		3,30	10,30	9,02	9,09	9,22	9,26	10,41	3,43	2,99	3,02	3,05	3,03	3,42	3,16	0,19	2,84	1,89
		3,35	10,35	9,06	9,23	9,02	9,29	10,44	3,44	3,01	3,07	2,98	3,04	3,43	3,16	0,20	2,83	1,90
		3,40	10,27	9,01	9,19	9,02	9,29	10,54	3,42	2,99	3,05	2,98	3,04	3,46	3,16	0,20	2,82	1,89
		3,45	10,33	9,02	9,06	8,96	9,14	10,38	3,44	2,99	3,01	2,96	2,99	3,41	3,13	0,20		

**Tillegg B**

**MathCAD beregninger**

## Beregning av spennkraft, senteravstand og dimensjonerende jevnt fordelt last.

Relevante verdier:

Diameter og radius:

$$D := 50 \text{ m}$$

$$r := \frac{D}{2} = 25 \text{ m}$$

Omkrets:

$$O := 2 \cdot \pi \cdot r = 157.08 \text{ m}$$

Tyngdetetthet saltvann:

$$\gamma := 10.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Høyde tank:

$$H_{\text{tank}} := 15 \text{ m}$$

Bufferhøyde:

$$H_{\text{buffer}} := 0.5 \text{ m}$$

$$H := H_{\text{tank}} - H_{\text{buffer}} = 14.5 \text{ m}$$

Vegtykkelse

$$t := 220 \text{ mm}$$

Antall lameller

$$\text{Lameller} := 15$$

Lamellhøyde

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

Høyde til midt lamell fra bunn:

$$i := 1 \dots 15 \quad y_i := (i - 0.5) \cdot \text{Lam}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 1.5 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ m}$$

Øverste tall i matrisene representerer i dette arket verdien for bunnen i tanken

Ringspenning ved avstand "y" fra bunnen:  
Maksimum ringspenning i bunn av tanken  
(øverste verdi i matrisa)

$$f_R := \gamma \cdot (H - y) \cdot \frac{r}{t} =$$

$$\begin{bmatrix} 16.543 \\ 15.973 \\ 14.832 \\ 13.691 \\ 12.55 \\ 11.409 \\ 10.268 \\ 9.127 \\ 7.986 \\ 6.845 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

Tilhørende ringkraft er gitt ved:

$$F := \gamma \cdot (H - y) \cdot r = \begin{bmatrix} 3639.5 \\ 3514 \\ 3263 \\ 3012 \\ 2761 \\ 2510 \\ 2259 \\ 2008 \\ 1757 \\ 1506 \\ 1255 \\ 1004 \\ 753 \\ 502 \\ 251 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{kN}{m}$$

Sikkerhetsfaktor for å forsikre at konstruksjonen er i konstant trykk etter oppfylling (Rest-ringtrykk):

$$f_{cv} := 1.5 \text{ MPa}$$

Relevante egenskaper spennarmering:

Spenn tap koeffisient iht. veiledning:

$$k_0 := 0.85$$

reduksjonskoeffisienter iht. EC2:

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.9$$

Tverrsnittsareal:

$$A_p := 150 \text{ mm}^2$$

Diameter kabelkanal:

$$\phi := 20 \text{ mm}$$

Karakteristisk fasthet

$$f_{pk} := 1860 \text{ MPa}$$

Bruddstyrke:

$$P_{pk} := f_{pk} \cdot A_p = 279 \text{ kN}$$

Karakteristisk "0.1%-grense"

$$f_{p0.1k} := 1670 \text{ MPa}$$

Flytestyrke:

$$P_{p0.1k} := f_{p0.1k} \cdot A_p = 250.5 \text{ kN}$$

Største spenning:

$$\sigma_{p,max} := \min(f_{pk} \cdot k_1, f_{p0.1k} \cdot k_2) = 1488 \text{ MPa}$$

Spennkraft før tap av spennkraft:

$$P_{p,max} := \sigma_{p,max} \cdot A_p = 223.2 \text{ kN}$$

Spennkraft etter tap av spennkraft:

$$P_p := P_{p,max} \cdot k_0 = 189.72 \text{ kN}$$

Total ringkraft inkl. rest trykkfasthet:

$$F_{tot} := F + f_{cv} \cdot t =$$

$$\begin{bmatrix} 3.97 \cdot 10^3 \\ 3.844 \cdot 10^3 \\ 3.593 \cdot 10^3 \\ 3.342 \cdot 10^3 \\ \vdots \end{bmatrix} \frac{kN}{m}$$

Øverste verdi i matrisa er ringkraft helt nederst i tanken og inngår ikke i lamellene.

Total ringkraft inkl. rest-ringtrykk pr lamell:

$$F_{lam} :=$$

$$\begin{bmatrix} F_{tot_1} \\ F_{tot_2} \\ F_{tot_3} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3844 \\ 3593 \\ 3342 \\ 3091 \\ 2840 \\ 2589 \\ 2338 \\ 2087 \\ 1836 \\ 1585 \\ 1334 \\ 1083 \\ 832 \\ 581 \\ 330 \end{bmatrix} \frac{kN}{m}$$

Antall spenntau pr lamell - bunn til topp:

$$Ant := \frac{F_{lam}}{P_p} \cdot Lam =$$

$$\begin{bmatrix} 20.3 \\ 18.9 \\ 17.6 \\ 16.3 \\ 15 \\ 13.6 \\ 12.3 \\ 11 \\ 9.7 \\ 8.4 \\ 7 \\ 5.7 \\ 4.4 \\ 3.1 \\ 1.7 \end{bmatrix}$$

Senteravstand mellom kabelkanalene:

$$S_1 := \frac{Lam}{Ant} =$$

$$\begin{bmatrix} 49.355 \\ 52.803 \\ 56.768 \\ 61.378 \\ 66.803 \\ 73.279 \\ 81.146 \\ 90.906 \\ 103.333 \\ 119.697 \\ 142.219 \\ 175.18 \\ 228.029 \\ 326.54 \\ 574.909 \end{bmatrix} mm$$



**Krav til minste frie avstand mellom kabelkanaler iht EC2:**

Største tilslagsstørrelse:  $d_g := 16 \text{ mm}$

$Avstand_{krav} := \max(d_g, \phi, 40 \text{ mm}) = 40 \text{ mm}$

Fri avstand mellom kablene:  $Fri_1 := S_1 - \phi =$

29.355	<b>mm</b>
32.803	
36.768	
41.378	
46.803	
53.279	
61.146	
70.906	
83.333	
99.697	
122.219	
155.18	
208.029	
306.54	
554.909	

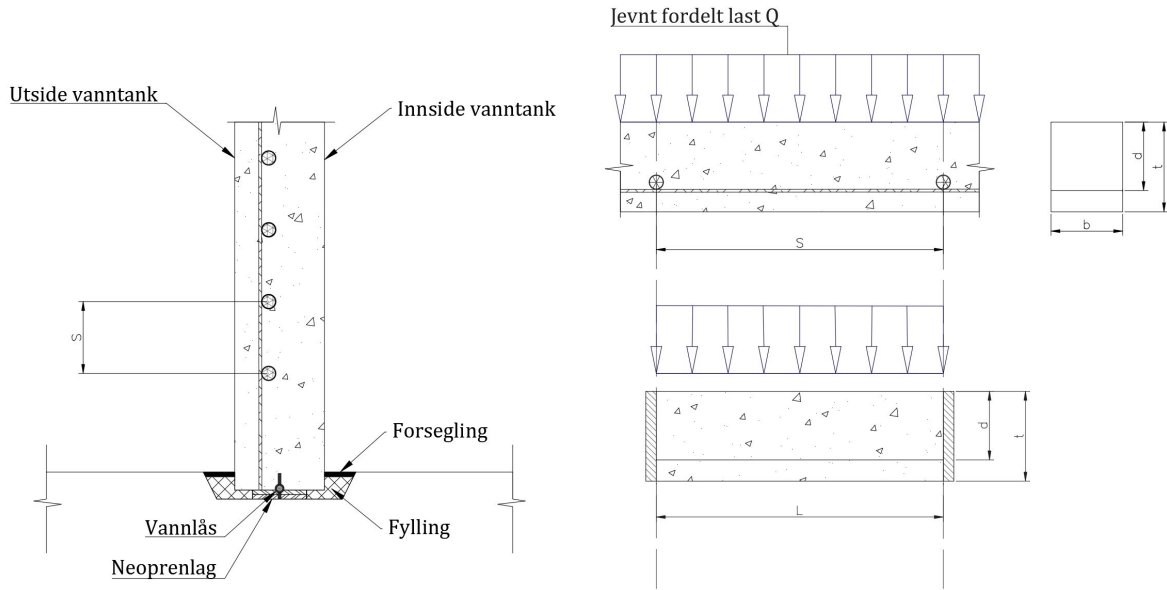
*Ser at kablene må legges dobbelt i de nederste tre lamellene for å tilfredsstille krav*

Senteravstand etter justering

$S :=$

$S_{1_0} \cdot 2$	<b>mm</b>
$S_{1_1} \cdot 2$	
$S_{1_2} \cdot 2$	
$\vdots$	

Senteravstanden brukes videre som lengde(L) i den idealiserte beregningsmodellen



Tykkelse vegg(tverrsnitt):

$$t = 220 \text{ mm} \quad h := t$$

$$c_{min} := 50 \text{ mm}$$

Bredde snitt plate:

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

Tverrsnittsareal

$$A_c := h \cdot b = (2.2 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Nominell overdekning iht. EC2:

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

$$c_{nom} := c_{min} + c_{\Delta dev} = 60 \text{ mm}$$

$$\phi_{min} := 8 \text{ mm} \quad (\phi \text{ min. armering})$$

Tverrsnittets effektive høyde:

$$d := t - c_{nom} - \phi_{min} = 152 \text{ mm}$$

Lengde på idealisert plate pr lamell:  $L := S =$

$$\begin{bmatrix} 98.71 \\ 105.605 \\ 113.537 \\ 61.378 \\ 66.803 \\ 73.279 \\ 81.146 \\ 90.906 \\ 103.333 \\ 119.697 \\ 142.219 \\ 175.18 \\ 228.029 \\ 326.54 \\ 574.909 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Jevt fordelt last bunn til topp:

$$Q := \gamma \cdot (H - y) = \begin{bmatrix} 145.58 \\ 140.56 \\ 130.52 \\ 120.48 \\ 110.44 \\ 100.4 \\ 90.36 \\ 80.32 \\ 70.28 \\ 60.24 \\ 50.2 \\ 40.16 \\ 30.12 \\ 20.08 \\ 10.04 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{kN}{m^2}$$

Dimensjonerende jevt fordelt last pr lamell:

$$Q_d := \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot Lam = \begin{bmatrix} 140.56 \\ 130.52 \\ 120.48 \\ 110.44 \\ 100.4 \\ 90.36 \\ 80.32 \\ 70.28 \\ 60.24 \\ 50.2 \\ 40.16 \\ 30.12 \\ 20.08 \\ 10.04 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{kN}{m}$$

## Momenkapasitet

Momentkapasitet er beregnet iht. EC2 og NB 38. Retningslinjer og forenklinger er hentet fra boken "betongkonstruksjoner" av Svein Ivar Sørensen

### Relevante verdier:

konstanter ihht EC2 og NB 38

For vegger og søyler settes normalt  $\kappa_0 := 0.5$  NB 38 s.42

$$\kappa_0 := 0.5$$

Materialfaktor for reststrekkfastheten  $f_{Ftud}$

$$\gamma_{sf} := 1.5$$

Materialfaktor armering

$$\gamma_s := 1.15$$

Materialfaktor betong

$$\gamma_c := 1.5$$

fiberinnhold:

$$\gamma_{fiber} := 10 \frac{kg}{m^3}$$

fiber densitet:

$$\rho_{fiber} := 2100 \frac{kg}{m^3}$$

Lastfaktor armert betong

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

Lastfaktor uarmert betong

$$\alpha_{cc.pl} := 0.8$$

verdi for "k" iht. NB 38:

$$k := 1.7$$

For fasthetsklasse B20-B45:

$$K := 0.275$$

*Fasthetsklasse med og uten fiber hhv. B45 og B40.*

### **Betong:**

Trykkfasthet:

$$f_{ck\_uten} := 40 \text{ MPa}$$

$$f_{ck\_med} := 45 \text{ MPa}$$

Dimensjonerende Trykkfasthet:

$$f_{cd\_uten} := \alpha_{cc.pl} \cdot \frac{f_{ck\_uten}}{\gamma_c} = 21.333 \text{ MPa}$$

$$f_{cd\_med} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck\_med}}{\gamma_c} = 25.5 \text{ MPa}$$

Midlere strekkfasthet:

$$f_{ctm\_uten} := 3.5 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm\_med} := 3.8 \text{ MPa}$$

Strekkfasthet:

$$f_{ctd\_uten} := \alpha_{cc.pl} \cdot \frac{f_{ctm\_uten}}{\gamma_c} = 1.867 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd\_med} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ctm\_med}}{\gamma_c} = 2.153 \text{ MPa}$$

### **Armering:**

Fasthet

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

Dimensjonerende

$$f_d := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$$

### **Basaltfiber:**

*Verdiene brukt i regnearket er hentet fra lab-rapport.*

Midlere restbøyestrekfasthet:

$$f_{R.1m} := 3.58 \text{ MPa}$$

$$f_{R.3m} := 3.62 \text{ MPa}$$

standardavvik:

$$s_1 := 0.25$$

$$s_3 := 0.28$$

Karakteristisk restbøyestrekfasthet:

(3-3) NB 38

$$f_{Rk.1} := f_{R.1m} - (k \cdot s_1) \text{ MPa} = 3.155 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk.3} := f_{R.3m} - (k \cdot s_3) \cdot \text{MPa} = 3.144 \text{ MPa}$$

*For å unngå for gunstige resultater fra bøyeforsøk slik at spredningen i fasthet kan behandles konsistent, settes derfor en øvre grense for karakteristisk restbøyestrekfasthet tilsvarende 60% av midlere restbøyestrekfasthet, slik at:*

Beregningsmessig restbøyestrekfasthet:

(4-1a) NB 38

$$f_{R.1kb} := \min(f_{Rk.1}, 0.6 \cdot f_{R.1m}) = 2.148 \text{ MPa}$$

(4-1b) NB 38

$$f_{R.3kbe} := \min(f_{Rk.3}, 0.6 \cdot f_{R.3m}) = 2.172 \text{ MPa}$$

(4-2a) NB 38.

Brukgrensetilstanden (SLS):

Karakteristisk enaksiell resttrekkfasthet:  $f_{Ftsk} := 0.45 \cdot f_{Rk.1} = 1.42 \text{ MPa}$

Effektiv resttrekkfasthet:  $f_{Fts.ef} := \kappa_0 \cdot f_{Ftsk} = 0.71 \text{ MPa}$

Dimensjonerende resttrekkfasthet:  $f_{Ftsd} := \frac{f_{Fts.ef}}{\gamma_{sf}} = 0.473 \text{ MPa}$

(4-2b) Nb 38

Bruddgrensetilstanden (ULS):

Karakteristisk enaksiell resttrekkfasthet:  $f_{Ftuk} := 0.37 \cdot f_{Rk.3} = 1.163 \text{ MPa}$

Effektiv resttrekkfasthet:  $f_{Ftu.ef} := \kappa_0 \cdot f_{Ftuk} = 0.582 \text{ MPa}$

Dimensjonerende resttrekkfasthet:  $f_{Ftud} := \frac{f_{Ftu.ef}}{\gamma_{sf}} = 0.388 \text{ MPa}$

Momentkapasitet kun fiber:  $M_{Rd.fiber} := 0.4 \cdot f_{Ftud} \cdot b \cdot h^2 = 7.507 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Total momentkapasitet med fiber:  $M_{Rd.m} := K \cdot f_{cd.med} \cdot b \cdot d^2 + M_{Rd.fiber} = 169.524 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Total momentkapasitet uarmert:  $M_{Rd.u} := K \cdot f_{cd.uten} \cdot b \cdot d^2 = 135.543 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Økning i momentkapasitet:  $\text{\textit{økning}} := M_{Rd.m} - M_{Rd.u} = 33.98 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Prosentvis økning i momentkapasitet:  $\text{\textit{økning}}_{\text{prosent}} := \left( \frac{M_{Rd.m}}{M_{Rd.u}} - 1 \right) \cdot 100 = 25.07 \text{ \%}$

**Største dimensjonerende moment  $M_{Ed}$  påkjent mellom spenntau:**

$$M_{Ed14.5} := \frac{Q_{d_0} \cdot L_0^2}{24} = 0.057 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed14} := \frac{Q_{d_1} \cdot L_1^2}{24} = 0.061 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed13} := \frac{Q_{d_2} \cdot L_2^2}{24} = 0.065 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed12} := \frac{Q_{d_3} \cdot L_3^2}{24} = 0.017 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed11} := \frac{Q_{d_4} \cdot L_4^2}{24} = 0.019 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed10} := \frac{Q_{d_5} \cdot L_5^2}{24} = 0.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed9} := \frac{Q_{d_6} \cdot L_6^2}{24} = 0.022 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed8} := \frac{Q_{d_7} \cdot L_7^2}{24} = 0.024 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed7} := \frac{Q_{d_8} \cdot L_8^2}{24} = 0.027 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed6} := \frac{Q_{d_9} \cdot L_9^2}{24} = 0.03 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed5} := \frac{Q_{d_{10}} \cdot L_{10}^2}{24} = 0.034 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed4} := \frac{Q_{d_{11}} \cdot L_{11}^2}{24} = 0.039 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed3} := \frac{Q_{d_{12}} \cdot L_{12}^2}{24} = 0.044 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed2} := \frac{Q_{d_{13}} \cdot L_{13}^2}{24} = 0.045 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed1} := \frac{Q_{d_{14}} \cdot L_{14}^2}{24} = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Dimensjonerende moment:**

$$M_{Ed} := \max \left( \begin{array}{c} M_{Ed14.5} \\ M_{Ed14} \\ M_{Ed13} \\ M_{Ed12} \\ \vdots \end{array} \right) = 0.065 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**Nødvendig armering:**

Avrundet verdi for c, gitt i tabell 4.5. (Sørensen)

$$c := 0.17$$

Tilnærming av indre momentarm uten fiber:

$$z_u := \left( 1 - c \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd.u}} \right) \cdot d = 151.988 \text{ mm}$$

Tilnærming av indre momentarm med fiber:

$$z_m := \left( 1 - c \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd.m}} \right) \cdot d = 151.99 \text{ mm}$$

*Momentarmen for begge tilfellene er tilnærmet samme som d, og det vil derfor ikke være noen nevneværdig forskjell i nødvendig armering. Dette fordi dimensjonerende moment er lite i forhold til kapasitet.*

Nødvendig armering tverrsnitt:

$$A_{s.u} := \frac{M_{Ed}}{f_d \cdot z_u} = 0.979 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.m} := \frac{M_{Ed}}{f_d \cdot z_m} = 0.979 \text{ mm}^2$$



## Minimumsarmering iht. EC2 og NB 38:

### Minimumsarmering etter Eurocode 2 (9.2.1.1)

$\frac{1}{m}$  er lagt inn for å illustrere at det er armeringsmengde pr meter omkrets av tanken.

Uten fiber, minimumsarmering skal legges på begge sider av nøytralaksen:

$$A_{s.min} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm\_uten}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \cdot \frac{1}{m} = 276.64 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$\text{if } A_{s.min} \geq 0.0013 \cdot b_t \cdot d \cdot \frac{1}{m} \left| = 276.64 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \| A_{s.min} \\ \text{else} \\ \| 0.0013 \cdot b_t \cdot d \end{array} \right.$$

Totalt min.armering for for hele tverrsnittet:  $A_{s.min.tot.EC2} := 2 \cdot A_{s.min} = 553.28 \frac{1}{m} \cdot mm^2$

Totalt min.armering for for hele Tanken:  $A_{s.min.tank} := A_{s.min.tot.EC2} \cdot O \cdot 15 \ m = 1.304 \ m^3$

### Minimumsarmering etter NB 38:

For Plater:

$$A_{s.min.plate} := 0.26 \cdot \frac{(f_{ctm\_med} - 2.15 \cdot f_{Ftu.ef})}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \cdot \frac{1}{m} = 201.51 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$\text{if } A_{s.min.plate} > 0.13 \cdot \frac{f_{ctm\_med}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \cdot \frac{1}{m} \left| = 201.51 \frac{1}{m} \cdot mm^2 \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \| A_{s.min.plate} \\ \text{else} \\ \| 0.13 \cdot \frac{f_{ctm\_med}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \end{array} \right.$$

Totalt min.armering for for hele tverrsnittet:  $A_{s.min.tot.plate} := 2 \cdot A_{s.min.plate} = 403.021 \frac{1}{m} \cdot mm^2$

*Beregning av armering i hovedretningene med et tverrsnittsareal på begge sider git ved ligningene.*

Tilleggsfaktor for tynne vegger iht NB38:  $Tilleggsfaktor := 1.2$

For skiver og skall, begge retninger:

$$A_{s.min.skall} := 0.3 \cdot A_c \cdot \frac{(f_{ctm\_med} - 1.2 \cdot f_{Ftu.ef})}{f_{yk}} \cdot \frac{1}{m} = 409.468 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

$$A_{s.min.skall.tot} := 2 \cdot A_{s.min.skall} = 818.936 \frac{mm^2}{m}$$

Vegger forøvrig:

$$A_{s.min.vegg} := 0.15 \cdot A_c \cdot \frac{(f_{ctm\_med} - 1.2 \cdot 1.7 \cdot f_{Ftu.ef})}{f_{yk}} \cdot \frac{1}{m} = 172.488 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

Totalt pr meter omkrets:  $A_{s.min.vegg.tot} := 2 \cdot A_{s.min.vegg} = 344.976 \frac{mm^2}{m}$

Totalt for hele tanken:  $A_{s.min.vegg.tank} := A_{s.min.vegg.tot} \cdot O \cdot 15 m = 0.813 m^3$

### Armering spart pr meter omkrets for de forskjellige metodene:

$$\text{Plate:} \quad Adif_{plate} := A_{s.min.tot.EC2} - A_{s.min.tot.plate} = 150.259 \frac{mm^2}{m}$$

$$\text{Skall:} \quad Adif_{skall} := A_{s.min.tot.EC2} - A_{s.min.skall.tot} = -265.656 \frac{mm^2}{m}$$

$$\text{Vegger forøvrig:} \quad Adif_{vegg} := A_{s.min.tot.EC2} - A_{s.min.vegg.tot} = 208.304 \frac{mm^2}{m}$$

### Differanse i mengde armering:

$$\text{plate:} \quad Armering_{plate} := Adif_{plate} \cdot O \cdot H_{tank} = 0.354 m^3$$

$$\text{skall:} \quad Armering_{skall} := Adif_{skall} \cdot O \cdot H_{tank} = -0.626 m^3$$

$$\text{Vegger forøvrig:} \quad Armering_{vegg} := Adif_{vegg} \cdot O \cdot H_{tank} = 0.491 m^3$$

*Tar videre utgangspunkt i resultatene fra beregningsmetoden for vegger for øvrig*

## Totalt materiale for tankveggene:

**Spennarmering målt i  $m^3$  :**

$$\text{Areal pr lamell: } V_{SA} := \text{Ant} \cdot A_p = \begin{bmatrix} 3.039 \cdot 10^3 \\ 2.841 \cdot 10^3 \\ 2.642 \cdot 10^3 \\ 2.444 \cdot 10^3 \\ 2.245 \cdot 10^3 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ mm}^2$$

$$\text{Volum pr meter omkrets: } V_G := V_{SA} \cdot 1000 \text{ mm}$$

Totalt volum for høyden pr meter omkrets:

$$V_{SH} := V_{S_0} + V_{S_1} + V_{S_2} + V_{S_3} + V_{S_4} + V_{S_5} + V_{S_6} + V_{S_7} + V_{S_8} + V_{S_9} + V_{S_{10}} + V_{S_{11}}$$

$$V_{SH} + V_{S_{12}} + V_{S_{13}} + V_{S_{14}} = 0.025 \text{ m}^3$$

$$\text{Totalt volum for hele tanken: } V_{S.tank} := V_{SH} \cdot 157.08 = 3.671 \text{ m}^3$$

**Betong uten fiber målt i  $m^3$  :**

$$V_{B.u} := O \cdot H_{tank} \cdot t - A_{s.min.tot.EC2} \cdot m \cdot O - V_{S.tank}$$

$$\text{betongvolum: } V_{B.u} = 514.604 \text{ m}^3$$

**Betong med fiber målt i  $m^3$  :**

$$\text{betongvolum inkl. fiber: } V_{B.m} := V_{B.u} + \text{Armering}_{vegg} = 515.095 \text{ m}^3$$

$$\text{fiber: } Vekt_{fiber} := V_{B.m} \cdot \gamma_{fiber} = 5150.953 \text{ kg}$$

$$V_{fiber} := \frac{Vekt_{fiber}}{\rho_{fiber}} = 2.453 \text{ m}^3$$

$$\text{betongvolum eks. fiber: } V_{B.ef} := V_{B.m} - V_{fiber} = 512.642 \text{ m}^3$$

**fiberarmering målt i  $\frac{kg}{m^3}$  :**

$$\text{Vekt pr kubikk betong: } W_{fiber.u} := \frac{Vekt_{fiber}}{V_{B.m}} = 10 \frac{kg}{m^3}$$

**Spennarmering målt i  $\frac{kg}{m^3}$ :**

Vekt spennarmering:  
(produktblad spennteknikk)

$$Vekt_{spenn} := 1.37 \frac{kg}{m}$$

Antall spenntau:  
(regnet ut fra antall pr lamell)

$$Ant_{tot.spenn} := 165$$

Antall løpemetere spennarmering:

$$Meter_{spenn} := Ant_{tot.spenn} \cdot O$$

$$Meter_{spenn} = (2.592 \cdot 10^4) \text{ m}$$

$$Vekt_{spenn.tot} := Vekt_{spenn} \cdot Meter_{spenn}$$

$$Vekt_{spenn.tot} = 35507.851 \text{ kg}$$

Vekt pr kubikk betong:

$$W_{spenn.u} := \frac{Vekt_{spenn.tot}}{V_{B.m}} = 68.935 \frac{kg}{m^3}$$

**fiberarmering målt i  $\frac{kg}{m^3}$ :**

Vekt pr kubikk betong:

$$W_{fiber.u} := \frac{Vekt_{fiber}}{V_{B.m}} = 10 \frac{kg}{m^3}$$

**Minimumsarmering målt i  $\frac{kg}{m^3}$ :**

Vekt av armering  $\phi=8$ :

$$Vekt_{\phi 8} := 0.403 \frac{kg}{m}$$

**Uarmert:**

Antall armeringsstenger pr meter omkrets:  
 $\phi=8\text{mm}$

$$Ant_{\phi.uarmert} := \frac{A_{s.min.tot.EC2} \cdot \left( m \cdot \frac{1}{mm^2} \right)}{\pi \cdot 4^2} = 11.007$$

Totalt antall armeringsstenger for tanken:

$$Tot.ant_{\phi.uarmert} := Ant_{\phi.uarmert} \cdot O \cdot \left( \frac{1}{m} \right) = 1729$$

Totalt antall løpemeter for tanken:

$$Meter_{min.uarmert} := Tot.ant_{\phi.uarmert} \cdot H_{tank} = (2.594 \cdot 10^4) \text{ m}$$

vekt:  $Vekt_{min.uarmert} := Meter_{min.uarmert} \cdot Vekt_{\phi 8} = 10451.805 \text{ kg}$

Vekt per kubikk betong:  $W_{min.uarmert} := \frac{Vekt_{min.uarmert}}{V_{B.m}} = 20.291 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

### **armert:**

Antall armeringsstenger pr meter omkrets:

$$\phi = 8\text{mm}$$

$$Ant_{\phi.armert} := \frac{A_{s,min.vegg.tot} \cdot \left( m \cdot \frac{1}{mm^2} \right)}{\pi \cdot 4^2} = 6.863$$

Totalt antall armeringsstenger for tanken:

$$Tot.ant_{\phi.armert} := Ant_{\phi.armert} \cdot O \cdot \left( \frac{1}{m} \right) = 1078.05$$

Totalt antall løpemeter for tanken:

$$Meter_{min.armert} := Tot.ant_{\phi.armert} \cdot H_{tank} = (1.617 \cdot 10^4) \text{ m}$$

Vekt:  $Vekt_{min.armert} := Meter_{min.armert} \cdot Vekt_{\phi 8} = 6516.812 \text{ kg}$

Vekt per kubikk betong:  $W_{min.armert} := \frac{Vekt_{min.armert}}{V_{B.m}} = 12.652 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Skjærkraft mellom spenntau:

$$V_{Ed14.5} := \frac{(Q_{d_0} \cdot L_0)}{2} = 6.937 \text{ kN}$$

$$V_{Ed14} := \frac{(Q_{d_1} \cdot L_1)}{2} = 6.892 \text{ kN}$$

$$V_{Ed13} := \frac{(Q_{d_2} \cdot L_2)}{2} = 6.839 \text{ kN}$$

$$V_{Ed12} := \frac{(Q_{d_3} \cdot L_3)}{2} = 3.389 \text{ kN}$$

$$V_{Ed11} := \frac{(Q_{d_4} \cdot L_4)}{2} = 3.354 \text{ kN}$$

$$V_{Ed10} := \frac{(Q_{d_5} \cdot L_5)}{2} = 3.311 \text{ kN}$$

$$V_{Ed9} := \frac{(Q_{d_6} \cdot L_6)}{2} = 3.259 \text{ kN}$$

$$V_{Ed8} := \frac{(Q_{d_7} \cdot L_7)}{2} = 3.194 \text{ kN}$$

$$V_{Ed7} := \frac{(Q_{d_8} \cdot L_8)}{2} = 3.112 \text{ kN}$$

$$V_{Ed6} := \frac{(Q_{d_9} \cdot L_9)}{2} = 3.004 \text{ kN}$$

$$V_{Ed5} := \frac{(Q_{d_{10}} \cdot L_{10})}{2} = 2.856 \text{ kN}$$

$$V_{Ed4} := \frac{(Q_{d_{11}} \cdot L_{11})}{2} = 2.638 \text{ kN}$$

$$V_{Ed3} := \frac{(Q_{d_{12}} \cdot L_{12})}{2} = 2.289 \text{ kN}$$

$$V_{Ed2} := \frac{(Q_{d_{13}} \cdot L_{13})}{2} = 1.639 \text{ kN}$$

$$V_{Ed1} := \frac{(Q_{d_{14}} \cdot L_{14})}{2} = 0 \text{ kN}$$

Bruker i beregningene ikke reduksjon av last nær opplegg ettersom lasten i realiteten strekker seg over hele høyden.

$$\text{Dimensjonerende skjærkraft: } V_{Ed} := \max \left( \begin{array}{c} V_{Ed14.5} \\ V_{Ed14} \\ V_{Ed13} \\ V_{Ed12} \\ \vdots \end{array} \right) = 6.937 \text{ kN}$$

skjærstrekkapasitet iht. EC2: 6.2

$$V_{Rd.c.formel} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{\left(\frac{1}{3}\right)} \cdot b_w \cdot d$$

$$k_2 := 0.18 \quad b_w := b = 1000 \text{ mm}$$

$$C_{Rd.c} := \frac{k_2}{\gamma_c} = 0.12 \quad d = 152 \text{ mm}$$

$$\text{Uten fiber: } A_{sL.u} := A_{s.min} \cdot m = 276.64 \text{ mm}^2$$

$$\rho_L \leq 0.02 \quad \rho_{L.u} := \min \left( \frac{A_{sL.u}}{b_w \cdot d}, 0.02 \right) = 0.002$$

$$k \leq 2.0 \quad k := \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \cdot (\text{mm}), 2.0 \right) = 2$$

$$V_{Rd.c.verdier.u} := 0.12 \cdot 2 \cdot (100 \cdot \rho_{L.u} \cdot 40)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \cdot 1000 \cdot 152 = 70702.042$$

$$V_{Rd.c.u} := V_{Rd.c.verdier.u} \cdot N = 70.702 \text{ kN}$$



Med fiber: 
$$A_{sL.m} := \frac{A_{s.min.skall}}{2} \cdot m = 204.734 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{L.m} := \min\left(\frac{A_{sL.m}}{b_w \cdot d}, 0.02\right) = 0.001$$

$$V_{Rd.c.verdier.m} := 0.12 \cdot 2 \cdot \left(100 \cdot \rho_{L.m} \cdot 45\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \cdot 1000 \cdot 152 = 66513.205$$

$$V_{Rd.c.m} := V_{Rd.c.verdier.m} \cdot N = 66.513 \text{ kN}$$

*Denne formelen tar ikke hensyn til reststrekkfastheten til fiberen og er derfor ikke representativ for tilfelle med fiber.*

$V_{Rd.c} > V_{Ed}$  For begge beregningen. Det er ikke nødvendig med skjærarmering.

Skjærtrykkapasitet iht EC2: 6.2.2

Fasthetsreduksjon uten fiber: 
$$v_u := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck\_uten}}{250} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}\right) = 0.504$$

Fasthetsreduksjon med fiber: 
$$v_m := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck\_med}}{250} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}\right) = 0.492$$

Skjærtrykkapasitet uten fiber: 
$$V_{Rd.max.u} := v_u \cdot 0.5 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{cd\_uten} = 817.152 \text{ kN}$$

Skjærtrykkapasitet med fiber: 
$$V_{Rd.max.m} := v_m \cdot 0.5 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{cd\_med} = 953.496 \text{ kN}$$

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

Det er i vår oppgave ikke behov for skjærarmering. Dette kan begrunnes i at det er veldig liten avstand mellom spenntauene.

Tillegg C

Utslippsdata og beregning

	unit	value		
<b>concrete B35 (Per m<sup>3</sup>)</b>				
<b>produksjon</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	340,28	<b>SUM</b>	<b>708,1</b>
<b>Produktet</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	367,78		

### **Reinforcing steel (Per Kg)**

<b>produksjon</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	2,0417	<b>SUM</b>	<b>4,117</b>
<b>Produktet</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	2,075		

Basalt(Ikke fiber, derfor sees disse verdiene bort ifra fordi de ikke inkluderer produksjonsprosessen som ligger til grunn for basaltfiber.

<b>produksjon</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	0.0092818		
		819613151		
		48		
<b>Produktet</b>				
ReCiPe Midpoint (H) V1.13; climate change; GWP100; kg CO2-Eq	kg CO2-Eq	0.0161063		
		421605430		
		26		

Verdier hentet fra <http://eibrowser.indecol.no/>

Søkeord:

- concrete, 35MPa

- reinforcing steel

- basalt

Utifra verdiene gjenspeiler de verdiene gitt i EPD fra Dyrøy betong AS sin B35 på 983kg/m<sup>3</sup>. Det grunnet inkludering av alle fire prosessene fra flytdiagramet vist i avsnitt "Utslippsanalyse".

Basert på det velges verdier gitt i overnevnte EPD.

Armeringsjern blir utgangspunkt for både slakkarmering og spennarmering. Det vil gi uriktige verdier dersom det hadde vært reduksjon i spennarmering, men det viser resultatet at det ikke ble.

Basaltfiber tar ikke utgangspunkt i verdier fra Eibrowser. Den tas utgangspunkt i verdier hentet fra Reforcetech AS sin gjeldende EPD for basaltfiber.

**OBS: Videre har RFT en fullstendig livsløpsvurdering gitt ved fase A-D = 2,39.**

**Men både stål og betong sine systemgrenser har bare fra de fire første fasene, A1-4.**

**Derfor er utslippsverdiene for samtlige CO-ekvivalenter gitt som "GWP SUM" av Fase A1-4 markert i Blått**



A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	MND	X	MND	X

### Environmental impact

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A1-A3	A4	A5	C1	C3	D	A-D
GWP-total	kg CO2-eq.	1.79E+00	2.01E-01	1.14E-01	2.11E+00	2.56E-01	4.30E-04	2.78E-02	8.42E-04	-4.31E-03	2.39E+00
GWP-fossil	kg CO2-eq.	1.94E+00	2.01E-01	1.10E-01	2.25E+00	2.56E-01	-8.63E-04	2.78E-02	8.40E-04	-4.30E-03	2.53E+00
GWP-biogenic	kg CO2-eq.	-1.48E-01	9.29E-05	3.79E-03	-1.44E-01	1.79E-05	1.30E-03	4.59E-06	1.30E-06	-1.25E-05	-1.43E-01
GWP-luluc	kg CO2-eq.	8.48E-04	7.15E-05	2.71E-04	1.19E-03	1.14E-04	-2.97E-06	2.36E-06	2.44E-07	-4.43E-06	1.30E-03
ODP	kg CFC11-eq.	1.73E-07	4.64E-08	8.46E-09	2.28E-07	5.49E-08	-7.30E-11	6.28E-09	1.84E-10	-4.42E-10	2.89E-07
AP	mol H+ eq.	7.27E-03	1.18E-03	3.22E-04	8.78E-03	1.01E-03	-7.11E-06	2.91E-04	8.60E-06	-3.14E-05	1.00E-02
EP-freshwater	kg PO4-eq.	8.00E-05	3.05E-06	4.12E-06	8.71E-05	5.73E-06	-7.31E-08	2.12E-07	1.61E-08	-2.62E-07	9.28E-05
EP-marine	kg N eq.	1.43E-03	4.21E-04	5.83E-05	1.91E-03	2.62E-04	-1.15E-06	1.26E-04	3.66E-06	-8.68E-06	2.29E-03
EP-terrestrial	mol N eq.	1.58E-02	4.66E-03	8.27E-04	2.13E-02	2.95E-03	-1.53E-05	1.39E-03	4.03E-05	-1.03E-04	2.56E-02
POCP	kg NMVOC eq.	8.10E-03	1.31E-03	2.27E-04	9.64E-03	9.11E-04	-3.89E-06	3.81E-04	1.11E-05	-2.78E-05	1.09E-02
ADPm	kg Sb-eq.	5.44E-06	5.49E-07	1.42E-07	6.13E-06	1.39E-06	-5.48E-09	9.28E-09	9.05E-10	-2.33E-08	7.50E-06
ADPf	MJ	3.51E+01	3.10E+00	1.28E+00	3.95E+01	3.78E+00	-2.01E-02	4.02E-01	1.23E-02	-5.46E-02	4.36E+01
WDP	m <sup>3</sup>	4.37E-01	2.48E-02	2.41E+00	2.88E+00	3.08E-02	-2.01E-03	2.31E-03	1.73E-03	-6.06E-02	2.85E+00
Caption	GWP-total = Globale Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use										
Disclaimer											

Kilde: RFT

GWP SUM(Fase A1-4)

**2,361**

Verdier og mengder hentet fra berregning i Mathcad-vedlegget.

### Referansemerd

Mengde	kg CO <sub>2</sub>	SUM
	<i>(mengde*kg CO<sub>2</sub>)</i>	
Betong	515,1	983
Slakkarmering	10451,8	4,12
<b>Totalt</b>		<b>549404,7</b>

### Fibermerden

Betong	512,6	983
Slakkarmering	6516,8	4,12
Basaltfiber	5151	2,36
<b>Totalt</b>		<b>542891,4</b>

Differanse

**6513,3**

%av totale CO-utslipp

**1,2**

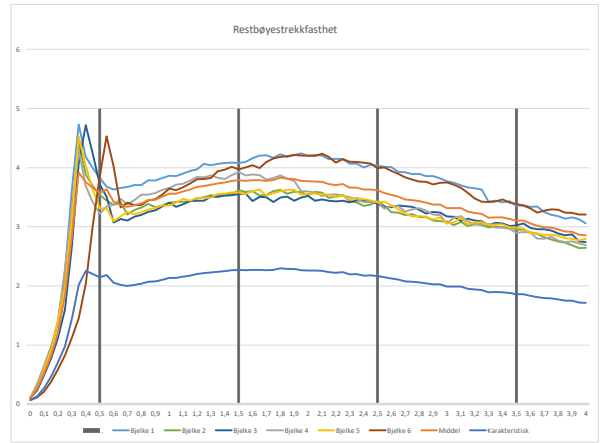
Tillegg D

## Laboratorieberegninger



# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(N)	Restbøystrekkfasthet	Middel	STD avik	Ysf	Karakteristisk	Bjelke dimensjoner	B1	B2	Hsp1	Hsp2	
14,31													
			K				1,7						
F1: ftL	0	0,32	0	0,11	0,10	0,03	0,07	0,09	149,39	150,35	122,33	122,97	
	0,05	0,83	0	0,28	0,26	0,07	0,13	0,13					
	0,1	1,78	0	0,58	0,53	0,11	0,27	0,27					
	0,15	2,85	0	0,88	0,85	0,15	0,47	0,43					
	0,2	4,2	0	1,40	1,21	0,30	0,71	0,51					
	0,25	6,75	0	2,22	1,84	0,51	0,98	0,98					
	0,3	10,98	0	3,65	2,85	0,87	1,46	1,46					
	0,35	14,71	0	4,88	3,88	1,18	2,01	2,01					
	0,4	12,58	0	4,18	3,76	0,81	2,34	2,35					
	0,45	12,01	0	4,00	3,67	0,88	3,00	2,30					
F2: FR1	0,5	11,49	5	3,62	3,58	0,75	3,16	2,10					
	0,55	11,05	0	3,68	3,64	0,62	2,83	2,40					
	0,6	10,92	0	3,63	3,43	0,51	2,87	2,60					
	0,65	11	0	3,66	3,36	0,18	3,06	2,92					
	0,7	11,04	0	3,67	3,34	0,18	3,03	2,90					
	0,75	11,14	0	3,71	3,38	0,18	3,06	2,90					
	0,8	11,14	0	3,71	3,40	0,13	3,10	2,88					
	0,85	11,38	0	3,70	3,45	0,18	3,15	2,97					
	0,9	11,37	0	3,78	3,46	0,18	3,16	2,98					
	0,95	11,5	0	3,88	3,51	0,18	3,21	2,93					
F2: FR2	1	11,62	0	3,87	3,56	0,18	3,25	2,13					
	1,05	11,6	0	3,86	3,56	0,18	3,24	2,18					
	1,1	11,73	0	3,90	3,60	0,19	3,28	2,16					
	1,15	11,86	0	3,95	3,63	0,21	3,28	2,18					
	1,2	11,94	0	3,99	3,67	0,21	3,32	2,20					
	1,25	12,22	0	4,07	3,68	0,21	3,30	2,21					
	1,3	12,14	0	4,04	3,71	0,21	3,36	2,22					
	1,35	12,22	0	4,07	3,76	0,21	3,36	2,28					
	1,4	12,26	0	4,08	3,75	0,22	3,38	2,25					
	1,45	12,28	0	4,08	3,77	0,21	3,39	2,26					
F3: FR3	1,5	12,26	5	4,08	3,79	0,21	3,43	2,27					
	1,55	12,31	0	4,10	3,78	0,22	3,41	2,27					
	1,6	12,51	0	4,16	3,78	0,28	3,25	2,28					
	1,65	12,63	0	4,20	3,79	0,28	3,35	2,27					
	1,7	12,66	0	4,21	3,78	0,28	3,29	2,27					
	1,75	12,52	0	4,17	3,75	0,25	3,30	2,27					
	1,8	12,71	0	4,20	3,77	0,28	3,25	2,28					
	1,85	12,58	0	4,18	3,81	0,28	3,34	2,28					
	1,9	12,67	0	4,21	3,81	0,30	3,30	2,28					
	1,95	12,75	0	4,24	3,78	0,31	3,24	2,27					
F4: FR4	2	12,62	0	4,20	3,77	0,31	3,25	2,28					
	2,05	12,67	0	4,21	3,76	0,31	3,23	2,28					
	2,1	12,64	0	4,20	3,76	0,31	3,20	2,28					
	2,15	12,46	0	4,15	3,72	0,31	3,19	2,23					
	2,2	12,47	0	4,15	3,78	0,29	3,20	2,23					
	2,25	12,46	0	4,15	3,72	0,30	3,21	2,23					
	2,3	12,23	0	4,07	3,66	0,30	3,15	2,20					
	2,35	12,24	0	4,07	3,68	0,30	3,16	2,20					
	2,4	12,03	0	4,00	3,63	0,29	3,12	2,18					
	2,45	12,16	0	4,05	3,63	0,30	3,11	2,18					
F3: FR3	2,5	12,13	5	4,04	3,63	0,28	3,14	2,17					
	2,55	12,07	0	4,02	3,57	0,31	3,04	2,18					
	2,6	12,05	0	4,01	3,54	0,31	3,01	2,18					
	2,65	11,81	0	3,98	3,51	0,28	3,01	2,11					
	2,7	11,8	0	3,93	3,47	0,30	2,96	2,08					
	2,75	11,7	0	3,89	3,45	0,28	2,97	2,07					
	2,8	11,71	0	3,90	3,43	0,29	2,95	2,06					
	2,85	11,59	0	3,86	3,41	0,28	2,92	2,05					
	2,9	11,6	0	3,86	3,38	0,30	2,87	2,01					
	2,95	11,48	0	3,82	3,38	0,29	2,88	2,01					
F4: FR4	3	11,33	0	3,77	3,31	0,31	2,78	1,90					
	3,05	11,25	0	3,74	3,31	0,30	2,81	1,88					
	3,1	11,13	0	3,70	3,31	0,28	2,87	1,98					
	3,15	11,03	0	3,67	3,25	0,28	2,81	1,90					
	3,2	10,97	0	3,65	3,23	0,29	2,83	1,91					
	3,25	10,92	0	3,63	3,22	0,28	2,82	1,91					
	3,3	10,3	0	3,43	3,16	0,18	2,84	1,88					
	3,35	10,35	0	3,44	3,16	0,20	2,83	1,90					
	3,4	10,27	0	3,42	3,15	0,20	2,82	1,89					
	3,45	10,23	0	3,40	3,13	0,20	2,79	1,88					
F4: FR4	3,5	10,09	5	3,36	3,10	0,20	2,77	1,88					
	3,55	10,12	0	3,37	3,10	0,18	2,78	1,88					
	3,6	10,04	0	3,34	3,08	0,19	2,73	1,83					
	3,65	10,05	0	3,34	3,03	0,20	2,68	1,81					
	3,7	9,77	0	3,25	2,99	0,18	2,66	1,80					
	3,75	9,63	0	3,20	2,98	0,18	2,66	1,78					
	3,8	9,56	0	3,18	2,96	0,21	2,61	1,77					
	3,85	9,44	0	3,13	2,93	0,21	2,58	1,75					
	3,9	9,5	0	3,18	2,89	0,21	2,57	1,75					
	3,95	9,4	0	3,13	2,87	0,22	2,50	1,72					
4	9,18	0	3,05	2,86	0,20	2,51	1,71						





# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(kN)	Restbøyestrekfasthet	Bjelke1	B1	B2	Bjelke dimensjoner		
13,75							Hsp1	Hsp2	
	0	0,33			0,11	150,25	149,83	122,9	122,53
FL	0,05	0,94	fct,L		0,31				
	0,1	1,87			0,62				
	0,15	2,9			0,96				
	0,2	4,11			1,36				
	0,25	6,36			2,11				
	0,3	9,45			3,14				
	0,35	13,34			4,43				
	0,4	11,71			3,89				
	0,45	11,12			3,69				
F1	0,5	10,64	fr1		3,53				
	0,55	10,39			3,45				
	0,6	10,15			3,37				
	0,65	10,28			3,41				
	0,7	9,67			3,21				
	0,75	9,89			3,28				
	0,8	10,03			3,33				
	0,85	10,2			3,39				
	0,9	10,04			3,33				
	0,95	10,12			3,36				
	1	10,27			3,41				
	1,05	10,31			3,42				
	1,1	10,32			3,43				
	1,15	10,33			3,43				
	1,2	10,48			3,48				
	1,25	10,55			3,50				
	1,3	10,64			3,53				
	1,35	10,61			3,52				
	1,4	10,67			3,54				
	1,45	10,71			3,56				
F2	1,5	10,9	fr2		3,62				
	1,55	10,82			3,59				
	1,6	10,85			3,60				
	1,65	10,62			3,53				
	1,7	10,65			3,54				
	1,75	10,86			3,60				
	1,8	10,92			3,62				
	1,85	10,73			3,56				
	1,9	10,82			3,59				
	1,95	10,81			3,59				
	2	10,64			3,53				
	2,05	10,82			3,59				
	2,1	10,77			3,57				
	2,15	10,51			3,49				
	2,2	10,58			3,51				
	2,25	10,65			3,54				
	2,3	10,35			3,44				
	2,35	10,28			3,41				
	2,4	10,1			3,35				
	2,45	10,17			3,38				
F3	2,5	10,38	fr3		3,45				
	2,55	10,1			3,35				
	2,6	9,78			3,25				
	2,65	9,76			3,24				
	2,7	9,63			3,20				
	2,75	9,68			3,21				
	2,8	9,53			3,16				
	2,85	9,53			3,16				
	2,9	9,36			3,11				
	2,95	9,32			3,09				
	3	9,3			3,09				
	3,05	9,13			3,03				
	3,1	9,29			3,08				
	3,15	9,08			3,01				
	3,2	9,18			3,05				
	3,25	9,12			3,03				
	3,3	9,02			2,99				
	3,35	9,06			3,01				
	3,4	9,01			2,99				
	3,45	9,02			2,99				
F4	3,5	8,9	fr4		2,95				
	3,55	8,89			2,95				
	3,6	8,75			2,90				
	3,65	8,68			2,88				
	3,7	8,51			2,82				
	3,75	8,39			2,78				
	3,8	8,3			2,76				
	3,85	8,23			2,73				
	3,9	8,1			2,69				
	3,95	7,95			2,64				
	4	7,97			2,65				

# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(kN)	Restbøyestrekfasthet	Bjelke dimensjoner				
14,65				B1	B2	Hsp1	Hsp2	
	0	0,32			150,26	149,09	123,15	122,42
FL	0,05	0,69	fct,L					
	0,1	1,49						
	0,15	2,33						
	0,2	3,37						
	0,25	4,81						
	0,3	8,09						
	0,35	12,26						
	0,4	14,19						
	0,45	12,74						
F1	0,5	11,17	fr1					
	0,55	10,57						
	0,6	9,24						
	0,65	9,42						
	0,7	9,34						
	0,75	9,54						
	0,8	9,63						
	0,85	9,78						
	0,9	9,86						
	0,95	10,06						
	1	10,25						
	1,05	10,04						
	1,1	10,17						
	1,15	10,33						
	1,2	10,36						
	1,25	10,35						
	1,3	10,57						
	1,35	10,55						
	1,4	10,62						
	1,45	10,63						
F2	1,5	10,7	fr2					
	1,55	10,73						
	1,6	10,34						
	1,65	10,55						
	1,7	10,53						
	1,75	10,29						
	1,8	10,51						
	1,85	10,56						
	1,9	10,36						
	1,95	10,51						
	2	10,6						
	2,05	10,35						
	2,1	10,42						
	2,15	10,36						
	2,2	10,32						
	2,25	10,36						
	2,3	10,27						
	2,35	10,37						
	2,4	10,35						
	2,45	10,3						
F3	2,5	10,2	fr3					
	2,55	10,03						
	2,6	10,03						
	2,65	10,11						
	2,7	10,08						
	2,75	10,04						
	2,8	9,89						
	2,85	9,7						
	2,9	9,78						
	2,95	9,75						
	3	9,55						
	3,05	9,54						
	3,1	9,32						
	3,15	9,44						
	3,2	9,35						
	3,25	9,31						
	3,3	9,09						
	3,35	9,23						
	3,4	9,19						
	3,45	9,06						
F4	3,5	9,1	fr4					
	3,55	9,2						
	3,6	8,96						
	3,65	8,9						
	3,7	8,9						
	3,75	8,84						
	3,8	8,7						
	3,85	8,6						
	3,9	8,64						
	3,95	8,28						
	4	8,26						

# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(kN)	Restbøyestrekfasthet	Bjelke1	B1	B2	Bjelke dimensjoner		
13,7							Hsp1	Hsp2	
	0	0,34			0,11	150,33	150,2	122,99	122,71
FL	0,05	1,04	fct,L		0,34				
	0,1	1,99			0,66				
	0,15	2,97			0,98				
	0,2	4,2			1,39				
	0,25	6,9			2,28				
	0,3	10,15			3,36				
	0,35	13,01			4,30				
	0,4	11,16			3,69				
	0,45	10,33			3,42				
F1	0,5	9,73	fr1		3,22				
	0,55	10,12			3,35				
	0,6	10,2			3,37				
	0,65	10,51			3,48				
	0,7	10,21			3,38				
	0,75	10,43			3,45				
	0,8	10,72			3,55				
	0,85	10,71			3,54				
	0,9	10,8			3,57				
	0,95	10,96			3,62				
	1	11,06			3,66				
	1,05	11,22			3,71				
	1,1	11,27			3,73				
	1,15	11,44			3,78				
	1,2	11,62			3,84				
	1,25	11,6			3,84				
	1,3	11,69			3,87				
	1,35	11,58			3,83				
	1,4	11,52			3,81				
	1,45	11,72			3,88				
F2	1,5	11,88	fr2		3,93				
	1,55	11,69			3,87				
	1,6	11,74			3,88				
	1,65	11,72			3,88				
	1,7	11,49			3,80				
	1,75	11,56			3,82				
	1,8	11,69			3,87				
	1,85	11,53			3,81				
	1,9	11,41			3,77				
	1,95	10,89			3,60				
	2	10,88			3,60				
	2,05	10,83			3,58				
	2,1	10,65			3,52				
	2,15	10,71			3,54				
	2,2	10,73			3,55				
	2,25	10,66			3,53				
	2,3	10,58			3,50				
	2,35	10,49			3,47				
	2,4	10,34			3,42				
	2,45	10,33			3,42				
F3	2,5	10,35	fr3		3,42				
	2,55	9,99			3,30				
	2,6	10,15			3,36				
	2,65	10,13			3,35				
	2,7	9,85			3,26				
	2,75	9,97			3,30				
	2,8	10,02			3,31				
	2,85	9,89			3,27				
	2,9	9,7			3,21				
	2,95	9,67			3,20				
	3	9,25			3,06				
	3,05	9,53			3,15				
	3,1	9,62			3,18				
	3,15	9,35			3,09				
	3,2	9,2			3,04				
	3,25	9,23			3,05				
	3,3	9,22			3,05				
	3,35	9,02			2,98				
	3,4	9,02			2,98				
	3,45	8,96			2,96				
F4	3,5	8,77	fr4		2,90				
	3,55	8,81			2,91				
	3,6	8,79			2,91				
	3,65	8,48			2,80				
	3,7	8,46			2,80				
	3,75	8,57			2,83				
	3,8	8,37			2,77				
	3,85	8,29			2,74				
	3,9	8,32			2,75				
	3,95	8,22			2,72				
	4	8,13			2,69				

# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(kN)	Restbøyestrekfasthet	Bjelke1	B1	B2	Bjelke dimensjoner		
14,36							Hsp1	Hsp2	
	0	0,35			0,11	151,27	151,3	122,83	123,31
FL	0,05	0,83	fct,L		0,27				
	0,1	1,81			0,59				
	0,15	2,79			0,91				
	0,2	4,31			1,41				
	0,25	6,05			1,98				
	0,3	9,69			3,17				
	0,35	13,82			4,52				
	0,4	12,31			4,03				
	0,45	11,1			3,63				
F1	0,5	10,11	fr1		3,31				
	0,55	10,12			3,31				
	0,6	9,45			3,09				
	0,65	9,71			3,18				
	0,7	9,93			3,25				
	0,75	9,81			3,21				
	0,8	9,93			3,25				
	0,85	10,05			3,29				
	0,9	10,15			3,32				
	0,95	10,26			3,36				
	1	10,27			3,36				
	1,05	10,41			3,41				
	1,1	10,61			3,47				
	1,15	10,51			3,44				
	1,2	10,66			3,49				
	1,25	10,66			3,49				
	1,3	10,68			3,50				
	1,35	10,86			3,59				
	1,4	10,87			3,56				
	1,45	10,94			3,58				
F2	1,5	10,95	fr2		3,58				
	1,55	10,86			3,55				
	1,6	11			3,60				
	1,65	11,1			3,63				
	1,7	10,78			3,53				
	1,75	10,91			3,57				
	1,8	11			3,60				
	1,85	11,07			3,62				
	1,9	11,08			3,63				
	1,95	10,83			3,54				
	2	10,88			3,56				
	2,05	10,88			3,56				
	2,1	10,85			3,55				
	2,15	10,83			3,54				
	2,2	10,7			3,50				
	2,25	10,78			3,53				
	2,3	10,58			3,46				
	2,35	10,67			3,49				
	2,4	10,59			3,47				
	2,45	10,53			3,45				
F3	2,5	10,44	fr3		3,42				
	2,55	10,47			3,43				
	2,6	10,26			3,36				
	2,65	10,09			3,30				
	2,7	9,86			3,23				
	2,75	9,71			3,18				
	2,8	9,72			3,18				
	2,85	9,69			3,17				
	2,9	9,53			3,12				
	2,95	9,65			3,16				
	3	9,34			3,06				
	3,05	9,39			3,07				
	3,1	9,65			3,16				
	3,15	9,29			3,04				
	3,2	9,4			3,08				
	3,25	9,4			3,08				
	3,3	9,26			3,03				
	3,35	9,29			3,04				
	3,4	9,29			3,04				
	3,45	9,14			2,99				
F4	3,5	9,13	fr4		2,99				
	3,55	9,07			2,97				
	3,6	8,84			2,89				
	3,65	8,82			2,89				
	3,7	8,74			2,86				
	3,75	8,76			2,87				
	3,8	8,71			2,85				
	3,85	8,58			2,81				
	3,9	8,55			2,80				
	3,95	8,46			2,77				
	4	8,54			2,80				

# ReforceTech 10kg/m3 55mm (32mm helix)

Load(Max)	CMOD	Last(kN)	Restbøyestrekfasthet	Bjelke1	B1	B2	Bjelke dimensjoner		
13,86							Hsp1	Hsp2	
	0	0,2			0,07	150,64	149,53	123,07	123,67
FL	0,05	0,35	fct,L		0,11				
	0,1	0,65			0,21				
	0,15	1,16			0,38				
	0,2	1,79			0,59				
	0,25	2,51			0,82				
	0,3	3,44			1,13				
	0,35	4,43			1,45				
	0,4	6,2			2,04				
	0,45	9,21			3,02				
F1	0,5	11,77	fr1		3,86				
	0,55	13,8			4,53				
	0,6	12,24			4,02				
	0,65	10,13			3,33				
	0,7	10,38			3,41				
	0,75	10,25			3,37				
	0,8	10,27			3,37				
	0,85	10,5			3,45				
	0,9	10,56			3,47				
	0,95	10,8			3,55				
	1	11,11			3,65				
	1,05	11,02			3,62				
	1,1	11,18			3,67				
	1,15	11,38			3,74				
	1,2	11,58			3,80				
	1,25	11,6			3,81				
	1,3	11,65			3,82				
	1,35	11,99			3,94				
	1,4	12,09			3,97				
	1,45	12,23			4,02				
F2	1,5	12,1	fr2		3,97				
	1,55	12,19			4,00				
	1,6	12,31			4,04				
	1,65	12,16			3,99				
	1,7	12,47			4,09				
	1,75	12,66			4,16				
	1,8	12,74			4,18				
	1,85	12,78			4,20				
	1,9	12,84			4,22				
	1,95	12,81			4,21				
	2	12,81			4,21				
	2,05	12,79			4,20				
	2,1	12,91			4,24				
	2,15	12,73			4,18				
	2,2	12,44			4,08				
	2,25	12,62			4,14				
	2,3	12,49			4,10				
	2,35	12,47			4,09				
	2,4	12,44			4,08				
	2,45	12,39			4,07				
F3	2,5	12,17	fr3		4,00				
	2,55	12,19			4,00				
	2,6	12,01			3,94				
	2,65	11,86			3,89				
	2,7	11,68			3,83				
	2,75	11,57			3,80				
	2,8	11,47			3,77				
	2,85	11,46			3,76				
	2,9	11,32			3,72				
	2,95	11,4			3,74				
	3	11,43			3,75				
	3,05	11,31			3,71				
	3,1	11,14			3,66				
	3,15	10,89			3,58				
	3,2	10,59			3,48				
	3,25	10,43			3,42				
	3,3	10,41			3,42				
	3,35	10,44			3,43				
	3,4	10,54			3,46				
	3,45	10,38			3,41				
F4	3,5	10,32	fr4		3,39				
	3,55	10,23			3,36				
	3,6	10,09			3,31				
	3,65	9,87			3,24				
	3,7	9,96			3,27				
	3,75	10,03			3,29				
	3,8	10,02			3,29				
	3,85	9,87			3,24				
	3,9	9,86			3,24				
	3,95	9,77			3,21				
	4	9,77			3,21				

Serie		Støpedato		
ReforceTech 10kg/m <sup>3</sup> 55mm (32mm helix)		07.02.2022		
Bjelke	Width		Hight notch	
1	149,4	150,4	122,3	123,0
2	150,3	149,8	122,9	122,5
3	150,3	149,1	123,2	122,4
4	150,3	150,2	123,0	122,7
5	151,3	151,3	122,8	123,3
6	150,6	149,5	123,1	123,7

Fyll inn i feltene med denne fargen

terning	St.dato	Vekt luft	vekt vann	densitet	dato	Trykkflate(cm: Fasthet(kN)	Fasthet(Mpa)	
1	07.02.2022	2386,1	1369,8		07.03.2022	100	499,1	49,9
2	07.02.2022	2392,3	1376		07.03.2022	100	530,3	53,0
3	07.02.2022	2400,7	1383,5		07.03.2022	100	509	50,9
4	07.02.2022	2387,6	1362,9		07.03.2022	100	593	59,3
5	07.02.2022	2359,5	1342,6		07.03.2022	100	586,6	58,7
6	07.02.2022	2360,6	1342,1		07.03.2022	100	574,1	57,4

#### Fiber telling

Resept	10 kg/m <sup>3</sup>	Fiberdosering	20
Lengde	55 mm		

