



OsloMet - storbyuniversitetet

Institutt for Bygg- og energiteknikk - Bygg
Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo
Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

GRUPPE NR. 15

TILGJENGELIGHET
Åpen

Telefon: 67 23 50 00
www.oslomet.no

BACHELOROPPGAVE

BACHELOROPPGAVENS TITTEL	DATO
Fiber reinforced polymer (FRP) som slakkarmering i momentpåkjenne betongkonstruksjoner.	23.05.2018
	ANTALL SIDER / ANTALL VEDLEGG
	68/10
FORFATTERE	VEILEDER
Martin Wilhelmsen, Vlad Aleksander Lundeland og Sigbjørn Tveit	Mahdi Kioumars
UTFØRT I SAMMARBEID MED	KONTAKTPERSON
Sweco Norge AS	Lars Jørgen Tangstad

SAMMENDRAG

Denne bacheloroppgaven omhandler bruken av ikke-metallisk slakkarmering i momentpåkjenne konstruksjonselementer av betong. Formålet var å danne et bilde av armeringens virkning i betongkonstruksjoner. Oppgaven omhandler prosjektering av betongelementer armert med stenger av fiber reinforced polymer (FRP) og tar utgangspunkt i brukonstruksjoner i maritimt norsk klima.

Arbeidet baserer seg på en kombinasjon av kvalitativ og kvantitativ metode, med en litteraturstudie til innføring og opplysning, etterfulgt av dimensjonering og prisoptimalisering.

Resultatenes generaliserbarhet har stått i hovedfokus da oppgavens formål ikke spesifikt tilknyttes brukonstruksjoner.

Arbeidet har ledet frem til en metode for å forenkle dimensjoneringsprosessen. Det er utarbeidet et dimensjoneringsverktøy med formler som tilnærmer prisgunstige armeringsmengder i forhold til betong, basert på American Concrete Institute (ACI) sin dimensjoneringsfilosofi.

3 STIKKORD

FRP-armering

Varige konstruksjoner

Prisoptimalisering

Forord

Denne hovedoppgaven er utarbeidet for bygglinjen i ingeniørutdanningen, studieretning for konstruksjonsteknikk ved OsloMet – storbyuniversitetet. Denne oppgaven avslutter vår bachelorgrad og utgjør 20 studiepoeng. Arbeidet er gjennomført i perioden fra januar til mai 2018 i samarbeid med brukgruppen i Sweco.

Igjennom studieløpet har vi vært igjennom flere spennende fag, med størst interesse for konstruksjonsfagene. Vi ønsket å benytte tilegnet kunnskap som utgangspunkt for å se utover det som er lagt frem som pensum og kompetansemål i bachelorutdanningen. Som en måte å gjøre dette på valgte vi å fordype oss i et nytt fagfelt, nemlig komposittmaterialer. Det har blitt lagt ned mye arbeid i å gjøre seg kjent med de utvalgte materialers egenskaper, oppførsel og ny dimensjoneringsfilosofi. Arbeidet har medført både varierte og utfordrende arbeidsoppgaver, samt gode diskusjoner og spørsmål.

Interessen for FRP som byggemateriale oppstod først da vi ble presentert for et forskningsprosjekt Sweco gjennomførte i samarbeid med vegdirektoratet. Målet var å se virkningen av FRP-armering i et sekundærbærene bruelement. Vi ønsket å ta det neste steget og målet ble derfor å se på anvendelsen av FRP som konstruktiv armering i betongkonstruksjoner utsatt for aggressivt miljø. Oppgaven er rettet mot studenter og prosjekterende ingeniører - som en introduksjon til bruk av FRP som konstruktiv armering, og som et verktøy for praktisk dimensjonering.

Vi vil takke personer som har bidratt med innspill, veiledning og hjelp med hovedoppgaven. En stor takk rettes til vår interne veileder Førsteamanuensis Mahdi Kioumars, Førsteamanuensis Andre Brodtkorb, samt vår eksterne veileder Lars Jørgen Tangstad, sivilingeniør ved brukgruppen i Sweco og resten av brukgruppen.

Oslo, 23.05.2018



Martin Wilhelmsen



Vlad Aleksander Lundeland



Sigbjørn Tveit

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven omhandler bruken av ikke-metallisk slakkarmering i momentpåkjente konstruksjonselementer av betong. Formålet var å danne et bilde av armeringens virkning i betongkonstruksjoner, samt sette søkelyset på materialenes anvendbarhet. Oppgaven omhandler prosjektering av betongelementer armert med stenger av FRP¹ og tar utgangspunkt i brukonstruksjoner i maritimt norsk klima. De utvalgte komposittmaterialenes mekaniske egenskaper er presentert i en litteraturstudie sammen med produksjonsmetoder og pris. Det ble utarbeidet en analysemodell der geometri og dimensjoner gjenspeiler typiske bruer i Norge.

Da det primære formålet var å se på anvendbarhet ble prosjektofanget begrenset til konstruktiv armering. Arbeidet ble strukturert og utført slik at problemstillingens aspekter kontinuerlig belyses igjennom hele oppgaven. Dette ble gjort ved en kombinasjon av kvalitativ og kvantitativ metode, med en litteraturstudie til innføring og opplysning, etterfulgt av dimensjonering og prisoptimalisering. Grunnet mangel på testapparat ble arbeidet avgrenset til teoretiske analyser ved bruk av håndberegninger, Excel [1], Robot Structural Analysis [2] og MATLAB [3]. Dimensjoneringen ble utført etter ACI² sin standard for FRP-armering og ble tilpasset nasjonale tillegg. Dimensjoneringsrutiner for bru-prosjektering etter Eurokoder og vegvesenets håndbøker ble tilpasset oppgavens forutsetninger og materialenes begrensninger.

Resultatenes generaliserbarhet har stått i hovedfokus da oppgavens formål ikke spesifikt tilknyttes brukonstruksjoner. Beregninger som ble lagt til grunn for resultatene baserer seg på gjeldene lastkombinasjon og er avgrenset til isolerte bjelke- og dekkelementer, for å undersøke armeringens virkning på generell basis.

Arbeidet har ledet frem til en metode for å forenkle dimensjoneringsprosessen. Det er utarbeidet et dimensjoneringsverktøy med formler som tilnærmer prisgunstige armeringsmengder i forhold til betong, basert på *ACI 440.1R-15* sin dimensjoneringsfilosofi.

For å fremme FRP-armering som byggemateriale kreves ytterligere forskning på produksjonsmetoder og materialsammensetninger som øker E-modulen til komposittarmeringen. Vel etablerte metoder for teoretisk utregning av materialegenskaper indikerer at produktene på dagens marked har potensial for videre forbedring.

¹ Fiber Reinforced Polymer

² American Concrete Institute

Abstract

This bachelor thesis deals with the use of non-metallic, non-prestressed reinforcement in flexural concrete elements. The purpose was to examine the reinforcement's various effects in concrete structures, as well as to highlight the applicability of the materials. The assignment deals with the design of concrete elements reinforced with FRP³ bars and is based on use in maritime Norwegian climate. The mechanical properties of the selected composite materials are presented in a literature study where production methods and price also were assessed. A model was developed in which geometry and dimensions represent typical bridges in Norway.

As the primary purpose was to examine usability, the project scope was limited to constructive reinforcement. The work was structured and executed so that aspects of the addressed issue are continually highlighted throughout the thesis. This was done by a combination of qualitative and quantitative methods, with an informative literature study, followed by the design process and a price optimization. Due to lack of test equipment the work was limited to theoretical analyses by hand calculations, Excel [1], Robot Structural Analysis [2] and MATLAB [3]. The design process was performed according to the ACI⁴ standard for FRP reinforcement and was adapted to the Norwegian national appendix. Design routines for bridges from Eurocodes and the Norwegian Public Roads Administrations manuals were adapted to the preconditions of the thesis and the materials limitations.

As the ability to generalize results has been the aim of the thesis, the purpose of the work has not been specifically linked to bridge constructions. The calculations which the results were based on, rely on the current load combination and are limited to beams and slabs. This is to investigate the general effects that the reinforcement has on the concrete elements.

The work has led to a method simplifying the design process. A tool has been developed with formulas that approximate economically optimal reinforcement amounts relative to concrete based on *ACI 440.1R-15's* design philosophy.

To promote FRP-reinforcement as a building material, further research on production methods and the material compositions of the products to increase the Young's modulus is required. Well established methods for theoretical calculations of material properties indicate that the products Tilgjengelig on today's market have the potential for further improvement.

³ Fiber Reinforced Polymer

⁴ American Concrete Institute

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Abstract	iv
Innholdsfortegnelse	v
Symbolliste	vii
Figurliste	ix
Tabelliste	x
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål.....	2
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Case-forutsetninger.....	3
1.5 Avgrensninger.....	5
2 Metode.....	6
2.1 Drøfting av metoder	6
2.2 Valgt metode	6
2.2.1 Materiell og programvare	6
2.2.2 Prosedyre/Gjennomføring.....	6
2.3 Refleksjon og kvalitetssikring	7
2.3.1 Validitet	7
2.3.2 Reliabilitet.....	7
2.3.3 Generaliserbarhet.....	7
3 Litteraturstudie - Materialteori	8
3.1 Stål.....	8
3.1.1 Generelt.....	8
3.1.2 Materialoppførsel.....	8
3.1.3 Ytre miljø	10
3.2 Fiber Reinforced Polymer (FRP)	12
3.2.1 Generelt.....	12
3.2.2 Hvorfor bruke FRP?	12
3.2.3 Materialelegenskaper.....	14
3.2.4 Fiberframstilling.....	20

3.2.5	FRP produktetegenskaper	23
3.2.6	Tilgjengelige FRP-produkter	26
3.2.7	Bestandighet/Ytre miljø	28
3.2.8	FRP som byggemateriale	29
4	Dimensjonering	32
4.1	Bæresystem og konstruksjonselementer	32
4.1.1	Bæresystem	32
4.1.2	Statisk system	33
4.1.3	Konstruksjonselementer	33
4.1.4	Overdekning	35
4.2	Laster og grensetilstander	36
4.2.1	Laster	36
4.2.2	Bruddgrensetilstand	37
4.2.3	Bruksgrensetilstand	38
4.3	Dimensjonering av FRP armerte konstruksjoner.....	38
4.3.1	Antagelser.....	38
4.3.2	Bruddgrensetilstand	38
4.3.3	Momentdimensjonering.....	43
4.3.4	Bruksgrenstilstand.....	44
4.3.5	Prisoptimalisering av FRP-armerte tverrsnitt.....	48
5	Resultat og diskusjon.....	50
5.1	Dimensjonering, del 1 – generell analyse.....	50
5.1.1	Rektangulær bjelke.....	50
5.1.2	T-bjelke	53
5.1.3	Dekke	55
5.2	Prisoptimalisering av tverrsnitt	57
6	Konklusjon	63
	Kildeliste	64
	Vedlegg.....	68

Symbolliste

Latinske bokstaver

$A_{s,f}$	Armeringsareal av stål eller FRP-armering
A_{gt}	Grensetøyning/forlengelse ved maksimal last
a	Ekvivalent trykksonehøyde
b	Bredde
b_{eff}	Effektiv bredde av én flensside, uten steg
b_w	Stegbredde
c_c	Overdekning for hovedarmering
c_{min}	Minimumsoverdekning
$c_{min,b}$	Minimumsoverdekning med hensyn til heft
$c_{min,dur}$	Minimumsoverdekning med hensyn til bestandighet
c_{nom}	Nominell overdekning
Δc_{dev}	Toleransetillegg for overdekning
$c_{skjær}$	Diameter skjærbøyle
d	Effektiv tverrsnittshøyde
d_c	Avstand fra senter av armering til underkant av bjelken
$d_{s,f}$	Nedbøyning i tverrsnitt armert med stål eller FRP
d_δ	Nødvendig effektiv tverrsnittshøyde for å tilfredsstille nedbøyning
E_f	E-modul, FRP
f_f	Strekkspenninger, FRP
f_{cd}	Dimensjonerende trykkbruddfasthet, betong
f_{fu}	Dimensjonerende strekkbruddfasthet, FRP
f_{fs}	Bruksspenninger i FRP-armering
h	Høyde
k_b	Heftkoeffisient
l	Lengde
l_o	Spennvidde
M_n	Nominell bøyemomentkapasitet
M_u	Dimensjonerende bøyemoment
M_f	Massefraksjon av fiber
M_m	Massefraksjon av matriks
m_m	Masse av matriks
m_f	Masse av fiber
m_c	Masse av komposittmateriale
R_m	Strekfasthet
R_e	Flytegrense
s_{max}	Største tillatte innbyrdes avstand for å ivareta rissviddekrav.
t	Tid
t	Tykkelse
V_{corr}	Korrosjonsrate
$V_{corr,a}$	Gjennomsnittlig korrosjonsrate

V_m	Volumfraksjon av matriks
V_f	Volumfraksjon av fiber
v_m	Volum av matriks
v_f	Volum av fiber
v_c	Volum av komposittmateriale
w	Maksimal rissvidde
x	Trykksonehøyde
x_b	Balansert trykksonehøyde
x_s	Trykksonehøyde i bruksgrense

Greske bokstaver

α	Forholdstall
β	Forhold mellom avstand fra nøytralakse til mest påkjente strekkfiber og avstand fra nøytralaksen til senter av strekkarmering
δ	Nedbøyning
ε_c	Trykktøyning i betong
ε_{cu}	Tøyningsgrense for trykk i betong
ε_{cu3}	Maksimal effektiv trykktøyning
ε_{fu}	Dimensjonerende bruddtøyninger i armering
η	Elastisitetsforhold
η	Faktor for definisjon av effektiv fasthet
θ	Vinkel
Λ_{FRP}	Prisoptimalt forhold mellom armeringsmengde og effektiv tverrsnittshøyde.
λ	Faktor for definisjon av effektivtrykksonehøyde
ρ_c	Kompositttetthet
ρ_f	Fibertetthet
ρ_m	Matrikstetthet
ρ_f	Armeringsforhold til FRP-armerte tverrsnitt
ρ_{fb}	Balansert armeringsforhold
σ_F	Flyttøyning i armering
σ_B	Bruddtøyning i armering
ϕ	Reduksjonsfaktor for duktilitet
ϕ	Diameter
ϕ'	Redusert diameter

Figurliste

Figur 1.1-1: Korrosjonskader på Huldalskilen og Strauman 3. Typiske korrosjonskader på norske bruer.	1
Figur 1.4-1a: Analysemodell, bjelkebru, oversiktsbilde. Denne modellen er utgangspunktet for lastsituasjon og beregninger.	4
Figur 3.1-1: Arbeidsdiagram for stål. Viser sammenhengen mellom spenninger langs vertikal akse og tøyninger langs horisontal akse, for stål i ulike faser.	8
Figur 3.1-2: Definisjon av duktilitet. Stor forskjell på R_m og R_e karakteriseres som høy duktilitet.	9
Figur 3.1-3: Viser hvor mye konstruksjonens levetid forlenges ved økning av overdekning.	10
Figur 3.1-4: Viser opprinnelig diameter og redusert diameter som følge av korrosjon.	11
Figur 3.2-1: Viser forskjellige kompositttyper. Sandwichpanel, laminære kompositter samt fiber- og partikkelkompositter.	12
Figur 3.2-2: MAGLEV-tog svever over skinnene ved hjelp av et sterkt magnetisk felt. Teknologien er avhengig av elektromagnetisk nøytralitet.	13
Figur 3.2-3: Soft-eye, midlertidig sjaktvegg armert med GFRP for bruk i tunelldrift.	14
Figur 3.2-4: Karbon i form av fibre og matter. Mattenes høye styrke i både lengde- og tverretning oppnås ved å flette fibrene.	16
Figur 3.2-5: Basaltfiber uten matris.	17
Figur 3.2-6: Pultrusjonsprosess: 1 – Kontinuerlige fibre på rull, 2 - Strekkrolle, 3 - Resinbad, 4 - Imprignert fiber, 5 – Form- og herdekammer, 6 - Trekkmekanisme, 7 - Ferdig produkt.	21
Figur 3.2-7: Viser trinnene i produksjonsprosessen av basaltarmering.	22
Figur 3.2-8: Krypdeformasjonskurve over en konstruksjons levetid. Viser hvordan tøyningene utvikler seg igjennom de tre fasene av en konstruksjons levetid.	25
Figur 3.2-9: SN-kurver for FRP, stål og aluminium. Viser sammenhengen mellom størrelsen på varierende spenninger (S) og antall gjentatte belastninger (N).	26
Figur 3.2-10: Arbeidsdiagrammer. Figuren viser sammenheng mellom karakteristisk spenning og tøyning for de valgte armeringstypene. FRP-armeringene har lineær tøyningutvikling til brudd, mens stål har et lineært elastisk intervall i starten og går så over i en plastisk fase med store tøyninger ved flyt.	27
Figur 3.2-11: Albstad-Ebingen bridge, en av flere bruer utelukkende armert med FRP.	31
Figur 4.2-1: Viser lastenes plassering, med utgangspunkt i LM1.	37
Figur 4.3-1: Arbeidsdiagrammet viser stålets lineære tøyningutvikling frem til flyt. Stålets duktile natur trer i kraft etter at flyt er oppnådd.	39
Figur 4.3-2 Teoretisk moment/krumnings-diagram: Betongtverrsnitt av stål og FRP-armering. ϕ -faktorer henholdsvis 0.9, 0.65, 0.55, 0.65 for (1), (2), (3) og (4).	40
Figur 4.3-3: Bruddmekanismer.	41
Figur 4.3-4: Viser reduksjonsfaktor for duktilitet, ϕ , som funksjon av armeringsforhold.	42
Figur 5.1-1: Trykksonehøydens reduksjon ved bruk av armering med høyere bruddtøyning og lavere E-modul, når bruddmekanismen er betongknusing.	51
Figur 5.1-2: Momentverdier, ribbedekke.	54
Figur 5.1-3: Nedbøyninger, ribbedekke.	54
Figur 5.2-1: Visuell fremstilling av prisoptimale tverrsnitt. Viser hvordan armeringsmengden og tverrsnittshøyden varierer for de ulike FRP-armeringene.	57
Figur 5.2-2: Prisutvikling ved varierende betongkvalitet.	59

Figur 5.2-3: Prisutvikling for momentdimensjonerte tverrsnitt ved varierende betongkvalitet.	59
Figur 5.2-4: Prisutvikling med en bjelkebredde på 200mm ved varierende betongkvalitet. Knekkene på grafene indikerer et skifte av dimensjonerende kriterium. Tverrsnittene går fra å være dimensjonert for moment til å være dimensjonert for nedbøyning.	60
Figur 5.2-5: Reduksjonsfaktoren, ϕ , sin innvirkning på momentkapasitet.....	61
Figur 5.2-6: Breddens innvirkning på stigningen av prisoptimal linje.	62

Tabelliste

Tabell 3.1-1: Duktilitetsklasser, karakteristiske verdier.	9
Tabell 3.2-1: Ulike glassfibertyper.....	15
Tabell 3.2-2: Karakteristiske egenskaper for ulike fibertyper.	18
Tabell 3.2-3: Karakteristiske egenskaper for ulike matrikser.....	19
Tabell 3.2-4: Typiske densiteter for FRP stenger for volumfraksjon, $V_f = 0,5-0,75$	24
Tabell 3.2-5: Typiske varmeutvidelseskoeffisienter for stål- og FRP-armering.....	24
Tabell 3.2-6: Typiske egenskaper for stål- og FRP-armering.....	24
Tabell 3.2-7: Oversikt over utvalgte FRP-produkter.....	27
Tabell 3.2-8: Produktdata til utvalgte FRP-Produkter, fra produsent.	27
Tabell 3.2-9: Vurderingstabell for ulike FRP-armeringstyper.....	28
Tabell 3.2-10: Prisoversikt. Kroner per mm ² per løpemeter, med faktor for spesifikk pris, i forhold til stål.	30
Tabell 4.2-1: Oversikt over karakteristiske laster.....	36
Tabell 4.2-2: Laster og lastvirkninger.	37
Tabell 4.2-3: Lastfaktorer.	38
Tabell 5.1-1: Rektangulær bjelke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.....	50
Tabell 5.1-2: Sammenheng mellom armeringens E-modul og nødvendig mengde armering relativt til stål.	51
Tabell 5.1-3: Sammenheng mellom armeringens E-modul og nødvendig effektiv trykksonehøyde.	52
Tabell 5.1-4: T-bjelke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.	53
Tabell 5.1-5: Oppsummering av nedbøyningsresultater for GFRP-armerte T-bjelker.	54
Tabell 5.1-6: Dekke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.....	55
Tabell 5.1-7: Rangering av bruddstyrke og armeringsbehov ved låst tverrsnitt.....	56
Tabell 5.2-1: Prisoptimale rektangulære-tverrsnitt.	57
Tabell 5.2-2: Relativ egenvekt for prisoptimaliserte tverrsnitt.	58
Tabell 5.2-3: Prisoptimale forholdstall for ulike FRP-typer.	62

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Korrosjon og nedbrytning av stålarmerte betongkonstruksjoner påfører samfunnet store kostnader. For infrastruktur er det i dag estimert en verdensomfattende reparasjons- og vedlikeholdskostnad på over 100 milliarder euro [4]. En stor andel av denne kostnaden skyldes betongkonstruksjoners bestandighet. I 2017 publiserte VG en tilstandsrapport fra Norges omlag 17 300 bruer på riks- og fylkesveier. Ifølge rapporten har omlag 1 100 bruer store eller kritiske skader med innvirkning på bæreevne og trafiksikkerhet. Vegdirektoratet estimerte et vedlikeholdsetterslep på landets broer, på rundt 15 milliarder kroner [5].



*Figur 1.1-1: Korrosjonskader på Huldalskilen og Strauman 3. Typiske korrosjonskader på norske bruer.
Kilde: VG.no De forsømte broene 2017.*

Det finnes per i dag flere måter å beskytte brukonstruksjonene mot nedbrytning av stål på - men hva om disse bruene hadde vært bygd på en mer innovativ og bærekraftig måte? Dagens lovverk stiller meget strenge krav til utførelse, men man ser likevel at det oppstår skader grunnet unøyaktighet og menneskelig svikt. For å dekke mangler ved utførelse kreves nye materialer som reduserer behovet for vedlikehold og samtidig bidrar til å øke konstruksjoners levetid. Kanskje kunne man unngått milliardeterslepet med mer levedyktige og bestandige konstruksjoner som er godt rustet mot et aggressivt klima.

Etter møte med leder for brugruppen i Sweco ble vi introdusert for ikke-metallisk armering, FRP. Det ble da uttrykt et ønske om at vi skulle se på mulighetene for bruk av FRP-armering i brukonstruksjoner. Bru er én av fem grupper i bygg-avdelingen, og jobber med dimensjonering og utforming av bruer, kulverter, støttemurer og andre spesialkonstruksjoner. Vi syntes dette hørtes ut som en spennende utfordring og takket ja til tilbudet.

Denne oppgaven har rotfeste i et forskningsprosjekt brugruppen gjennomførte for Statens Vegvesen i tidsperioden november-desember 2017. Her var Sweco blant annet i kontakt med Reforcetech, en norsk bedrift som spesialiserer seg innen ikke-metallisk armering, og prøvde å kartlegge aktuelle bruksområder. Som utgangspunkt i forskningsprosjektet ble det brukt en tidligere utarbeidet brumodell, der konstruksjonens kantbjelke var analyseobjektet. En kantbjelke er et sekundærbærende element som ikke er utsatt for store laster. Den deformeres etter brubanen og er kun av signifikant

betydning ved ulykkeslast i form av påkjørsel, samt for montasje av rekkverk. Dette var av passende skala for prosjektet og det ble gjennomført beregninger av kantbjelken med ulike typer ikke-metallisk armering. Resultatene ble så sammenliknet med et tilsvarende stålarmeret tverrsnitt.

Etter et møte med Lars Jørgen Tangstad, sivilingeniør i Sweco med overordnet ansvar i prosjektet, ble vi presenter for spørsmål og problemstillinger som de satt igjen med. Vi valgte på bakgrunn av møtet å fordype oss i temaet, med mål om å studere nytte og anvendbarhet av FRP som konstruktiv armering i momentpåkjennte konstruksjonselementer av betong.

1.2 Formål

Hensikten med oppgaven er å undersøke fordeler og ulemper, muligheter og begrensninger ved bruk av ikke-metallisk armering til å ta konstruktive krefter i korrosjonsutsatte betongkonstruksjoner.

Sweco ønsker en redegjørelse av hvorvidt ikke-metallisk armering kan være et reelt alternativ til stålarmering i brukonstruksjoner som er spesielt korrosjonsutsatte. Sentralt for denne oppgaven blir å sammenligne utvalgte typer ikke-metallisk armering med stål og finne forskjeller og likheter i materialegenskaper - det som angår dimensjoneringsprosessen - men også den generelle anvendbarheten. Det vil undersøkes hvordan forskjellige materials egenskaper påvirker spenningsbildet, samt hvilke konsekvenser dette har vedrørende krav til sikkerhet, dimensjonering, utførelse og økonomi.

Tilgjengelig informasjon om materialenes egenskaper, samt tidligere tilegnet kunnskap, vil bli lagt til grunn for beregninger av elementers oppførsel. For å få et klart bilde av hvordan bærende konstruksjonselementer av FRP-armering oppfører seg brukes varierende armeringsmengder -og typer, samt variasjoner i tverrsnittsdimensjoner til sammenlikning.

Resultatene skal gi klarere innsikt i hvilke parametere som spiller signifikant rolle ved substitusjon av armering, samt fremme viktigheten av- og interessen for videre forskning innen fagfeltet.

1.3 Problemstilling

Denne bacheloroppgaven belyser muligheter og utfordringer ved bruk av FRP som konstruktiv armering i konstruksjoner utsatt for aggressivt miljø, med utgangspunkt i bruer. Fokus vil primært rettes mot FRP-armeringens anvendbarhet og substitusjonsevne ovenfor tradisjonell stålarmering. Vi ønsker å se om FRP-armering er en mulig substitutt for tradisjonell stålarmering. Da stål er et av de mest utbredte materialene til armeringsformål i bru og andre betongkonstruksjoner er egenskaper som gjør stål attraktivt som armering godt kjent. Grunnet manglende kjennskap til FRP-armeringens virkninger har ikke-metalliske armeringstyper som byggemateriale foreløpig ikke fått fotfeste i en konservativ byggebransje, snart 30 år etter det ble introdusert på markedet [4]. Det er derfor av stor interesse å se på virkningen av FRP-armeringens egenskaper i forhold til stål. Dette leder til følgende problemstilling:

I hvilken grad påvirkes dimensjoneringsprosess, økonomi og geometri ved bruk av FRP som slakkarmering i momentpåkjennte betongkonstruksjonsdeler, og hvordan kan disse aspektene bedres?

1.4 Case-forutsetninger

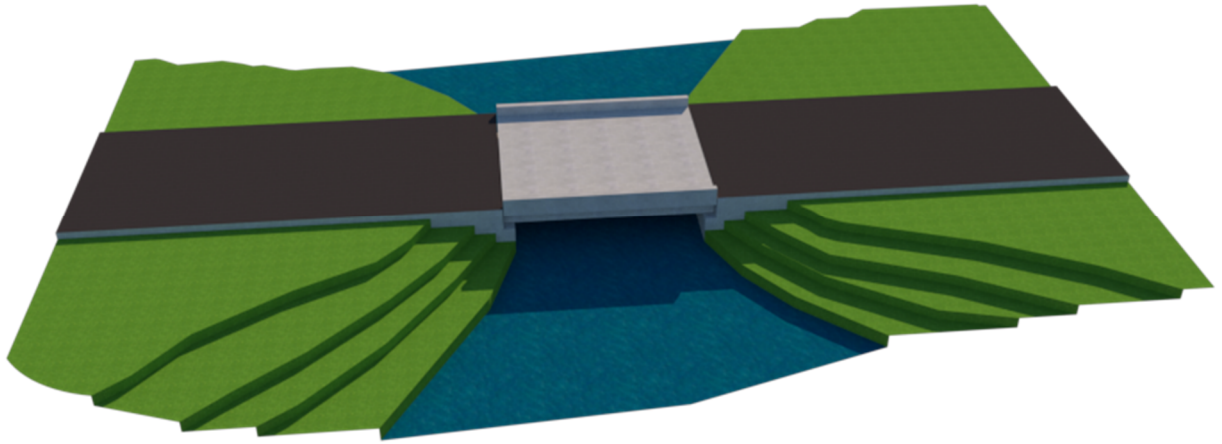
Som et utgangspunkt for å besvare problemstillingen er det tatt utgangspunkt i en fiktiv bjelkebru, da dette gir et realistisk grunnlag til å bestemme lastsituasjon og er noe å knytte kvantitative resultater opp mot. En bjelkebru kan deles opp i ulike konstruksjonselementer og anses derfor som en passende analysemodell for å se på virkningen av FRP-armering i ulike konstruksjonselementer. Da de ulike elementene i en bjelkebru også kan finnes igjen i andre konstruksjoner tillater det, i kombinasjon med valgt fremgangsmåte, å utvide resultatene til å gjelde andre konstruksjoner enn bare bruer. Dette er svært sentralt da intuitive anvendelsesområder for ikke-korroderende armering også er andre konstruksjoner utsatt for aggressivt miljø. Eksempler på dette er kaier og betongkonstruksjoner i maritimt klima.

Det er for hele oppgaven konsekvent brukt betongkvalitet B45, med tilhørende egenskaper, samt forutsetning om at utførende entreprenør blander betong, slik at den til enhver tid, både i støpefase og igjennom hele sin levetid tilfredsstillende spesifiserte krav.

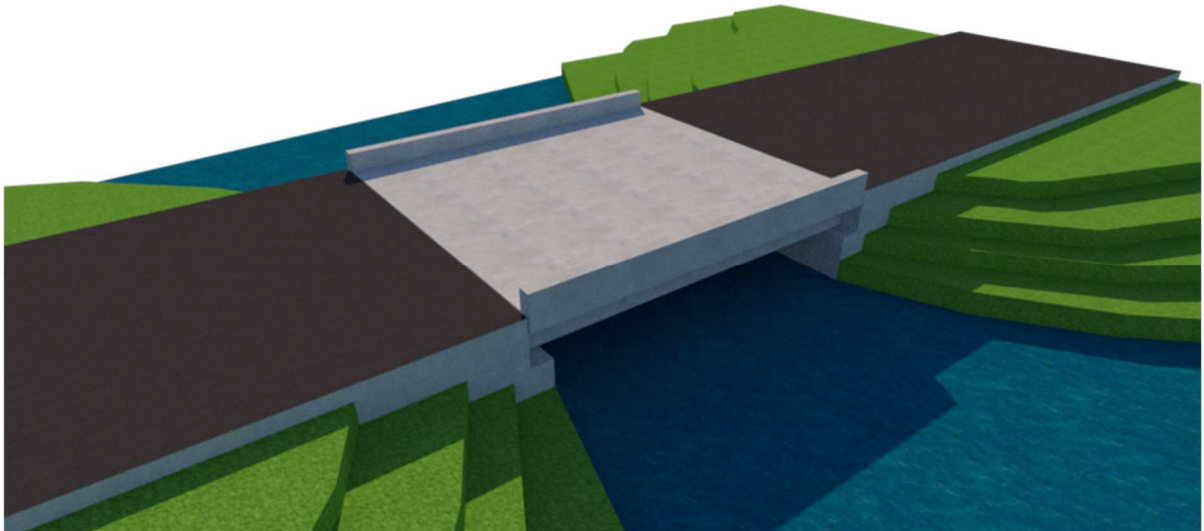
Da det for FRP-armering ikke eksisterer noen europeisk standard er det, for dimensjoneringsformål, etter anbefaling fra fagpersoner i Sweco, tatt utgangspunkt i ACI - American Concrete Institute, *440.1R-15; Guideline for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars* [6].

Statikken bak formlene i *ACI 440.1R-15* er kontrollert, slik det til enhver tid er bevart kontroll over sammenhengen mellom tilhørende faktorer og de som brukes ved dimensjonering av stålarmerte konstruksjoner etter *NS-EN 1992-1-1* [7]. Dette er sentralt, da noen konstanter blir skiftet ut til nasjonale verdier etter konsultasjon med veiledere.

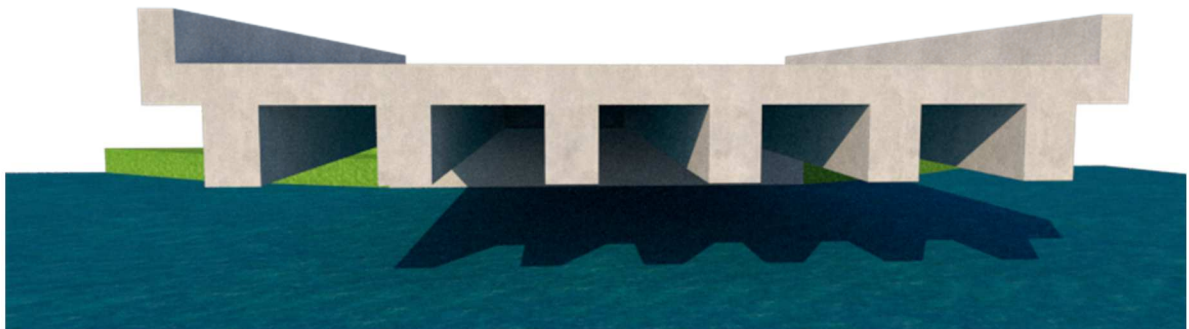
Påfølgende figurer viser den fiktive brumodellen. Mål, inndeling i elementer og ytterligere informasjon er presentert i kapittel 4.1 *Bæresystem og konstruksjonselementer*.



Figur 1.4-1a: Analysemodell, bjelkebru, oversiktsbilde. Denne modellen er utgangspunktet for lastsituasjon og beregninger.



Figur 1.4-1b Analysemodell, bjelkebru, oversiktsbilde.



Figur 1.4-1c: Analysemodell, bjelkebru, tverrsnitt.

Da dette delvis er et forskningsprosjekt som går på optimalisering av tverrsnitt vil det være naturlig å måtte begrense seg til utvalgte analyser. I denne oppgaven har vi primært valgt å se på følgende:

- Momentdimensjonering
- Nedbøyning
- Riss
- Økonomi

1.5 Avgrensninger

For at prosjektet skal være helhetlig og gjennomførbart i løpet av den tiden vi har til rådighet velger vi å se bort ifra utvalgte aspekter i dimensjoneringsprosessen. Dette gjelder følgende:

- Ulykkeslaster
- Laster i byggefasen
- Søylar og opplegg
- Rekkverk og kantbjelker
- Sammenkoblinger (i overgang brubane landkar)
- Belegning
- Termisk utvidelse
- Beregning av skjærkapasitet
- Beregning av svinn
- Seismiske laster
- Vindlaster
- Dimensjonering i utmattingsgrensetilstand
- Ortogonaleksponasjon av trykkutsatt FRP-armering
- Forankring

Det finnes utallige kombinasjoner av FRP. Med FRP menes plastmaterialer/polymerer forsterket med fiber. For å besvare problemstillingen er det satt noen avgrensninger for dybden i materialanalysen. Vi har kun valgt å holde oss til slakkarmring med stenger. Forspente FRP-kabler, fiberarmert betong og sandwichkonstruksjoner er altså ikke en del av denne oppgaven.

2 Metode

2.1 Drøfting av metoder

Målsetningen med bacheloroppgaven er å få økt forståelse for bruken av FRP-armering i betongkonstruksjoner. Dette oppnås ved å kombinere kvalitativ og kvantitativ metode. Beregningene gjøres på bakgrunn av kvantifiserbar data, og resultatene ses i sammenheng med kvalitativ innsikt tilegnet gjennom litteraturstudiet. Valg av metode er gjort basert på muligheter og disponible ressurser. Med begrenset erfaring om FRP i norsk byggebransje, samt mangel på tilgang til fasiliteter som muliggjør testing av bjelker, vanskeliggjøres tilegning av ny empirisk data. Tidsbegrensninger og mangel på kompetanse gjør også at nøyaktige datasimuleringer ikke lar seg gjennomføre.

2.2 Valgt metode

Siden oppgavens tematikk i nokså liten grad er allmenn kunnskap, startes det med å foreta en litteraturstudie for å skaffe overblikk over temaet, og for å tilegne seg nødvendig kunnskap og data som legges til grunn for videre arbeid. Etter samtaler med veileder i Sweco begynte jobben med å kartlegge dagens bruksområder og omfang, både nasjonalt og internasjonalt, samt systematisk innhenting av «harde data» knyttet til de mest vanlige armeringstypene. International Federation for Structural Concretes (*fib*) tekniske rapport *fib bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures* [4] er en samling av forskning på feltet pr. 2007, og belyser mange av mulighetene og utfordringene ved bruk av ikke-metallisk armering. Med bakgrunn i denne, *ACI 440.1R-15* [6] og andre forskningsartikler tilgjengelig på nett, utgjør kapittel 3 *Litteraturstudie - Materialteori* det som legges til grunn for dimensjoneringskapittelet. Dette gir grunnlaget for resultater og diskusjon, som det siden trekkes en konklusjon fra.

Dimensjoneringskapittelet tar hovedsakelig utgangspunkt i håndberegninger og regneark. Ved å ta for seg en fiktiv modell, som er tilpasset for å kunne gjøre mest mulig generelle observasjoner, tilegner man seg innsikt og forståelse om dimensjoneringsprosessen. Dimensjoneringskapittelet fungerer nærmest som en innføring i det å dimensjonere FRP-armerte konstruksjonsdeler i aktuelle grensetilstander. Også prisoptimaliseringsdelen bidrar i stor grad til å få frem helhet og forståelse, ved å gi en visuell innsikt i hvilken grad ulike parametere påvirker kapasiteten opp mot valgte grensetilstander.

2.2.1 Materieell og programvare

Beregningene tar utgangspunkt i American Concrete Insitute sin standard for dimensjonering av FRP-armerte betongkonstruksjoner, *ACI 440.1R-15*. For å gjøre enkle simuleringer benyttes dataprogrammet Robot Structural Analysis [2] som baserer seg på elementmetoden. I forbindelse med prisoptimaliseringsdelen av oppgaven benyttes MATLAB [3] til utregninger og visuell fremstilling.

2.2.2 Prosedyre/Gjennomføring

Etter å ha tilegnet oss informasjonen som legger grunnlaget for beregningene, fokuseres det hovedsakelig på dimensjonering av momentpåkjent bjelke med FRP som konstruktiv armering. En fiktiv

modell som tilrettelegger for gode, aktuelle og overførbare observasjoner gir oss forutsetninger for beregningene. Videre vurderes hvilke faktorer som kan variere i ulike tilfeller, og hvilken påvirkning disse kan ha. Basert på den tilegnede kunnskapen vurderes nøkkelfaktorer ved dimensjonering av FRP-armerte bjelker og dekker, samt eventuelle muligheter for å effektivisere prosessen.

2.3 Refleksjon og kvalitetssikring

2.3.1 Validitet

Opgaven gir en indikasjon på den praktiske anvendbarheten til FRP som armering, ved å ta i betraktning i hvilken grad det lar seg gjennomføre - blant annet ved å sammenligne med stål. Her er det likevel svært mange faktorer som spiller inn, som i stor grad vil avhenge av hvert enkelt prosjekts mer og mindre forutsigbare forutsetninger. Resultatene er i den forstand bare relevante i den grad man ønsker å vurdere ulike typer FRP-armering i forhold til stål på generell basis.

2.3.2 Reliabilitet

Siden oppgaven baserer seg på *ACI 440.1R.15*, kan denne oppgavens pålitelighet sammenlignes med den for ACI-standard. Likevel legger denne oppgaven til grunn en "fornorsking" av den amerikanske standarden, ved at en del faktorer er hentet fra de europeiske standardene og deres nasjonale tillegg, for å gjøre dimensjoneringen mer tilpasset norske forhold. Grunnet mangel på muligheter for å gjennomføre tester, gjenstår det å bekrefte at resultatene knyttet opp til den fiktive modellen faktisk er til å stole på.

I den grad det optimaliseres med hensyn på pris er tilegning av nøyaktige data vanskelig. Kvantum, lokalisasjon og transport, endringer i markedet, brukserfaring og andre prosjektspesifikke faktorer spiller stor rolle for hvilken endelig pris en konstruksjonsdel får. Dette vil altså spille inn på hvor nøyaktig optimaliseringen blir. Verktøyet som presenteres under optimaliseringskapittelet kan tilpasses de prosjektforutsetninger som er kjent for den prosjekterende, men vil ikke være mer enn en tilnærming.

2.3.3 Generaliserbarhet

Ved å ikke bare fokusere på den fiktive modellen har vi grunnlag for å kunne bruke resultatene på en mer generell måte. I optimaliseringsdelen, samt første del av dimensjoneringskapittelet, undersøkes effektene av å bytte stålarmring med forskjellige typer FRP-armering, ved å variere armeringsareal og effektiv tverrsnittshøyde respektivt. Dette gir generaliserbare resultater for momentkapasiteten til tverrsnittene som designes.

For utregningene i bruksgrensetilstand er resultatene knyttet opp mot et valgt spenn og lasttilfelle. Likevel er observasjonene fra modellen interessante for forståelsen av hvordan ulike parametere påvirker dimensjonering i bruksgrense. Å få forståelse for mekanismene til de forskjellige parametere er et vesentlig mål ved oppgaven.

3 Litteraturstudie - Materialteori

3.1 Stål

3.1.1 Generelt

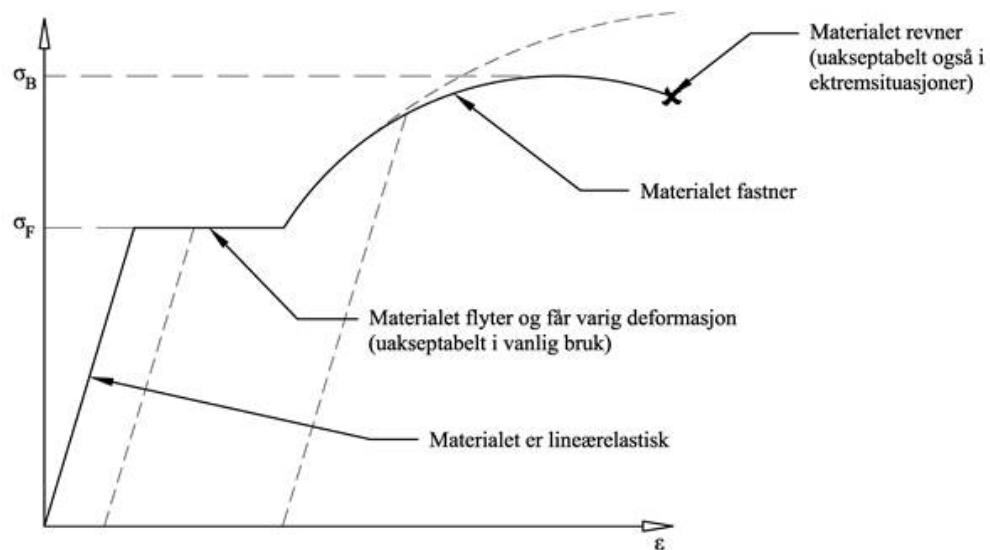
Stål har vært brukt som armeringsmateriale i betongkonstruksjoner helt siden begynnelsen av 1900-tallet [8]. Materialet som er en legering av jern og karbon har - avhengig av sammensetning, varmebehandling og produksjonsmetode - et bredt spekter av konstruktive egenskaper. Ulegerte stålprodukter har et karboninnhold på 0,1 - 20 %, og utgjør rundt 90 % av verdens stålprodukter [9]. Tross tilstedeværelsen av andre bestanddeler som blant annet fosfor, svovel og nitrogen, er det mengden karbon som styrer egenskapene [10]. I tillegg til lav pris i forhold til styrke, har stål som materiale en rekke egenskaper som gjør det svært egnet til bruk som armering i betongkonstruksjoner.

3.1.2 Materialoppførsel

Stål utsatt for strekkspenninger har små elastiske tøyninger, som gir små oppsprekninger i betongtverrsnittets strekksone, og som sammen med betongen samspiller for god utnyttelse av tverrsnittets trykkpotensial [10]. At stål er et isotropt materiale [11], gjør at armeringens konstruktive egenskaper like godt kan benyttes for å ta trykk.

Stål har tilnærmet samme termiske utvidelseskoeffisient som betong. Dette er gunstig for å unngå tvangskrefter og utrivning av armering i konstruksjoner utsatt for temperatursvingninger [10].

En annen faktor som gjør at stål egner seg til armeringsformål, er materialets duktile natur. Stål er et seigt materiale som under økning av strekkspenninger har en lineær elastisk fase, som går over til en seig plastisk fase. Spenningsnivået ved overgangen fra elastisk til plastisk fase kalles flytespenning [10].



Figur 3.1-1: Arbeidsdiagram for stål. Viser sammenhengen mellom spenninger langs vertikal akse og tøyninger langs horisontal akse, for stål i ulike faser. Kilde: Meccanica.no.

Duktilitet - som i norske standarder for armeringsstål deles inn i tre klasser - bestemmes av to faktorer; forholdet mellom strekkfasthet og flytegrense, og bruddtøyning.

Tabell 3.1-1: Duktilitetsklasser, karakteristiske verdier [10].

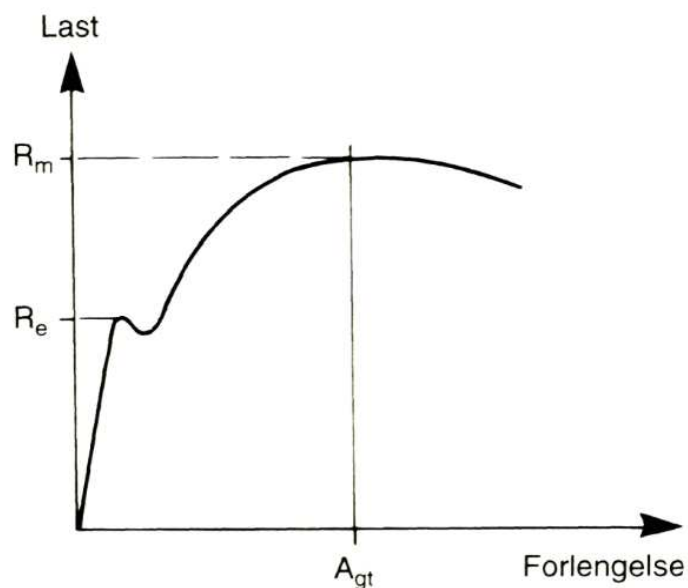
Duktilitetsklasse	A_{gt}	R_m/R_e
E	6,0 %	1,15
A	5,0 %	1,08
B	2,5 %	1,05

A_{gt} : Grensetøyning

R_m : Strekkfasthet

R_e : Flytegrense

Egenskapene som beskriver stålets seighet dras også fordel av i byggeperioden. Selv om byggebransjens omgående overgang til BIM og tredimensjonale armeringstegninger stadig minker behovet for ettertilpasning av armering på byggeplass, kan armeringens muligheter for bøyning og tilpasning etter herding fortsatt være av relevans. I tillegg kommer fordelene som bæres med av stålets mulighet for sammenføring ved sveis.

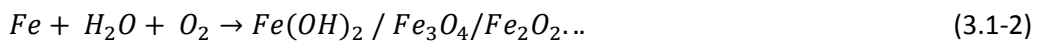


Figur 3.1-2: Definisjon av duktilitet. Stor forskjell på R_m og R_e karakteriseres som høy duktilitet. Kilde: Armeringsboka.

3.1.3 Ytre miljø

Korrosjon

På grunn av ståls termodynamisk ustabile natur vil omgivelsene sørge for å omforme materialet til sin opprinnelige stabile form som oksider, i form av korrosjonsprodukt. Vann og oksygen har roller som kjemisk drivkraft i korrosjonsprosessen [12].



Heldigvis vil stål innstøpt i betong i utgangspunktet ikke korrodere til tross for eventuell tilgang på fuktighet og oksygen. Et tynt beskyttende oksidlag dannes på stålets overflate i betongens svært basiske miljø (pH 11-13). Dette laget – gjerne omtalt som passivfilmen – fungerer som en beskyttende barriere [13].

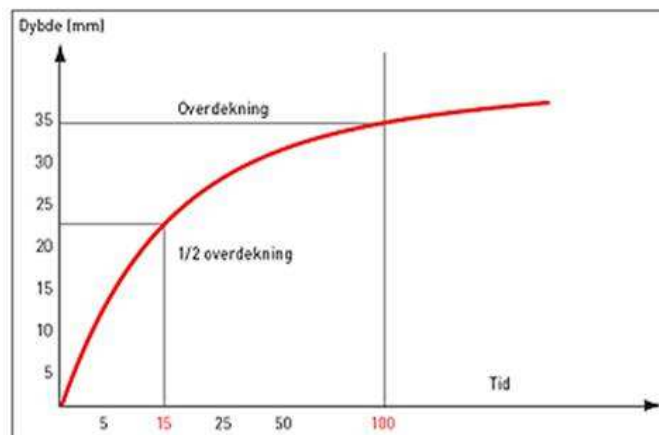
Karbonatisering

Karbonatisering er en reaksjon mellom kalsiumhydroksid (kalkoverskudd) i betongen og karbondioksid i konstruksjonens omsluttende luft, som danner kalsiumkarbonat [13].

Karbonatiseringen fører til redusert alkalinitet (pH). Synker pH-verdien ved oksidsjiktet under om lag 9, vil det beskyttende laget ødelegges og armeringen vil kunne korrodere. Ved korrosjon ekspanderer armeringen kraftig og fører til utsprengning av overdekningen [14].

Fenomenet oppstår på konstruksjonens overflate og jobber seg som en vegg innover i konstruksjonen over tid. Prosjekteringsstandarden *NS-EN 1992-1-1* [7] inneholder regler som omfatter kvalitet på betong og overdekningstykkelse. Disse skal sørge for å hindre at karbonatiseringsfronten når ytre armeringslag i løpet av tidsperioden konstruksjonen er dimensjonert for [13].

Karbonatisering kan også oppstå som et resultat av dårlige komponenter i betongens sammensetning, som for eksempel bruk av sjøsand eller sjøvann [15]. Funksjonen av tid og dybden som karbonatiseringen har nådd, viser hvordan man ved å øke overdekningen, kan forlenge konstruksjonens levetid betydelig.



Figur 3.1-3: Viser hvor mye konstruksjonens levetid forlenges ved økning av overdekning. Kilde: byggutengrenser.no.

Luftfuktighet

Luftens relative fuktighet er en faktor som spiller inn på korrosjonsfaren. Faren for rustdannelse er nærmest eliminert ved relativ fuktighet (RF) under 65 %, mens den fra 70 % og oppover øker kraftig med økende RF [16].

Klorider

Klorider har negativ innvirkning på armeringens passive sjikt - som skapes av omsluttende betong - ved at de gjør sjiktet ustabil, uavhengig av PH-verdi [17]. Derfor vil tilgang på klorider i konstruksjonens nærmiljø påvirke risiko for korrosjon. Kystnære strøk, samt veier og infrastruktur der det saltes på vinterstid er eksempel på risikomiljøer. Da klorider kan opptre svært lokalt og utvikler seg hurtigere enn karbonatisering, kan armeringskorrosjon som skyldes klorider ofte være vanskelig å oppdage. Fenomenet omtales som «pitting» og kan i motsetning til ved karbonatisering - som ofte får sprengninger og åpne sår - allerede ha redusert armeringens tverrsnitt kritisk uten å gi åpenbare synlige indikasjoner. Igjen er tilstrekkelig overdekning og tett betong, samt korrekt prosjektering for å begrense rissvidder, avgjørende [13].

Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art

Gjennom SINTEFs forskning på betong - Consortium Concrete Innovation Centre (COIN) - presenteres "Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art" av Gro Markeset og Roar Myrkdal [12]. Rapporten er et verktøy for modellering og forutsigelser av stålarmerede betongkonstruksjoners tilstand i sin levetid.

Gjennom analytiske modeller utledet fra elektrokjemiske og mekaniske prinsipper modifisert for å tilpasse empiriske testresultater presenteres formler og modeller for utregning av konstruksjoners tilstand i løpet av levetiden.

Blant annet presenteres modeller for utregning av armeringsdiameterens reduksjon som følge av korrosjon. Det er en etablert sannhet at korrosjonsraten kan variere over tid. En modell som derimot tar utgangspunkt i en gjennomsnittlig korrosjonsrate ($V_{corr,a}$), eventuelt justert ved en "pitting"-faktor (α), kan brukes som en forenklet metode for å beregne stålarmeringens effektive tverrsnittsareal ved et gitt tidspunkt etter initiert korrosjon.

Videre kan redusert effektiv tverrsnittdiameter (ϕ') ved tiden (t) beregnes:

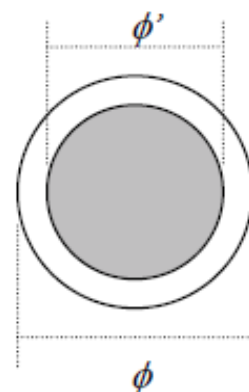
$$\phi' = \phi - 2 \cdot V_{corr} \cdot t \quad (3.1-3)$$

ϕ' : Redusert diameter

V_{corr} : Korrosjonsrate

ϕ : Diameter før initiert korrosjon

t : Antall år etter initiert korrosjon



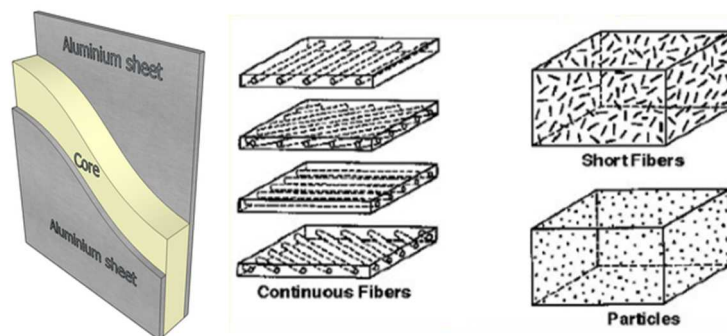
Figur 3.1-4: Viser opprinnelig diameter og redusert diameter som følge av korrosjon. Kilde: COIN

3.2 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

3.2.1 Generelt

Et komposittmateriale er et materiale som består av en eller flere diskontinuerlige «biter» i form av for eksempel fiber og armering, som er plassert i en kontinuerlig masse kalt matriks. Komposittmaterialet får bedre egenskaper enn hva grunnmaterialene har hver for seg [18]. Det finnes ulike former av kompositter, avhengig av forhold og samspill mellom armering og matriks.

I partikkelkompositter består armeringen av små, harde partikler som er fordelt i matriksen, mens i fiberkompositter er den myke matriksen armert med sterke, harde og sprø fibre. Her tar fiberen opp mesteparten av kreftene og øker blant annet materialets styrke, utmattingsfasthet, E-modul og styrke-/vektforhold. I både fiber- og partikkelkompositter er armeringen godt fordelt i matriksen. I de andre formene for kompositter er armeringen og matriksen separert. Disse kalles sandwichpaneler og laminære kompositter. Sandwichpaneler består av tynne, stive og sterke skall med tykk mellomliggende kjerne som separerer skallene. Disse består ofte av tynne overflatesjikt som blir holdt sammen, og skilt fra hverandre med tre, skum eller andre materialer. Laminære kompositter har myke lag med harde mellomlag. Et eksempel er limtredragere [19]. I FRP-bruer er det fiberkompositter eller sandwichpaneler som er mest sentrale. I denne rapporten vil fiberkompositt bli vektlagt da vi ønsker å se på bruken av FRP i form av armeringsstenger i betong.



Figur 3.2-1: Viser forskjellige kompositttyper. Sandwichpanel, laminære kompositter samt fiber- og partikkelkompositter. Kilde: Høgskolen i Narvik.

3.2.2 Hvorfor bruke FRP?

Høy bestandighet

Det er estimert at det trengs mellom 11 og 19 milliarder kroner for å oppgradere de omlag 17 300 bruene i riks- og fylkesveinettet i Norge [20]. Det er også forventet at verdensomfattende reparasjons- og vedlikeholdskostnader overskrider 100 milliarder euro [4]. I USA er 69 000 broer - over 11 % av det totale antallet - klassifisert som konstruktivt mangelfulle [21].

Det alkaliske miljøet i betongen gir normalt tilstrekkelig beskyttelse av stålarmering. Over tid vil det alkaliske miljøet avta grunnet karbonatisering og den beskyttende hinnen - pasifiseringen rundt armeringen - bli brutt. Stålet vil deretter kunne korrodere, og dermed føre til sprenging av overdekningen, som videre fører til økt korrosjonshastighet. Overdekningens oppgave er å beskytte

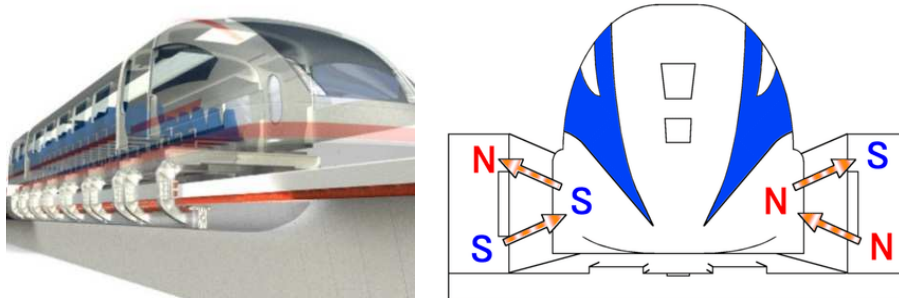
stålet mot ytre miljø og kravene til overdekningstykkelse kan ofte bli strenge for konstruksjoner i aggressive miljø. For å bedre konstruksjonens korrosjonsmotstand er mulige alternative løsninger å bruke rustfri armering, katodisk beskyttelse, overflatebehandling og økt overdekningstykkelse. Disse løsningene kan være kostbare, eller har vist seg å ikke være tilfredsstillende [4].

FRP-armering kan brukes for å fjerne korrosjonsproblematikken i utsatte konstruksjoner. Ved bruk av FRP kan overdekningen reduseres og bestandigheten til konstruksjonen økes grunnet armeringens robuste natur. Stålarmeringens korrosjonsmotstand har størst innvirkning på konstruksjonens bestandighet og dermed levetiden. Ved å bruke armering som ikke ruster vil levetiden til konstruksjonen kunne øke drastisk i forhold til stålarmede konstruksjoner med samme overdekningstykkelse. Bruk av FRP-armering kan ha potensiale for konstruksjoner i marine miljøer, i og nært bakkenivå, samt for brudekker, slanke konstruksjoner og i kjemiske og andre industrielle anlegg [4].

Elektromagnetisk nøytralitet og lav ledningsevne

Stålarmering kan interferere med magnetiske felter. Det er derfor vanlig å unngå stålarmering der magnetisk nøytralitet er nødvendig. Sentrale områder for bruk av FRP er blant annet i fundamenter til store motorer, magnetisk skanneutstyr og for magnetisk levitasjonsjernbane. Den lave termiske ledningsevnen gjør at temperaturen sprer seg saktere gjennom materialet ved brann [4].

Elektromagnetisk interferens er en utfordring for teleindustrien og forsvaret. FRPs elektromagnetiske nøytralitet gjør det til en ideell armeringstype i sykehusrom hvor MR-maskiner brukes [4].

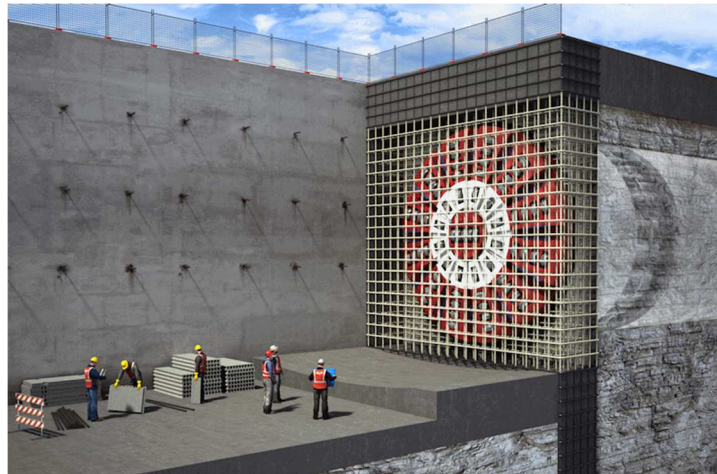


Figur 3.2-2: MAGLEV-tog svever over skinnene ved hjelp av et sterkt magnetisk felt. Teknologien er avhengig av elektromagnetisk nøytralitet. Kilde: cgtrader.com og allaboutmagnets.wikispace.com.

Høy spesifikk styrke og kuttbarhet

FRP-armering har høy styrke i forhold til egenvekt. Ved å bruke FRP som spennarmering vil den høye styrken bli utnyttet og den noe lave E-modulen vil gi lavere tap i spennkraft over tid [4]. Materialenes langtidsvirkninger må likevel tas hensyn til for å vurdere deres anvendbarhet i konstruksjoner. Egentyngden varierer fra en fjerdedel til en sjettedel av armeringsstål, og bedrer sådan håndtering på byggeplass og ved transport. Dette kan være fordelaktig i konstruksjoner med begrenset tilgang og kompleks utførelse [4].

FRP-armering, spesielt armering av glassfiber (GFRP), har lav skjærstyrke som gjør det ideelt til bruk i midlertidige konstruksjoner. Det er mye brukt i sjaktvegger i tunneldrift, hvor veggene må gjennomtrenges av tunnelborremaskiner, TBM. Feltet av veggen som TBM-maskinen skal borre seg igjennom blir armert med GFRP som enkelt borres igjennom på grunn av materialets lave skjærkapasitet. Metoden kalles «soft-eye» [4].



Figur 3.2-3: Soft-eye, midlertidig sjaktvegg armert med GFRP for bruk i tunneldrift. Kilde: atp-frp.com.

3.2.3 Materialelegenskaper

3.2.3.1 Fiber

Glass

Glassfiber er det vanligste fiber materialet brukt som fiberforsterking. Dette skyldes glassfibers lave pris, gode produksjonsegenskaper og relativt gode mekaniske egenskaper. Glassfiber er generelt svært anvendbart og brukes både til komposittarmening, diverse profiler, samt produkter for styrking av elementer - typisk sandwichprofiler. Det finnes ulike typer glassfiber som kan designes for ønskede egenskaper og til ulike miljøforhold. Fibrene lages ved at smeltet glass presses gjennom fine munnstykker [22].

Glassfiber har høy styrke, er motstandsdyktig i korrosivt miljø og er lett å overflatebehandle. Blant de ulike typene fiber er A-glass og C-glass motstandsdyktige mot kjemikalier, da disse inneholder basiske stoffer som natriumklorid. C-glass er mer motstandsdyktig mot kjemikalier enn A-glass. E-glass er det mest brukte og rimeligste glassfiber materialet, med sine relativt gode styrke- og elastisitetsegenskaper. E-glass har også liten elektrisk ledningsevne. S-glass har høyere verdier for styrke og E-modul enn E-glass - dessuten er S-glass bestandig ved høye temperaturer. D-glass har bedre elektriske egenskaper enn E-glass. Glassfiber er resistent mot opptak av fukt, og er dermed ikke utsatt for svelling.

Tabell 3.2-1: Ulike glassfibertyper.

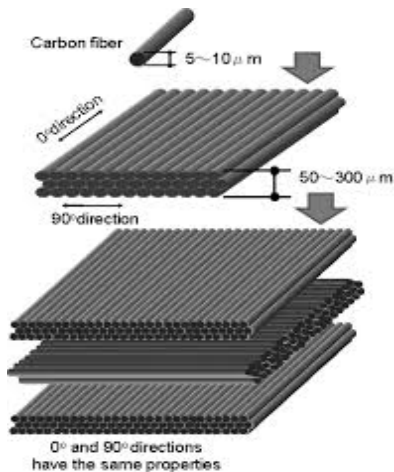
Glasstype	Beskrivelse
A-glass	Høyt innhold av alkali-lime.
E-glass	Alumino-borosilicate med mindre enn 1% alumino-b alkali oksider, hovedsakelig brukt i glassfiberarmert plastikk.
C-glass	Alkali-lime glass med høyt boronoksid innhold, brukt i "glass staple fibers" og til isolasjon.
D-glass	Borosilikat-glass, navngitt for sin lave dielektriske konstant.
R-glass	Aluminosilikat-glass uten MgO and CaO. Brukes i stor grad som armering.
S-glass	Aluminosilikat-glass uten CaO, men med høyt MgO innhold og høy strekkfasthet.

Den lave termiske ledningsevnen til glassfibrene er fordelaktig ved brann, ved at varmeutviklingen blir mer begrenset til brannsonen. Glassfiber smelter ved 850-900°C, men de mekaniske egenskapene reduseres gradvis. Strekkstyrken av glassfibere reduseres ved økende temperatur, men kan anses konstant for temperaturområdet som matriksen utsettes for. Strekkstyrken blir også redusert av påvirkning fra kjemisk miljø, og over tid når utsatt for langtidslast. Glassfiber med densitet på ca. 2,55 g/cm³ har utmerkede fasthetsegenskaper. Elastisitetsmodulen er om lag 70 000 MPa og bruddforlengelsen er på ca. 35 %. Fibrene strekker seg elastisk etter Hooks lov, helt til brudd. Strekkstyrken er 1000-4000 MPa, og det er i hovedsak denne som dras nytte av ved armering av plast, etter prinsipp analogt med armert betong. For spesifikke verdier for E-glass og R-glass, se tabell 3.2-2 [23].

Karbon

Karbonfiber består av tynne fibre med diameter 0,005-0,01 mm. Disse består hovedsakelig av karbonatomer forbundet i et krystallmønster. Dette gir høy styrke i forhold til størrelsen. Fibrene tvinnes typisk sammen til en tråd som benyttes alene, eller veves til et stoff [24].

Karbonfiber har gode mekaniske egenskaper som gjør de egent for ulike bruksområder i konstruksjoner. Typisk brukes karbonfiber som forsterkningsstriper, spennkabler og duker for forsterkning av eksisterende konstruksjoner. Fiberkompositter av karbon gir materialer med spesielt høy styrke og stivhet. Vanlige anvendelsesområder er fly, sportsbiler, motorsykler og vindmøller. Karbonfiber har blant annet vært et av de mest brukte materialene i Formel 1 siden materialets introduksjon på 1980-tallet [24].



Figur 3.2-4: Karbon i form av fibre og matter. Mattenes høye styrke i både lengde- og tverretning oppnås ved å flette fibre. Kilde: Wikipedia.

Anisotropiske egenskaper resulterer i ulike egenskaper på lang og tvers av fibre [25]. Dette gjør at karbonfibre har flere ganger høyere styrke i lengderetning enn i tverretning. Karbonfiber har høy spesifikk styrke, høy strekkfasthet, god korrosjonsbestandighet og kjemisk motstand, stor toleranse for høy temperatur og lav termisk utvidelseskoeffisient. Disse egenskapene gjør at de presterer godt i varmt og fuktig miljø, i tillegg til å ha god geometrisk stabilitet. Karbonfiber er i mye større grad elektrisk ledende enn glassfiber, og dersom fibre kommer i kontakt med metaller kan konduktiviteten lede til nedbryting av matriksen og korrosjon av metallet. Denne reaksjonen skyldes en galvanisk celle, som kan oppstå fra elektropotensiell ubalanse mellom fiber og metall. Sammenkoblinger og overganger mellom fiber og metall må derfor spesielt designes med hensyn på elektrisk konduktivitet. Karbonfiber presterer godt med hensyn på utmatting, men har relativt lav skjærkapasitet, og sammenlignet med øvrige fibre i denne oppgaven også høyere termisk ledningsevne [4].

Karbonfiber produseres med ulike egenskaper og kategoriseres etter høystyrke, middels-modulus, høy-modulus og ultra høy-modulus. Typisk for disse fibre er at høyere E-modul i lengderetning ofte resulterer i fibre med lavere strekkstyrke – derav også lavere bruddtøyning. Karbonfibernes tøyninger er lineære og gir ingen forvarsel på brudd [26].

Aramid

Aramidfiber ble først introdusert i 1965 av DuPont med merkevarenavnet Kevlar. Andre produkter er Technora og Twaron [27]. Fibrenes egenskaper ligger mellom stivhetsverdiene for glassfiber og de høye verdiene for karbonfiber, med hensyn til den lave vekten, den høye strekkstyrken og den middels høye E-modulen. Aramidfibrene er egnet for formål som krever høy seighet eller motstand mot kraftige fysiske påkjenninger, samt tilfeller hvor et høyt spesifikt styrke/vekt-forhold er nødvendig. Aramid brukes også ofte sammen med andre fibre for å utnytte materialets seighet [28].

Aramidfiber har densitet på rundt 1400 kg/m^3 , som gir fibre en lavere spesifikk styrke enn glass- og karbonfiber. Fibrene har gode utmattingsegenskaper i strekk, lave krypeffekter, og tåler relativt høye temperaturer. Styrken og stivheten av fibre reduseres lineært med økende temperatur, men typisk har aramidfiber 80 % av styrken ved 180°C . Aramidfiber er normalt ikke anvendbart over lang tid med temperaturer over 150°C og dekomponeres i luft ved ca. 425°C . Fibrene kan ved lav tetthet absorbere

vann og det er ved høyt fuktinnhold fare for å få langsgående, intern splitting. Fibrene er også sensitive for UV-lys. En viktig begrensning for aramidfiber er den lave trykkapasiteten, som for Kevlar er mindre enn 20 % av strekkstryken. Aramidfibrene er lineært elastiske til brudd i strekkretning, men har en annen bruddmekanisme i trykk som gir produktet en ikke-lineær og plastisk oppførsel. For Kevlar gir de plastiske egenskapene i trykk materialet god absorpsjonsevne ved kollisjon. Se tabell 3.2-2 for karakteristiske egenskaper for aramidfiber [29].

Basalt

Fibre av den vulkanske bergarten basalt er noe forskere i Sovjetunionen begynte å interessere seg for på 1960-tallet for bruk i militær sammenheng. Etter Sovjets fall i 1991 ble forskningen offentliggjort, og basalt har siden vært et materiale i mindre utstrakt bruk innen bil- og romfart [30]. Til tross for egenskaper som lett vekt, høy styrke og gode varmeegenskaper har bruken blitt begrenset av at de svært korte fibrene med diameter på under 5 μm kunne virke kreftfremkallende. Dagens metoder for fremstilling tillater derimot produksjon av endeløse fibre med diametere på 9-13 μm , uten kreftfremkallende effekter [31].

Basalt har krystallstruktur som varierer med de geografiske forholdene ved lavautflytningen. Tre forskjellige silikater utgjør basaltsteinen, hvor silikatene består av ulike grunnstoffer. Variasjon i mengdeforholdet av de ulike silikatene kan sådan påvirke kjemisk sammensetning og anvendbarhet i stor grad. Geografiske forhold og utbruddsmassenes størkningsforløp spiller stor rolle for råmaterialets potensiale. Derfor må råstoffet ofte importeres, til tross for at basalt utgjør om lag 13% av klodens overflate, inkludert havbunnen [32].

På verdensbasis er det bare noen titalls steinbrudd som har basaltmasser analyserte og godkjente for produksjon av fiber.



Figur 3.2-5: Basaltfiber uten matris. Kilde: basalt.today.

Tabell 3.2-2: Karakteristiske egenskaper for ulike fibertyper.

	Glassfiber		Karbonfiber			Aramidfiber				Basalt-fiber
<i>Materiale</i>	E-glass	R-glass	Høy-styrke	Middels - modulus	Høy - modulus	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Tech nora	Albarr ie
<i>Egenskaper</i>										
Densitet (Kg/m³)	2750	2520	1790	1750	1880	1440	1440	1440	1390	2800
Langsgående E-modul (GPa)	73,1	86	238	350	410	62	124	175	70	89
Strekstyrke (MPa)	2750	3450	3600	4500	4700	2760	3620	3450	3000	4840
Tøyningsgrense (%)	38	40	15	13	6	44	22	14	44	31
Trykkstyrke (MPa)	1750	2000	2140	2100	1850	NA	NA	NA	NA	NA
Skjær-modul (MPa)	30000	34600	50000	35000	27000	NA	NA	NA	NA	NA
Skjærstyrke (MPa)	1700	1950	1200	1100	1000	NA	NA	NA	NA	NA
Termisk utvidelseskoefisient (10⁻⁶K⁻¹)	5-0	3	-0,4	-0,6	-0,5	-2,0	-2,0	-2,0	-6,0	8

NA – Ikke tilgjengelig

3.2.3.2 Matriks

Matriksen er en av hovedkomponentene i FRP-kompositter. Den består hovedsakelig av resin, fillers og tilsetningsstoffer. De mest vanlige typene polymerresiner er polyester, epoxy og vinylester. Den polymere matriksen er nødvendig for å binde sammen fibrene, å beskytte overflaten mot skade under håndtering og produksjon, samt å sikre god levetid for kompositten. I tillegg skal matriksen spre fibrene og skille dem for å overføre spenninger utenfra og til fibrene. Matriksen skal være kjemisk og termisk kompatibel med fibrene og spiller en viktig rolle i kontrollen av komposittens spenning- og belastningsadferd, samt dens motstand i korrosive miljøer. Typen polymermatriks påvirker også bruddfastheten til det resulterende komposittproduktet [4]. Videre presenteres de vanligste matriksene og deres egenskaper.

Polyester

Polyester er mye brukt i produksjon av komposittmaterialer i konstruksjonssammenheng. Generelt er polyester ofte benyttet til produksjon av profiler laget med produksjonsmetoden pultrusjon, som også er en sentral produksjonsmetode for komposittarmering (se 3.2.4 *Fiberframstilling*). Polyester er

spesielt kjent for å være meget allsidig, både for valgfrihet til resininnhold som kan spesifiseres for de ønskede egenskapene, i tillegg til mulighet for ulike produksjonsmetoder utover pultrusjon. Alternative produksjonsmetoder kan være «wethand layup» og «filament winding» [33]. Polyesterresinen er lett håndterlig, har god geometrisk stabilitet, god korrosjonsmotstand, relativt lav pris og har gunstige brannhemmende egenskaper [4].

Epoxy

Epoxy kan benyttes som matriksmateriale til komposittlementer, men også som lim i forbindelser. Bruksområdet for epoxy er stort og det brukes i et bredt spekter av komposittlementer. I konstruksjonssammenheng blir epoxy brukt som resin i blant annet karbonfiberstriper for styrking av konstruksjonselementer, forspenningskabler og skråkabler for bruer. Epoxyresinen har de beste egenskapene blant polymerresinene, ettersom den har best korrosjonsbestandighet, begrenset svinn, god temperaturstabilitet og god elektrisk isoleringsevne. Det er verdt å merke seg at disse egenskapene kommer på bekostning av pris, da epoxy er dyrere enn både polyester og vinylester [4].

Vinylester

Vinylester er basert på metakrylat og akrylat som er salter og estere av henholdsvis metakryl- og akrylatsyre. Sammenlignet med polyester har denne resinen en kjemisk oppbygning med færre krysskoblinger, samt større fleksibilitet og bruddseighet. Vinylester har mange av de gode egenskapene til epoxy, kombinert med mange av de fordelaktige produksjonsegenskapene til polyester. Egenskapene er gode, samtidig som prisen er lavere enn for epoxy. Vinylester har god motstand mot syrer, baser, løsningsmidler, fukt og har lav temperaturlledningsevne. Vinylester er spesielt egnet til glassfiber-kompositter, da resinen sikrer god utfylling og heft mot fibrene. Resinens egenskaper muliggjør bruk av de vanligste produksjonsmetodene for FRP-produkter [4].

Tabell 3.2-3: Karakteristiske egenskaper for ulike matrikser [4].

Egenskaper	Matriks		
	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Densitet (Kg/m ³)	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Strekstyrke (MPa)	34,5-104	55-130	73-81
Langsgående E-modul (GPa)	2,1-3,45	2,75-4,10	3,0-3,5
Termisk utvidelseskoeffisient (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	55-100	45-65	50-75
Fuktinnhold	0,15-0,60	0,08-0,15	0,14-0,30

Fillers

Fillers blir ofte tilført polymer-resin som et prisreduserende tiltak. Fillers er billigere enn resinene, og totalprisen blir dermed lavere. Vanlige fillers er kalsium-karbonat, kaolinitt og aluminiumoksid og disse kan forbedre egenskaper som svinn, herdetemperatur og hardhet. Enkelte fillers kan også bedre brannegenskaper, krypegenskaper og motstand mot utmattelse. For høyt innhold kan likevel redusere egenskaper som styrke, stivhet, viskositet og bestandighet [4].

Tilsetningsstoffer

I tillegg til fillers brukes også tilsetningsstoffer i matrisen, for å manipulere dens egenskaper. Andelen tilsetningsstoffer er mye mindre enn fillers, normalt 1 % eller mindre av resinens vekt, men har stor innvirkning på egenskapene til komposittmaterialet. I hovedsak tas tilsetningsstoffer i bruk for å bedre ulike egenskaper [4].

- **Promoterer, katalysatorer og hemmere** – akselerer herdeprosessen.
- **Pigmenter, fargestoffer** – farging av produktet.
- **Antioksidanter** – hjelper til å kontrollere oksideringsprosessen.
- **Lavt svinn tilsetningsstoffer** – gir jevnere overflate.
- **UV-stabilisatorer** – motvirker fargeforandring og oppsprekking på grunn av UV-stråler.
- **Brannhemmere** – reduksjon av røykutvikling og brennbarhet.

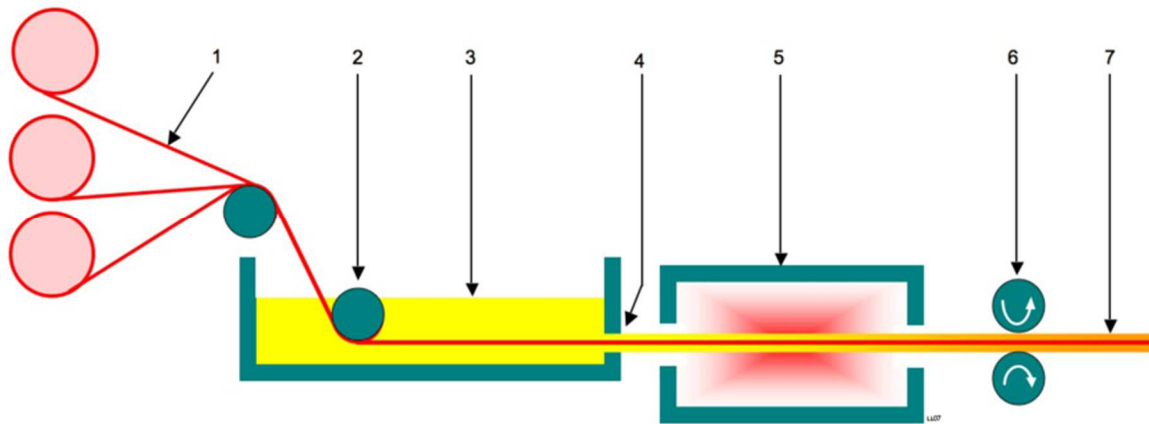
3.2.4 Fiberframstilling

Glass

Glassfiber framstilles ved at smeltet glass blir dratt gjennom fine munnstykker. Fiber trekkes fra spoler og ledes ned til plastfukting. Plastoverskudd presses ut og fiber samles til en bunt. Etter formgivning påføres sand før herding. Kontinuerlig glassfiber framstilles hovedsakelig av «E»-glass, glass med et Na₂O-innhold under 1 %, mens en mindre del framstilles av vanlige bruksglassblandinger med et Na₂O-innhold på 10–15 %, også kalt «A»-glass. Ved hjelp av en hurtigroterende viklemaskin presses flytende glass gjennom en finhullet platinadyse til kontinuerlige fibre. Disse fibrene er vanligvis 5–13 µm avhengig av temperaturen på det flytende glasset, dysehullenes diameter og hastigheten på viklemaskinen. Ved en annen metode bringes flytende glass ut gjennom dysehull ved hjelp av en kraftig luft- eller dampstrøm. Produktet kalles glass stapelfiber og har diameter på 3–7 µm [34].

De kontinuerlige fibrene som blir produsert i viklemaskinen samles på tromler og blir så matet inn i en pultrusjonsprosess. Dette er den vanligste av flere produksjonsprosesser og det er her fibre blir impregnert med matris. Pultrusion er en kontinuerlig og materialintensiv prosess for framstilling av diverse komposittp profiler. Prosessen gir den primære styrken i lengderetning og utføres ved å trekke kontinuerlige filamenter, sammen med hakkede strengmatteband gjennom et matrisbad, før det føres gjennom en oppvarmet dyse med ønsket utforming. Denne dysen er utformet som et langt kammer og fungerer som form og herdingsovn samtidig. Høyere dysetemperatur tillater høyere trekkhastighet. I stedet for å bruke et matrisbad er det også mulig å injisere matrisen direkte i dysekammeret. Etter hvert som profilet trekkes ut kuttet det til ønsket lengde, i en kontinuerlig prosess. Produktenes lengde begrenses kun av produksjonslinjen, men armeringsstenger produseres normalt i konvensjonelle lengder på seks og tolv meter.

Pultruderte produkter har god kvalitet og lav pris, men har dårligere tverrstyrke sammenlignet med *wet hand layup* og *filliament winding*-produserte produkter. Den lave skjærfastheten skyldes at pultrusjonsprosessen bare drar fibre i én retning [33].



Figur 3.2-6: Pultrusjonsprosess: 1 – Kontinuerlige fibre på rull, 2 - Strekkrolle, 3 - Resinbad, 4 - Imprignert fiber, 5 – Form- og herdekammer, 6 - Trekkmekanisme, 7 - Ferdig produkt.

Kilde: Wikipedia.

Karbon

Karbonfiber lages ved oksidasjon og forkulling av polyakrylnitrilfiber, PAN, kalt forløper. Polyakrylonitril er en organisk polymer som er satt sammen av lange strenger av molekyler, bundet sammen av karbonatomer. Den eksakte sammensetningen varierer fra produsent til produsent og forblir en forretningshemmelighet [35].

Proessen for å fremstille karbonfiber er både kjemisk og mekanisk. Forløperen strekkes ut til lange fibre som varmes til høy temperatur. Prosessen skjer uten tilgang på oksygen, slik at fibre hindres fra å brenne, men heller får atomene til å vibrere så hurtig at flesteparten av fremmedatomene fjernes, hovedsakelig hydrogen og nitrogen. Denne prosessen kalles forkulling og etterlater en lang, tett og sammenlåst kjede av karbonatomer, med noe innslag av andre atomer. Videre må fibre stabiliseres. Dette gjøres gjennom en kjemisk prosess der fibre konverteres fra deres lineære atombindingsmønster til et mer termisk stabilt stigemønster. Dette oppnås ved å varme fibre til 200-300°C i 30-120 minutter. Fibre tar da til seg oksygenmolekyler og omstrukturerer deres bindingsmønster. Når fibre er stabiliserte varmes de så opp til 1000-3000°C for å gjennomgå enda en forkullingsprosess. Deretter oksideres overflaten slik at resin lettere kan feste seg til fibre, og det påføres et beskyttende lag før fibre spinnes på tromler [35].

Karbonfibre leveres normalt i lange, kontinuerlige tau, spunnet opp med 1000 til 160 000 parallelle fibre. Fibre har en karakteristisk svart farge og har normalt en diameter på 5–10 µm. En viktig begrensing for bruken av karbonfiber er kostnaden, hvor prisen for karbonfiber er fra 10 til 30 ganger høyere enn for glassfiber. Dette grunnet høy materialepris og lang fremstillingsprosess [35].

Aramid

Aramidfiber fremstilles ved å presse en kald løsning av aromatisk polymer gjennom en varm sylinder. Fibrene blir på denne måten orientert i langsgående retning og forlenges, noe som resulterer i økt styrke og stivhet. Produksjon av aramidfiber er avhengig av løsemidler med den ioniske komponenten kalsiumklorid (CaCl_2) for å oppta hydrogenbindingene i amidgruppene. I tillegg er prosessen avhengig av en organisk komponent - N-metylpyrrolidon (NMP) - for å oppløse den aromatiske polymeren. Denne prosessen ble oppfunnet av Leo Vollbracht, som jobbet i det nederlandske kjemifirmaet Akzo. Bruken av NMP/ CaCl_2 -systemet er per i dag konvensjonelle fremgangsmåten for fremstilling av aramid, og resultatet førte til et utvidet patent mellom Akzo og DuPont [34].

Basalt

Produksjonen av basaltfiber ligner på mange måter framgangsmåten for glassfiberproduksjon. Basalt - som er en vulkansk bergart - knuses, vaskes og smeltes ved hjelp av gassfyrte ovner på 1450°C , før det presses gjennom dyser og danner kontinuerlige fibre med diameter på 9-13 μm [36] [37].

Grunnet basaltfiberens enkle oppbygning er denne prosessen mindre omfattende enn ved produksjon av glassfiber. Glass består ofte av 50 % silicasand, samt oksider fra flere andre mineraler, blant andre bor og aluminium. Disse forskjellige stoffene må separeres før de hver for seg smeltes. Basalt har på sin side ingen andre sekundærmaterialer. Derimot har man ved basaltproduksjon mindre kontroll over konsistensen, og hvor rent råmaterialet er [30].



Figur 3.2-7: Viser trinnene i produksjonsprosessen av basaltarmering. Kilde: ReforceTech.

Norske ReforceTech på Røyken produserer armeringsprodukter med basaltfiber, og importerer sitt råstoff fra Russland. Når fibrene er fremstilt støpes disse i resiner før produktene blir formet og herdet spesielt til hvert enkelt prosjekt.

3.2.5 FRP produktegenskaper

Mangel på lovverk og standardisering av FRP fører til variasjoner i egenskapene mellom produktene fra de ulike aktørene. FRP-armering kan designes og produseres til å møte spesifikke behov og bruksområder. Viktige parametere som bestemmer produktegenskapene er valg av fiber- og matrikstype, samt volum- og masseforholdet mellom fiber og matriks. Disse parameterne bestemmes etter formel (3.2-1) til (3.2-5) [4]. Fiberorientering og produksjonsprosess er også viktige for produktegenskapene.

$$v_c = v_f + v_m \quad (3.2-1)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \text{ og } V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3.2-2)$$

$$V_f + V_m = 1 \quad (3.2-3)$$

$$m_c = m_f + m_m \quad (3.2-4)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \text{ og } M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (3.2-5)$$

v_c : Volum av komposittmateriale

v_f : Volum av fiber

v_m : Volum av matriks

V_f : Volumfraksjon av fiber

V_m : Volumfraksjon av matriks

m_c : Masse av komposittmateriale

m_f : Masse av fiber

m_m : Masse av matriks

M_f : Massefraksjon av fiber

M_m : Massefraksjon av matriks

Egenskapene til armeringstypene kan bestemmes empirisk [4]. Den empiriske måten består av å teste et utvalgt produksjonssett. Dette er tidkrevende og kostbart, da en liten endring i produktens sammensetning kan føre til store variasjoner i egenskapene. En mikromekanisk tilnærming gitt av Agarwal, Broutman, Daniel og Ishai brukes også for å beskrive de generelle egenskapene til FRP-armering [38]. I dette kapitlet beskrives de generelle egenskapene til de utvalgte armeringstypene ved den mikromekaniske tilnærmingen. Dette gir et bilde av hvilket potensial de forskjellige FRP-armeringstypene har, ved blant annet å endre fiber/matriks-forholdet. I 3.2.6 *Tilgjengelige FRP-produkter* hentes tall fra eksisterende produkter fra valgte produsenter. Disse tallene, som produsentene har bestemt med bakgrunn i empiriske data, legges til grunn for videre dimensjonering.

3.2.5.1 Fysiske egenskaper

Densitet

Komposittmaterialets densitet, ρ_c , bestemmes av densiteten til materialets bestanddeler ρ_f og ρ_m , og deres volumfraksjon.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.2-6)$$

ρ_c : Komposittetthet

ρ_f : Fibertetthet

ρ_m : Matrikstetthet

Tabell 3.2-4: Typiske densiteter for FRP-stenger for volumfraksjon, $V_f = 0,5-0,75$.

FRP Matriks	Stål	GFRP [4]	CFRP [4]	AFRP [4]	BFRP
Polyester	7850	1750-2170	1430-1650	1310-1430	2000-2450
Epoxy		1760-2180	1440-1670	1320-1450	2000-2450
Vinylester		1730-2150	1440-1630	1300-1410	1975-2440

Termisk utvidelseskoeffisient

Den termiske utvidelseskoeffisienten avhenger av fibertype, matrikstype og volumfraksjonen. GFRP kan ses på som isotropisk, mens CFRP og AFRP er anisotropiske. Den langsgående termiske utvidelseskoeffisienten, α_L , bestemmes primært av fibrenes egenskaper, mens den tverrgående, α_T , bestemmes av matriksen [4].

Tabell 3.2-5: Typiske varmeutvidelseskoeffisienter for stål- og FRP-armering [4].

Retning	Betong	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
α_L ($10^6/^\circ C$)	7 til 13	11	6 til 10	-9 til 10	-2 til -6	NA
α_T ($10^6/^\circ C$)	7 til 13	11	21 til 23	74 til 104	60 til 80	NA

NA – Ikke tilgjengelig

Negativ α gjør at materialet kontraherer når temperaturen øker, og ekspanderer når temperaturen synker. Forskjell i termisk utvidelseskoeffisient mellom FRP-armering og betong kan skape tvangskrefter i betongen og må tas til følge. Dette diskuteres ikke videre i denne rapporten [4].

3.2.5.2 Korttidsegenskaper

Strekkeegenskaper

Strekkeegenskapene til FRP-armering bestemmes hovedsakelig av bestanddelenes egenskaper, volumfraksjonen, fordelingen av fibre i matriksen, fysiske og kjemiske interaksjon, produksjonsmetode og kvalitetskontroll. FRP-armering har lineær-elastisk spenning-tøynings sammenheng helt frem til brudd [4].

Tabell 3.2-6: Typiske egenskaper for stål- og FRP-armering [4].

Egenskap	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
Langsgående E-modul (GPa)	200	35-60	100-580	40-125	40-70
Langsgående strekkapasitet (GPa)	450-700	450-1600	600-3500	1000-2500	NA
Bruddtøyningsgrense %	50-200	12-37	5-17	19-44	NA

NA – Ikke tilgjengelig

Trykkegenskaper

Det er ikke anbefalt å bruke FRP som trykkarmering. Når FRP-armering utsettes for trykk kan mikroknekking av fibrene i matrisen oppstå. Nøyaktige testresultater er vanskelig å oppnå og kollapsmekanismen avhenger av bestanddelene og volumforholdet. Eksperimenter viser likevel at FRP-armering med høyere strekkapasitet også har høyere trykkapasitet. Unntaket er AFRP, hvor fibrene har ikke-lineær oppførsel under trykk. I henhold til *ACI 440.1R.15* skal trykkbidrag fra alle typer FRP-armering neglisjeres [4].

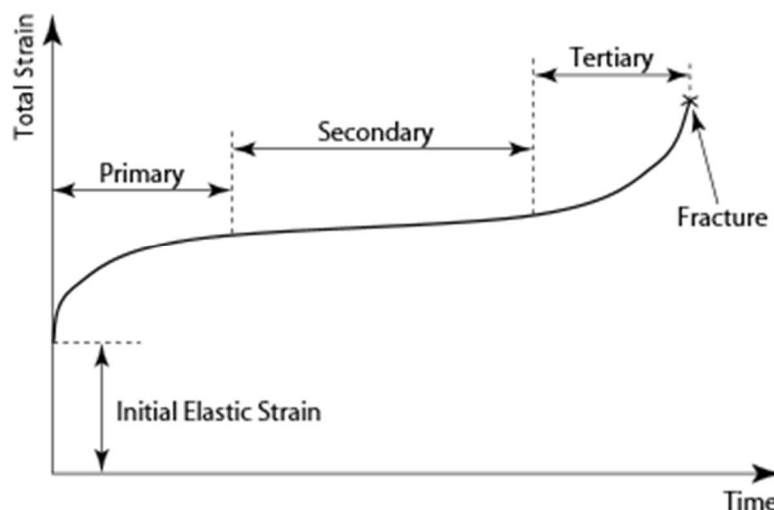
Skjæregenskaper

Skjæregenskapene til FRP-armering bestemmes først og fremst av matriksens egenskaper. FRP-armeringens skjærkapasitet er generelt lav. Ved skjærbrudd kan matrisen splittes, uten brudd av fibrene. For å øke skjærkapasiteten kan en matte av kontinuerlige fibre påføres, eller fibre kan vikles og flettes på tvers av hovedfibrene. Lengdearmeringens bidrag til skjærkapasitet neglisjeres, og skjærkreftene tas heller opp i form av strekk i bøylearmering [4].

3.2.5.3 Langtidsegenskaper

Kryp

Kryp beskriver den progressive deformasjonen til et materiale over tid under en konstant last. Fibre i FRP-armering har liten grad av kryp, men resinen får derimot store kryptøyninger. Det er resinen som tar mye av de initielle tøyningene før de overføres til fibrene. Kompositten får derfor påfølgende store tøyninger på kort tid. Disse stabiliseres når fibrene tar over, og er relativt uendret over en lengre periode. Denne perioden inkluderer bruksfasen til konstruksjonen.



Figur 3.2-8: Krypdeformasjonskurve over en konstruksjons levetid. Viser hvordan tøyningene utvikler seg igjennom de tre fasene av en konstruksjons levetid. Kilde: fib bulletin 40.

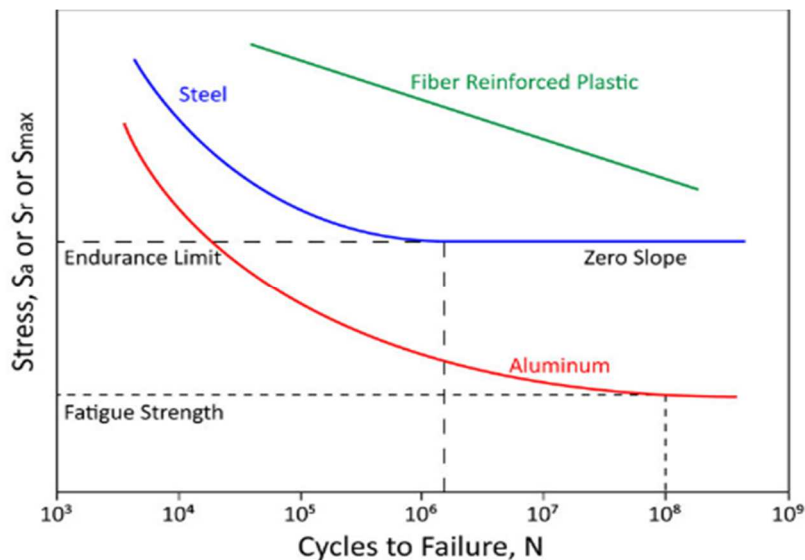
FRP-armering utsatt for konstante laster over en lang periode kan plutselig ryke ved oppnådd utholdenhetsgrense. Dette betegnes som krypbrudd og er et fenomen som oppstår i alle konstruksjonsmaterialer. *Fib bulletin 40* refererer til eksperimenter gjennomført av Yamaguchi i 1997 som viser at strekkapasiteten reduseres til 66 % og 79 % av korttidskapasiteten for henholdsvis AFRP og CFRP. *ACI 440.1R.15* tar hensyn til dette med å introdusere en miljøfaktor, C_e , som begrenser hvor mye av strekkapasiteten man tillates å utnytte [4].

Relaksasjon

Relaksasjon er en slags oppmykning av materialer over tid som gjør at spenninger avtar og tøyningene øker, når de utsettes for konstant last. Forsøk viser at relaksasjonen for forspente FRP-kabler er noe høyere enn for stål, og at det er stor variasjon mellom FRP-armeringstypene. Relaksasjonen estimeres å være på 2-3 % for CFRP, 11-25 % for AFRP og 4-14 % for GFRP, over en periode på 50 år [4] og blir større med økt temperatur og påført forspenning.

Utmatting

Utmatting er nedbrytingen av materiales integritet når det utsettes for vekslende spenninger over lang tid [39]. Utmattingsegenskapene til FRP-armering er komplekse og avhenger av bestanddelenes egenskaper, fiberretning, samt grensesnittet mellom fiber og matriks. FRP-armering har generelt svært gode utmattingsegenskaper som er nesten lineære til brudd. SN-kurvens fall varierer fra materiale til materiale, med 5-8 % for CFRP. *ACI 440.1R.15* setter begrensning på tillatt armeringsspenning, og det er viktig å rådføre seg med leverandør for å sikre at produktets utmattingsegenskaper er tilfredsstillende, da produksjonsmetode spiller inn på disse.



Figur 3.2-9: SN-kurver for FRP, stål og aluminium. Viser sammenhengen mellom størrelsen på varierende spenninger (S) og antall gjentatte belastninger (N). Kilde: qualitymag.com.

3.2.6 Tilgjengelige FRP-produkter

Fiberarmert polymer benyttes i dag i en rekke forskjellige produkter. Markedet tilbyr alt fra bilderammer, til armering for betongkonstruksjoner. Tilgjengelige armeringstyper av FRP inkluderer blant annet innstøpt armering, i form av stenger og nett, samt utenpåliggende armering i form av tekstiler, plater og striper som benyttes til forsterkning og utbedring av konstruksjoner.

I denne oppgaven har vi valgt å fokusere på konvensjonelle, innstøpte armeringsstenger. Da FRP-armering kan produseres forskjellig, med betydelig innvirkning på kvalitet har vi valgt å holde oss til pultruderte produkter, da dette er den mest anvendte produksjonsmetoden.

Følgende produkter er brukt i beregningene, samtlige er pultrudert.

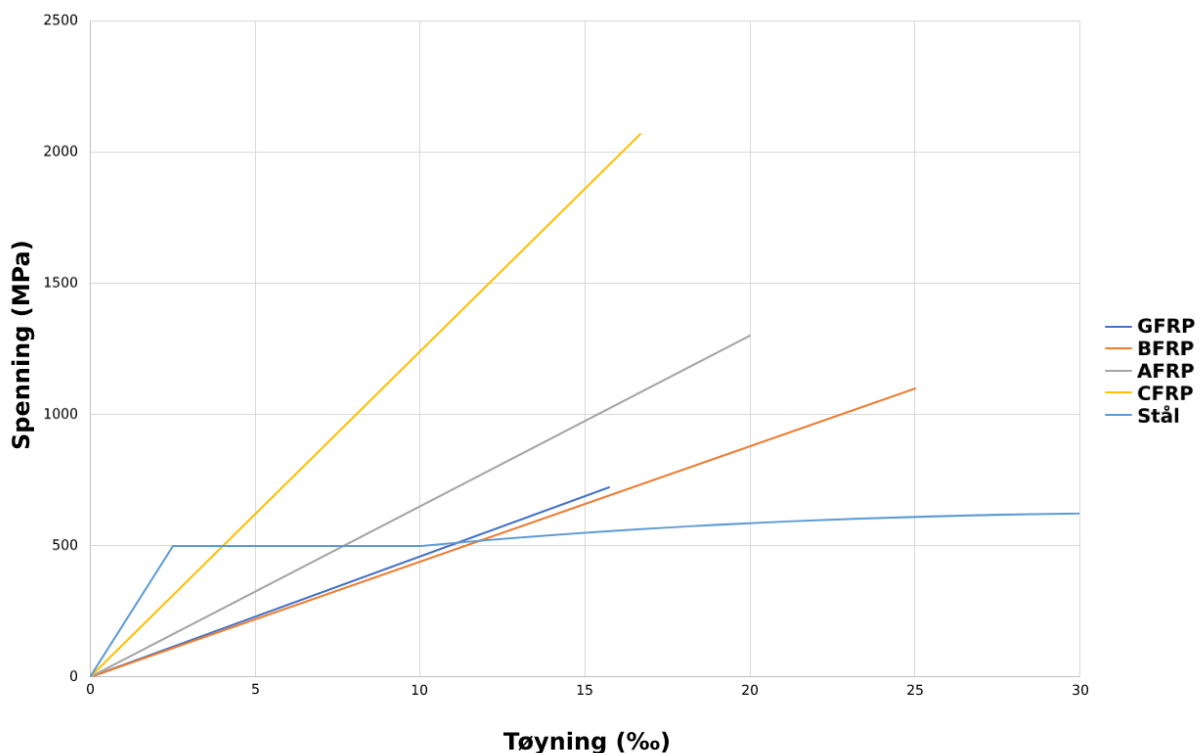
Tabell 3.2-7: Oversikt over utvalgte FRP-produkter.

Produsent	Materiale	Nettadresse
Aslan	GFRP	http://www.aslanfrp.com/resources/Aslan100.pdf
Aslan	CFRP	http://www.aslanfrp.com/resources/Aslan200.pdf
Anjie	AFRP	https://www.alibaba.com/product-detail/Aramid-fiber-reinforced-rebar-aramid-rebar_60598366062.html
Reforcetech	BFRP	http://wpstatic.idium.no/reforcetech.com/2016/12/RFT-BFRP-EN121217.pdf

Tabell 3.2-8: Produktdata til utvalgte FRP-Produkter, fra produsent.

Egenskaper	Materiale				
	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
E-modul (MPa)	200 000	46 000	124 000	65 000	44 000
Dimensjonerende strekkapasitet (MPa)	435*	724	2068	1170	880
Tøyningsgrense (‰)	2,18	15,7	16,7	18,0	20,0

*Flytegrense



Figur 3.2-10: Arbeidsdiagrammer. Figuren viser sammenheng mellom karakteristisk spenning og tøyning for de valgte armeringstypene. FRP-armeringene har lineær tøyningutvikling til brudd, mens stål har et lineært elastisk intervall i starten og går så over i en plastisk fase med store tøyninger ved flyt.

Tabell 3.2-9: Vurderingstabell for de utvalgte armeringstypene.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
E-modul	Grønn	Rød	Gul	Rød	Rød
Strekkapasitet	Rød	Gul	Grønn	Grønn	Gul
Trykkapasitet	Grønn	Rød	Rød	Rød	Rød
Skjærkapasitet	Grønn	Rød	Rød	Rød	Rød
Duktilitet	Grønn	Rød	Rød	Rød	Rød
Densitet	Rød	Grønn	Grønn	Grønn	Grønn
Pris	Grønn	Gul	Rød	Rød	Gul
Korrosjon	Rød	Grønn	Grønn	Grønn	Grønn
Elektromagnetisk nøytralitet	Rød	Grønn	Grønn	Grønn	Grønn
UV-sensitivitet	Grønn	Rød	Gul	Gul	Gul

Grønn = Bra, Gul = Nøytralt, Rød = Dårlig

3.2.7 Bestandighet/Ytre miljø

Generelt varierer forskningsresultater i stor grad mellom fibertype, produksjonsmetode og miljø når man ser på hvordan ytre miljø påvirker FRP-armering. Grunnet kommersielle årsaker oppgir i noen tilfeller ikke forskerne spesifikasjonene på fiber- og resintyper, noe som gjør det vanskelig å tolke dataene og trekke konklusjoner basert på resultatene. Ved bruk av FRP-produkter i konstruksjoner bør tall og forskning opp mot spesifikk miljøklasse og FRP-produkt legges til grunn [4].

De iboende faktorene som spiller inn på bestandigheten er kvaliteten på matriksen, fibre og grensesnitt mellom matriks og fiber i produktene [4].

Matriksen er naturlig bestandig mot sterke alkalier og sørger for beskyttelse av fibre. Denne beskyttelsen vil likevel påvirkes av følgende ytre faktorer [4]:

- konstruksjonens omliggende miljø (pH-verdier og eventuelle ioner)
- spenningene i komposittarmeringen
- temperatur
- kompositts kvaliteten (overflate, porøsitet og resinens homogenitet).

Hvor effektiv resinbeskyttelsen er avhenger også av armeringens tilstand. Usammenhengende matriks-overflate, enten i form av skader eller avkappede ender kan være utsatte for angrep. Avkappede FRP-stenger bør altså forsegles før de støpes inn for å unngå at uønskede kjemikalier trenger inn i fiberkompositten [4].

Klorider

Bruk av FRP-armering i betongkonstruksjoner er mest aktuelt for konstruksjoner i miljø med saltvann eller andre kilder til klorider. Forskere [40] [41] [42] [43] [44] [45] har undersøkt GFRP, AFRP og CFRP og sett på hvordan de forskjellige produktene påvirkes, når utsatt for miljøer med kloridinnhold opp til 4 %. Både påkjente og ikke-påkjente armeringsstenger, med temperaturer opp til 70°C og varierende relativ fuktighet ble testet, og i noen tilfeller påstås forvitningsperioder på over 50 år [4].

UV-stråling

Ultrafiolett stråling påvirker polymere materialer. Selv om FRP-armering innstøpt i betong ikke er utsatt for stråling, bør det tas høyde for potensiell reduksjon i bruddstyrke om armeringen blir utsatt for UV ved lagring, eller FRP-materialer blir brukt som ekstern armering. Tester i laboratorier [46] og i felt [47] sammenligner strekkapasiteten for upåvirkede og UV-utsatte prøver av glass-, aramid- og karbonfiber.

UV-intensitet på 0,2 MJ/m²/time ga følgende resultater for reduksjon av bruddstyrke for strekk;
AFRP-stenger eksponert i 2500 timer: 13 %,
GFRP-stenger eksponert i 500 timer: 8% (deretter ingen reduksjon),
CFRP-stenger viste ingen tegn til reduksjon ved UV-eksponering.

Testresultatene var tilnærmet identiske for fibre som ikke var innstøpte i matriks [4]. Prøver av BFRP ble ikke tatt for seg i forsøkene, men nettsiden Compositeworld.com hevder at basaltfibre ikke påvirkes av for ultrafiolett stråling og høyenergisk elektromagnetisk stråling [30].

Karbonatisering

Som en del av EUROCRETE-prosjektet [48] ble et begrenset forskningsarbeid på effekten av karbonatisert betong med FRP-armering gjort. Da resultatene ikke var entydige kunne ikke svekkelser grunnet karbonatisering påvises. *The International Federation of Structural Concrete (fib)* konkluderer med at negativ effekt på FRP-armering som følge av karbonatisert betong er usannsynlig. Faktisk nevnes den reduserte pH-verdien i betongen på grunn av karbonatisering som en bidragsyter til forlenget levetid av en konstruksjon grunnet den påfølgende reduksjonen av porevannalkalier som noen fibertyper og polymere materialer er sensitive for [4].

3.2.8 FRP som byggemateriale

Montering

En av fordelene er vekten som er tilnærmet en femtedel av stål. Dette gjør håndtering enklere og HMS på byggeplass bedres. Det blir mindre belastningsskader på håndverkere, men den lave vekten kan føre til at armeringen flyter opp under vibrering av betongen [4]. Det er derfor viktig å feste armeringen godt. Bindingen må være av plastikk eller andre ikke-korroderende materialer.

Den lave skjærkapasiteten gjør det også enkelt å kutte armeringen, men armeringen kan ikke bøyes etter produksjon. Dette vil være negativt for tilpasning på plassen, men med økt grad av detaljprosjektering med 3D-modellering av armering, vil tilpasning på byggeplass være mindre aktuelt. Dette stiller krav til at planleggingsfasen, men kan gi en mer effektiv byggeperiode. Ved kutting av armering må det sages, enten med et fint blad eller med vinkelsliper. Armeringen må ikke kappes med bolteklipper da dette kan skape forstyrrende støv og støvmaske bør benyttes ved kapping [4].

Den reduserte vekten vil føre til reduserte transportkostnader. Da man kan ha økt mengde armering per leveranse, vil antall leveranser kunne reduseres.

Tolleransekravene er nokså like som for vanlig stålarmering etter *NS-EN 1992-1-1*, med unntak av overdekningskrav for ulike eksponeringsklasser [6]. Grunnet FRP-armingens skjørhet, må de verken tråkkes eller plasseres gjenstander på. Armeringsstengene krever kortere avstander mellom understøttelser, normalt 2/3 av spennvidden til stålarmering [4].

Vedlikehold

Det største vedlikeholdsbehovet ved en stålarmerert konstruksjon er knyttet til korrosjon som reduserer armeringstverrsnittet [49]. Dette fører til redusert bæreevne og er avgjørende for levetiden til konstruksjonen. Når konstruksjonen ikke lenger opprettholder en gitt toleransegrense må den rives.

Ved å bruke FRP-arming er det minimalt behov for vedlikehold da den ikke ruster og dermed ikke fører til reduksjon av tverrsnittet. For å bestemme vedlikeholdsbehov og konstruksjonens levetid er det nødvendig å se på betongens egenskaper, samt langtidsvirkningene til de ulike FRP-armingstypene. Levetiden til en FRP-armert konstruksjon kan potensielt forlenges og dette kan rettferdiggjøre den økte tilvirkningskostnaden, ved at totalkostnadene for hele konstruksjonens levetid reduseres.

Pris

Prisen til FRP-arming bestemmes ut fra mange aspekter og er ofte konfidensiell. Gjennom samtale med representanter fra *ReforceTech* samt email-korrespondanse med *Fortius* – Europas største leverandør av FRP-arming - viser det seg at prisen avhenger av: volum, prosjektlokasjon, produksjonsmetode, materialkostnader og behov for teknisk støtte. Prisen drives også ned av verdien FRP medfører til å løse et spesifikt problem, dette for å gjøre produktet mer konkurransedyktig på markedet.

Det er funnet pris for både stål og BFRP, men GFRP, CFRP og AFRP har ikke latt seg innhente. Gjennom samtale med *Reforcetech* og *Fortius* er derfor en faktor for GFRP, CFRP og AFRP i forhold til stål brukt. Det er disse prisene (kr/mm²/lm) som legges videre til grunn i oppgaven. Pris for stål og BFRP finnes i *Vedlegg A* og den gjennomsnittlige prisen per mm² er beregnet i samme vedlegg.

Tabell 3.2-10: Prisoversikt. Kroner per mm² per løpemeter, med faktor for spesifikk pris, i forhold til stål.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
Pris(kr/mm²/lm)	0,11	0,33	1,11	1,11	0,17
Faktor	1	3	10	10	1,54

Referanseprosjekter

FRP-armering brukes ført og fremst i de mest miljøutsatte delene av en konstruksjon. Det finnes likevel forskningsprosjekter der konstruksjoner utelukkende er armert med FRP. Eksempler på slike konstruksjoner er blant annet EUROCRETE project og Albstadt-Ebingen bridge [50].



*Figur 3.2-11: Albstadt-Ebingen bridge, en av flere bruer utelukkende armert med FRP.
Kilde: techtextil-blog.com.*

Se *Vedlegg B* for flere referanseprosjekter.

Ulemper

En ulempe knyttet til bruk av FRP er det manglende regelverket, som gjør verifisering og godkjenning av konstruksjoner vanskeligere. En eurokode for komposittmaterialer er under utvikling. Øvrige svakheter er FRP-armeringens lave toleranse for høye temperaturer. Fibrene blir svekket ved høy temperatur, men det er matriksen som er den kritiske komponenten. Matriksen vil mykne og miste sine mekaniske egenskaper når temperaturen nærmer seg «glass transition temperature» [4]. Det er også begrensinger for etterbehandling, da bøyning etter herding ikke lar seg gjennomføre. Sist men ikke minst er det den høye prisen som hindrer økt bruk av FRP-armering. Ulemper vedrørende dimensjoneringsprosess og FRP-armeringens konstruktive virkninger utdypes i kapittel 4.3 *Dimensjonering av FRP-armerte konstruksjoner*.

4 Dimensjonering

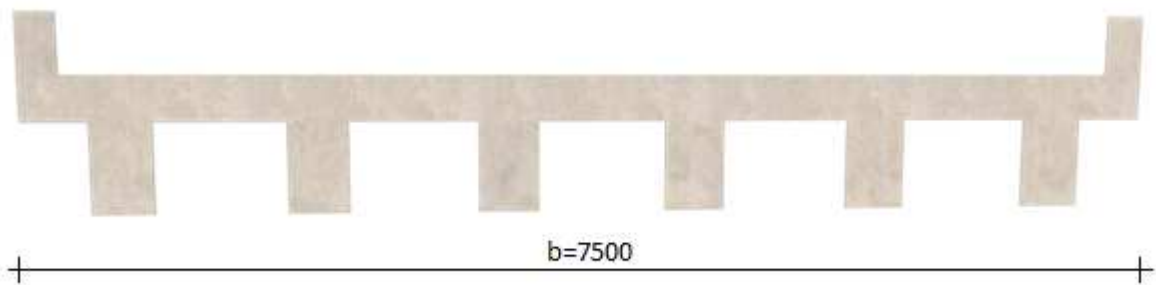
4.1 Bæresystem og konstruksjonselementer

4.1.1 Bæresystem

Analysemodellen er en bjelkebro med spennvidde på 8 m og bredde på 7,5 m. Bredden er basert på en H1 veg hentet fra Statens vegvesens *Håndbok N100 Veg- og gateutforming* [51]. Bruen har 6 underliggende bjelker med en senteravstand på 1,25 m. Inndelingen er begrunnet med en fornuftig avveining av antall bjelker og hver enkelt bjelkes påkjenning. En dypere utredelse av det globale bæresystemet anses ikke som vesentlig for oppgaven, da oppgaven fokuserer på FRP-armering og ikke optimalisering av bæresystem til bru. Fokus på FRP-armering på elementbasis ses på som mer hensiktsmessig for tilegning av kunnskap om materialets virkning på generell basis.



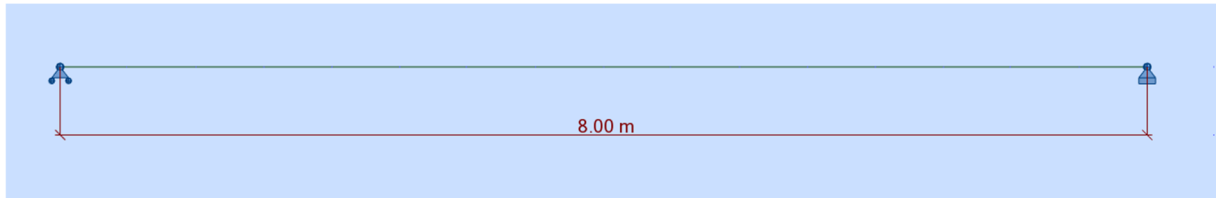
Figur 4.1-1: Lengdesnitt av analysemodellen. Spennvidde = 8000 mm.



Figur 4.1-2: Tverrsnitt av analysemodellen. Bredde = 7500 mm.

4.1.2 Statisk system

Det statiske systemet består av et fastlager og et glidelager. Bruen er fritt opplagt og statisk bestemt. Dette hindrer tvangskrefter, men vil i gjengjeld gi økt feltmoment og nedbøyning, i forhold til en løsning med en grad av innspenning ved opplegg. Dette er en konservativ tilnærming, og endring av statisk system vil gi mindre påkjenning, som igjen fører til at spennvidden kan økes for å få samme belastning som ved fritt opplagt.



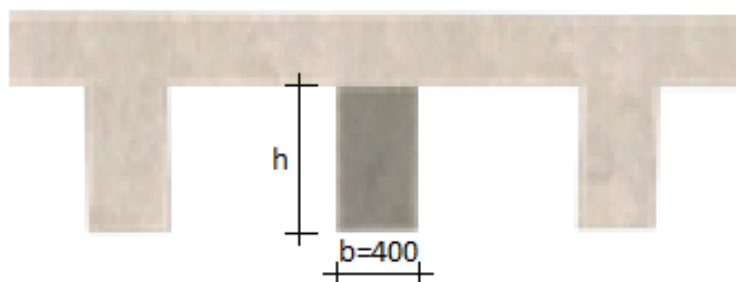
Figur 4.1-3: Analysemodellens statiske system. Fritt opplagt, statisk bestemt konstruksjon.

4.1.3 Konstruksjonselementer

Bruen kan deles opp i ulike konstruksjonselementer basert på hvordan bruene utformes og støpes. To alternativer vurderes. Første alternativ er å benytte bjelker og dekker som støpes hver for seg, slik at samvirke ikke oppnås. Andre alternativ er at dekket og bjelkene støpes sammen, slik at samvirke oppnås, og deler av flensen kan brukes som trykksone i bjelkene. Det er da mulig å se på virkningen FRP-armering har på ulike tverrsnitt. Analysen kan dermed deles opp i rektangulær bjelke, dekke og T-bjelke.

Rektangulær bjelke

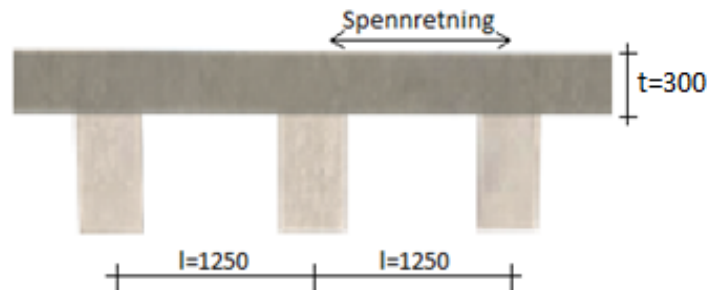
Bjelkens bredde er satt til 400 mm og høyden bestemmes slik at kapasiteten blir tilstrekkelig. Krav til fri seilingshøyde tas ikke stilling til og begrenser dermed ikke tverrsnittshøyden.



Figur 4.1-4: Rektangulær bjelke.

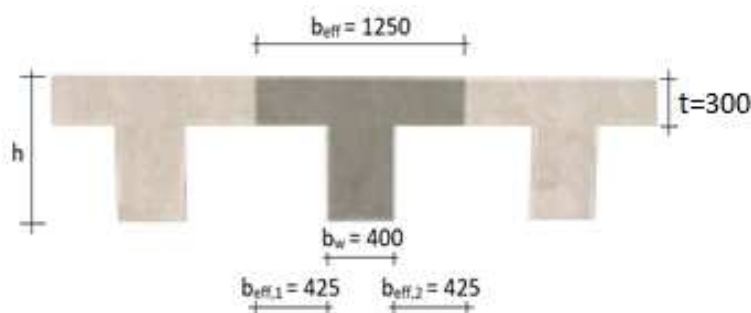
Dekke

De øverste delene i en bru er mest utsatte for vegsaltyng. Ved å benytte FRP-armering i disse delene av bruene, kan vedlikeholdet reduseres betydelig. Det tas utgangspunkt i en dekketykkelse på 300 mm og dekket ligger kontinuerlig over opplegg. Dekketykkelsen er konferert med veileder i Sweco og anses som en fornuftig verdi. Bjelkene tar størst andel av kreftene, men det er dekket som fordeler kreftene til bjelkene.



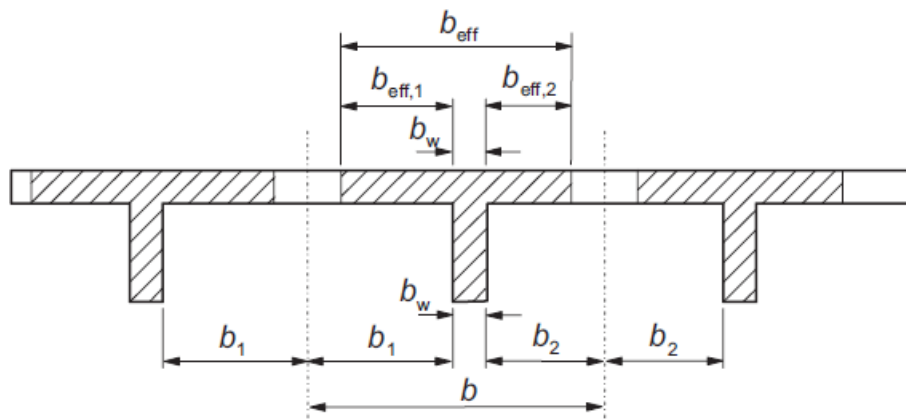
Figur 4.1-5: Dekke.

T-bjelke



Figur 4.1-6: T-tverrsnitt.

Ved valg av T-bjelke er det forutsatt at dekket og bjelkene er støpt i én etappe, slik at samvirke oppnås. For å regne på tverrsnittets kapasitet er det etter *NS-EN 1992-1-1* [7] avgjørende å undersøke om de geometriske forutsetningene tillater å regne med jevn spenningsfordeling over hele flensbredden. Som presentert i 4.1.1 er broen 7,5m bred. Ved valg av T-tverrsnitt vil brubanen bestå av seks symmetriske tverrsnitt, som vist på figur 4.1-2. I henhold til standarden er følgende krav for å kunne regne med jevn spenningsfordeling gitt:



Figur 4.1-7: Geometriske parametre for bestemmelse av effektiv flensbredde. Kilde: *NS-EN 1992-1-1*.

$$b_{eff} \leq b \quad (4.1-1)$$

Den effektive flensbredden b_{eff} for en T-bjelke kan beregnes som:

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (4.1-2)$$

der,

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_o \leq 0,2l_o \quad (4.1-3)$$

og

$$b_{eff,i} \leq b_i \quad (4.1-4)$$

Utrekning gir $b_1 = b_2 = 0,885 \text{ m}$.

Fra geometrien illustrert på figur 4.1-6 er $b_1 = b_2 = \frac{1250-400}{2} = 0,425 \text{ m}$.

Fra figur 4.1-7 er $b_{eff} = b$ samt er $b_{eff,1} = b_{eff,2} = b_1 = b_2$.

Vi ser da at vi trygt kan regne kapasitet med jevn spenningsfordeling over hele trykksonen.

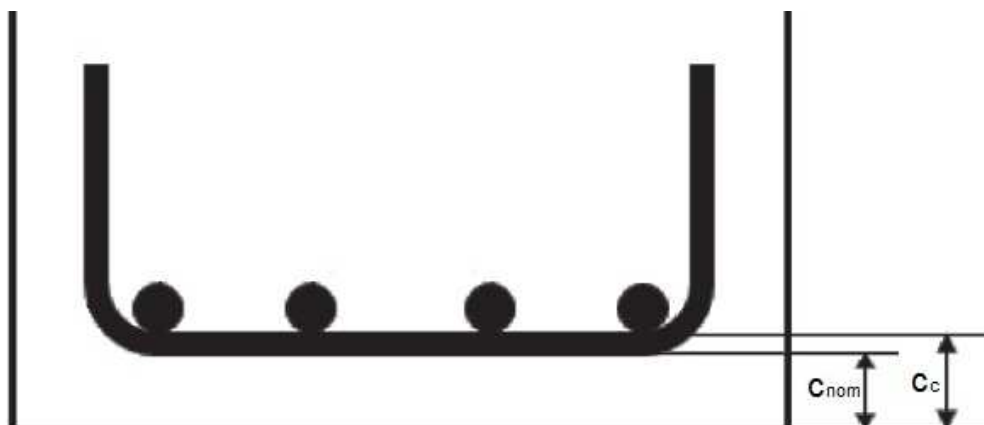
4.1.4 Overdekning

Overdekningstykkelsen for konstruksjonsdeler med stål bestemmes med bakgrunn i minste overdekning av hensyn til bestandighet, $c_{min,dur} = c_{min}$. For bjelken som dimensjoneres med bakgrunn i optimaliseringskapittelet, tas $c_{min,dur}$ fra tabell 7.2 i Statens Vegvesens håndbok *N400 – Bruprosjektering* [52]. For konstruksjonsdeler i maritime miljøer settes minimum overdekning til 100 mm. I den nominelle overdekningen, c_{nom} , som konstruktiv armering skal prosjekteres med, inkluderes også et toleransetillegg, Δc_{dev} . Fra håndbok *N400* har vi at;

$$\Delta c_{dev} = \pm 15 \text{ mm ved } c_{min} < 70 \text{ mm.} \quad (4.1-5)$$

$$\Delta c_{dev} = \pm 20 \text{ mm ved } c_{min} \geq 70 \text{ mm.} \quad (4.1-6)$$

I tillegg kommer skjærarmeringens diameter, $c_{skjær}$, som ikke dimensjoneres i denne oppgaven, men som regnes med å være 10 mm i diameter ved bestemmelse av c_c . Se figur 4.1-8.



Figur 4.1-8: Overdekning.

Samlet avstand fra ytterkant av strekkarmeringen til betongens overflate, c_c , for bjelken med stålarmering blir;

$$c_{c, \text{stål}} = c_{\text{nom}} + \Delta c_{\text{dev}} + c_{\text{skjær}} = 100 + 20 + 10 = 130 \text{ mm} \quad (4.1-7)$$

For FRP-armerte bjelker uten korrosjonsproblematikk kan overdekningstykkelsen – etter rådføring med veileder i Sweco – settes slik at den tilfredsstiller kravet til heft. Her refererer *N400* til de nasjonale kravene fra *NS-EN 1992-1-1*, hvor minste overdekning av hensyn til heft, $c_{\text{min},b}$, er lik stangdiameteren, men ikke mindre enn 10 mm.

I første del av dimensjoneringskapittelet - hvor effekten av å enten justere armeringsarealet eller den effektive tverrsnittshøyden ses nærmere på - brukes den samme overdekningen på alle tverrsnitt. Slik oppnås mer generaliserbare observasjoner når det kommer til hvordan FRP-armeringens lave E-modul påvirker spenningsbildet, og hvilke konsekvenser dette får for dimensjonering.

4.2 Laster og grensetilstander

4.2.1 Laster

Dette kapittelet omhandler følgende karakteristiske laster:

Tabell 4.2-1: Oversikt over karakteristiske laster.

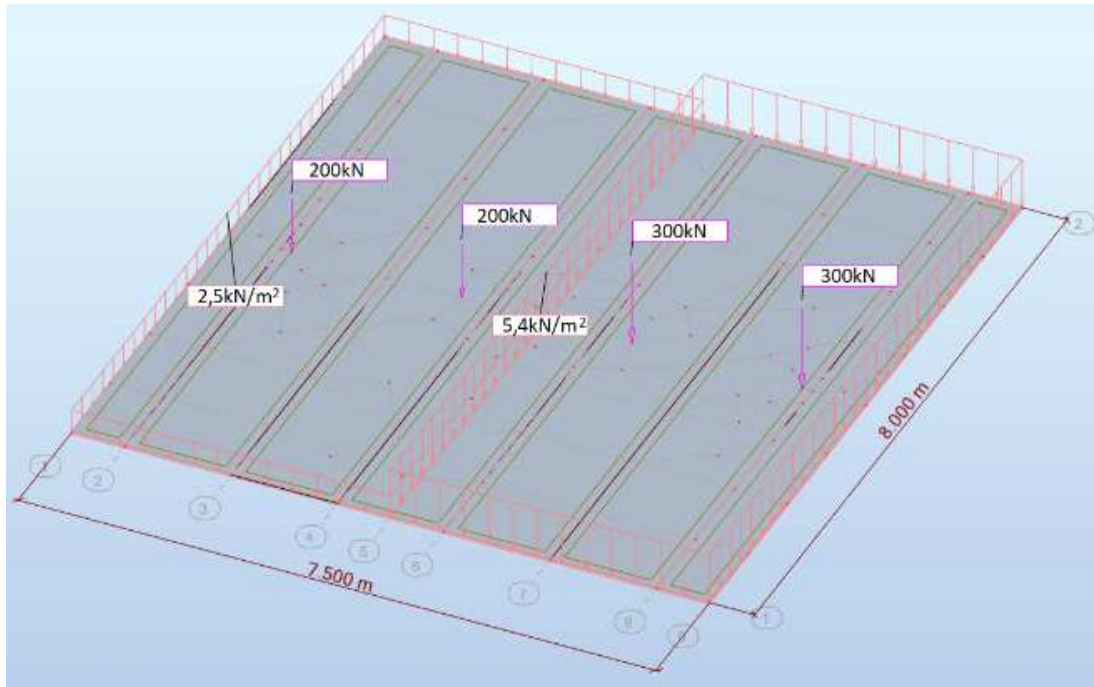
Egenlast	G
Trafikklast	P
Trafikklast	Q

Egenlast - G

For utregning av elementenes egentyngde er tyngdetetthet for betong hentet fra Tabell A.1 i *NS-EN 1991-1-1: Allmenne laster Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger* [53]. Betongens egenvekt er satt til 25 kN/m³ og 24 kN/m³ for henholdsvis stål- og FRP-armerte tverrsnitt. Dette skyldes at FRP-armeringens egenvekt er tilnærmet lik som betong.

Trafikklast - P & Q

Trafikklasten blir beregnet med utgangspunkt i *NS-EN 1991-1-2: Trafikklast på bruer* [54]. Aktuell lastsituasjon, LM1, baserer seg på to jevnt fordelte trafikklasten på henholdsvis felt 1 og 2, samt 4 punktlaster per felt fra hjul, plassert i minst gunstig punkt i felt. De jevnt fordelte trafikklastene er, med reduksjon fra nasjonalt tillegg, 5,4 kN/m² og 2,5 kN/m² i henholdvis felt 1 og 2. Hjullastenes karakteristiske verdi er 200 kN på minst belastede, og 300 kN på mest belastede felt. Som en konservativ forenkling, konferert med veileder i Sweco, er to og to hjullaster, i kjøreretning, slått sammen til én og plassert midt i felt.



Figur 4.2-1: Viser lastenes plassering, med utgangspunkt i LM1.

De stållarmerte tverrsnittene som det sammenlignes med er dimensjonert for følgende lastvirkninger:

Tabell 4.2-2: Laster og lastvirkninger.

	G (kN/m)	Q (kN/m)	P (kN)	q_{ed} (kN/m)	P_{ed} (kN)	M_{ed} (kNm)
Rektangulært	17,38	6,75	300	30,98	450	1147,8
T-tverrsnitt	14,38	6,75	300	27,38	450	1119,0
Dekke	7,5**	5,4**	300	17,10**	450	110,7*

* Momentverdi for dekke, M_{ed} (kNm/m) er hentet fra tilhørende Robotmodell. Dette skyldes at tilnærmingen med å regne på elementet som en én meter bred bjelke er svært konservativ, da det ikke får med samvirkebidraget som fordeler momentet i tverretning. Dette er konferert med internveileder og er en måte å ta høyde for samvirket på.

** benevning kN/m²

4.2.2 Bruddgrensetilstand

Lastfaktorer

Bruddgrensetilstanden indikerer kollaps i konstruksjonen. For bestemmelse av lastkombinasjon er lastfaktorer for henholdsvis egen- og nyttelast valgt, som vist i tabell under. Dette er konservativ bruk av ligning 6.10a, som presentert i Eurokode 2 [7]. Følgende forenkling er valgt da det ikke har stor relevans for oppgaven. Lastkategorier og øvrige faktorer ses derfor bort fra.

Tabell 4.2-3: Lastfaktorer

Lasttype	Lastfaktor $\gamma_{G,Q,P}$
Permanent: Egenlast - G	1,2
Dominerende, variabel: Punktlast - P	1,5
Øvrig, variabel: Jevnt fordelt - Q	1,5

4.2.3 Bruksgrensetilstand

Kriterier for bruk skal vurderes opp mot bruksgrensetilstand, med faktorer for materialer og laster lik 1,0. Svingninger, nedbøyning og riss er alle viktige faktorer. Da vi, som nevnt i avgrensninger, velger å se bort fra dynamisk analyse vil bruksgrense bare ta for seg nedbøyning og riss. Nedbøyning av brubanen skal ikke overstige $l/350$ der l er lengden av det betraktede spennet [52]. Egenvekt anses som permanent last og det blir brukt en langtidsfraksjon på 0,5 for trafikklaster ved betraktning av nedbøyninger [53].

Ved dimensjonering for nedbøyning av bruer er vanlig prosedyre etter Håndbok N400 å støpe med overhøyde som kompenserer for tilnærmet permanente lasters bidrag til nedbøyninger. Denne oppgaven bruker en mer generell tilnærming, ved å regne ut nedbøyninger etter konvensjonell metode. På denne måten aktualiseres resultatene til å også gjelde andre typer konstruksjoner enn bruer.

Flere prosjektspesifikke faktorer spiller inn på kryptall. Konferert med veiledere i Sweco er det brukt et passende kryptall, $\phi = 2,0$.

4.3 Dimensjonering av FRP-armerte konstruksjoner

4.3.1 Antagelser

ACI 440.1R-15 [6] metode for bestemmelse av et tverrsnitts momentkapasitet tar utgangspunkt i at følgende antagelser er gjeldende:

- Navier/Bernoullis hypotese om at plane bjelketverrsnitt før belastning forblir plane også etter momentbelastning - altså; tøyninger i armering og betongtrykksone er proporsjonale med avstanden fra nøytralaksen.
- Maksimal effektiv trykktøyninger, ϵ_{cu3} , i betongen settes lik 3,5 ‰.
- Betongens strekkapasitet neglisjeres.
- FRP-armeringen har lineær elastisk utvikling helt til brudd.
- Full heft mellom betong og FRP-armering.

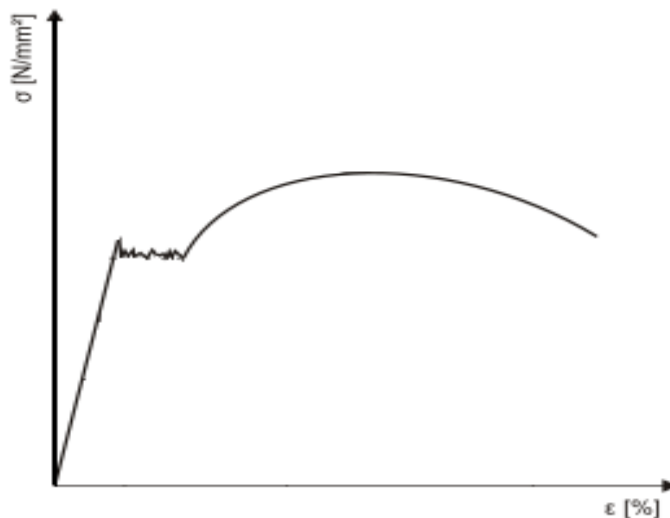
4.3.2 Bruddgrensetilstand

Metodene utviklet for American Concrete Institutes (ACI) 440-serie er analoge til metodene for dimensjonering av momentkapasitet som vi kjenner fra NS-EN 1992-1-1. Eksperimentdata viser at prinsippene for bestemmelse av et stålarmeret tverrsnitts momentkapasitet også er anvendbare ved bruk av komposittarmering [6].

Testdata baserer seg på rektangulære tverrsnitt med ett-lags strekkarmering, men ifølge ACI kan konseptene også anvendes for tverrsnitt av annen geometri - med FRP-armering i flere lag, samt i kombinasjon med annen type armering - uten at påstanden støttes opp med testresultater.

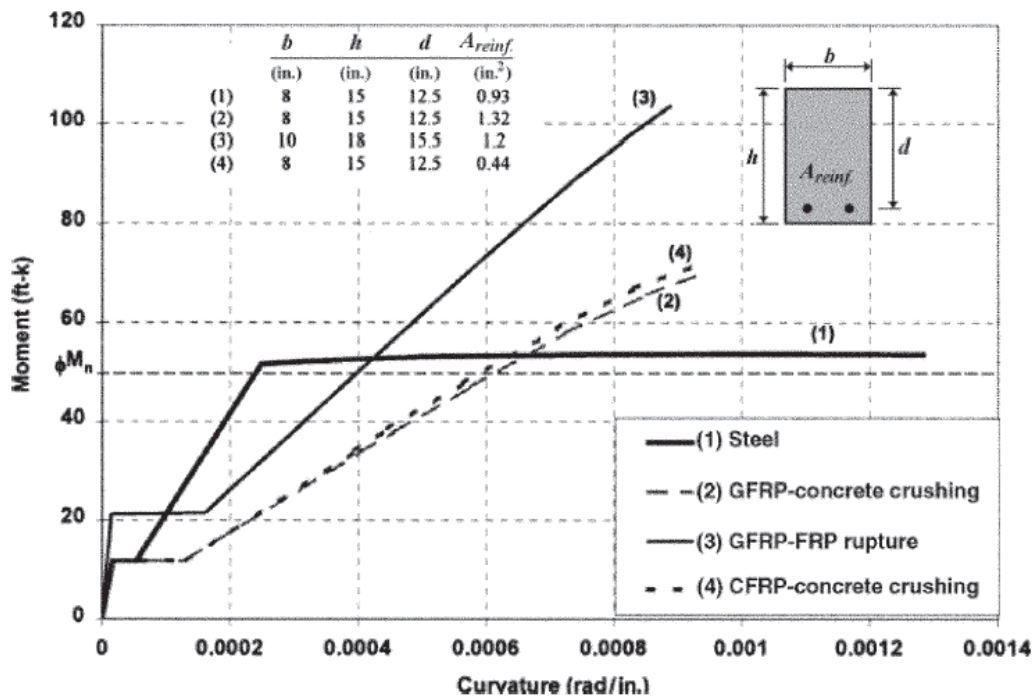
4.3.2.1 Designfilosofi

For stålarmert betong designes konstruksjoner normalt for å oppnå flyt i armeringen ved dimensjonerende moment, uten at betongen går til brudd. Dette er ønskelig grunnet stålets duktile natur som gir varige deformasjoner ved tøyninger vesentlig lavere enn materialets tøyninger ved brudd. De store tøyningene i det plastiske intervallet gir oss klare indikasjoner på at opptredende moment har overskredet tverrsnittets kapasitet, og man designer såkalte underarmerte tverrsnitt.



Figur 4.3-1: Arbeidsdiagrammet viser stålets lineære tøyningsutvikling frem til flyt. Stålets duktile natur trer i kraft etter at flyt er oppnådd.

FRP-armering har arbeidsdiagrammer som er lineære helt til brudd. Fremgangsmåten med underarmering er derfor ikke ønskelig da brudd i FRP-armeringen vil gi plutselig og katastrofal kollaps av konstruksjonen [37] [55] [56] [57], til tross for at man før brudd vil få store nedbøyinger og riss grunnet FRP-armeringens store bruddtøyninger. Tverrsnitt hvor momentkapasiteten begrenses av strekksonen sier vi er *strekkkontrollert*. Trykkontrollerte tverrsnitt - hvor betongen går til brudd før armeringen - er noe mer ønskelig, da disse har en viss fordelaktig, men begrenset, inelastisk utvikling før brudd (se Figur 4.3-2).



Figur 4.3-2 Teoretisk moment/krumnings-diagram: Betongtverrsnitt av stål og FRP-armering. ϕ -faktorer henholdsvis 0.9, 0.65, 0.55, 0.65 for (1), (2), (3) og (4). Kilde: ACI.

Figur 4.3-2 viser teoretisk oppførsel av forskjellige tverrsnitt med samme momentkapasitet ϕM_n . Legg merke til at det strekkkontrollerte tverrsnittet med glassfiberarmering (GFRP) har et større betongtverrsnitt for å muliggjøre at strekksonen skal kunne være begrensende faktor.

Både trykkkontrollerte og strekkkontrollerte bruddmekanismer er akseptable så lenge det tas høyde for konstruksjonens mangel på duktilitet. Dette gjøres ved å multiplisere nominell bøyemomentkapasitet med en reduksjonsfaktor, ϕ , som presenteres nærmere under *Reduksjonsfaktor for duktilitet* senere i kapittelet. Vi får kriteriet;

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4.3-1)$$

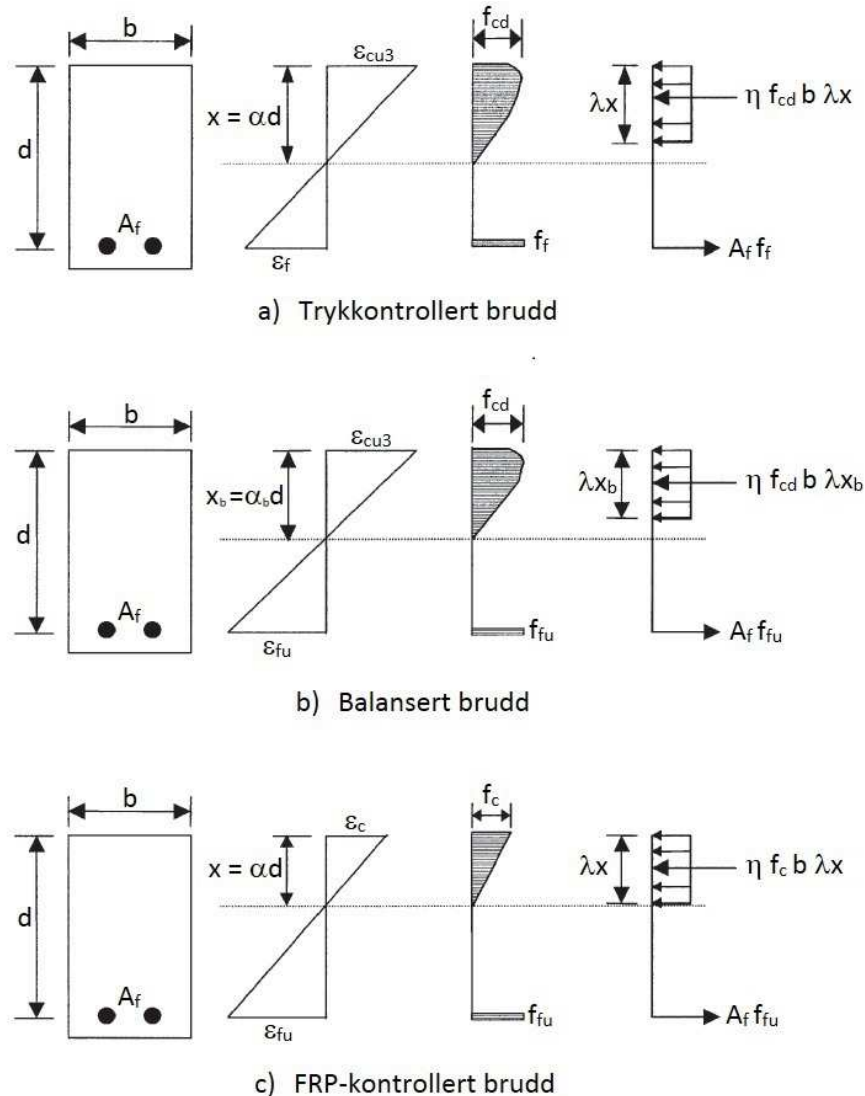
ϕ : Reduksjonsfaktor for duktilitet

M_n : Nominell bøyemomentkapasitet

ϕM_n : Dimensjonerende bøyemomentkapasitet

M_u : Dimensjonerende moment

Nominell bøyemomentkapasitet bestemmes analogt til metodene i *Eurokode 2* - på grunnlag av de interne kreftenes likevekt, i kombinasjon med tøyingsbildet og Hookes sammenheng mellom spenninger, tøyninger og E-modul. I tillegg spiller det en rolle hvilken tilstand som er kontrollerende for bruddgrensekapasiteten – trykkkontrollert og strekkkontrollert. Vi får tre mulige scenarier for brudd;



Figur 4.3-3: Bruddmekanismer.

- a) Trykkkontrollert brudd. Betongen oppnår bruddspenninger og blir begrensende faktor, et typisk overarmert tverrsnitt.
 b) Balansert brudd. Strekk- og trykksonen er balansert, slik at de går til brudd samtidig.
 c) FRP-kontrollert brudd. Armeringen oppnår bruddspenninger og strekksonen blir begrensende faktor, et typisk underarmert tverrsnitt.

Tilfelle b er et teoretisk mellomstadium hvor betong og FRP-armering går til brudd samtidig. Hvilken bruddtilstand som er aktuell bestemmes på bakgrunn av armeringsforholdet, ρ_f ;

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (4.3-2)$$

ρ_f : Armeringsforhold for FRP – armert tverrsnitt

A_f : Armeringsareal

b : Tverrsnittsbredde

d : Effektiv tverrsnittshøyde

Som referanse introduseres et balansert armeringsforhold, ρ_{fb} , som tar utgangspunkt i tilfelle (b) fra figur 4.3-3 - samtidig brudd i betong og armering. Siden FRP ikke flyter før det går til brudd, baserer det balanserte armeringsforholdet seg på de dimensjonerende verdiene for strekkstyrken;

$$\rho_{fb} = \eta \lambda \frac{f_{cd}}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu3}}{E_f \varepsilon_{cu3} + f_{fu}} \quad (4.3-3)$$

ρ_{fb} : Balansert armeringsforhold

λ : Faktor for definisjon av effektiv trykksonehøyde

η : Faktor for definisjon av effektiv fasthet

f_{cd} : Dimensjonerende trykkbruddfasthet, betong

f_{fu} : Dimensjonerende strekkbruddfasthet, FRP

E_f : E – modul, FRP

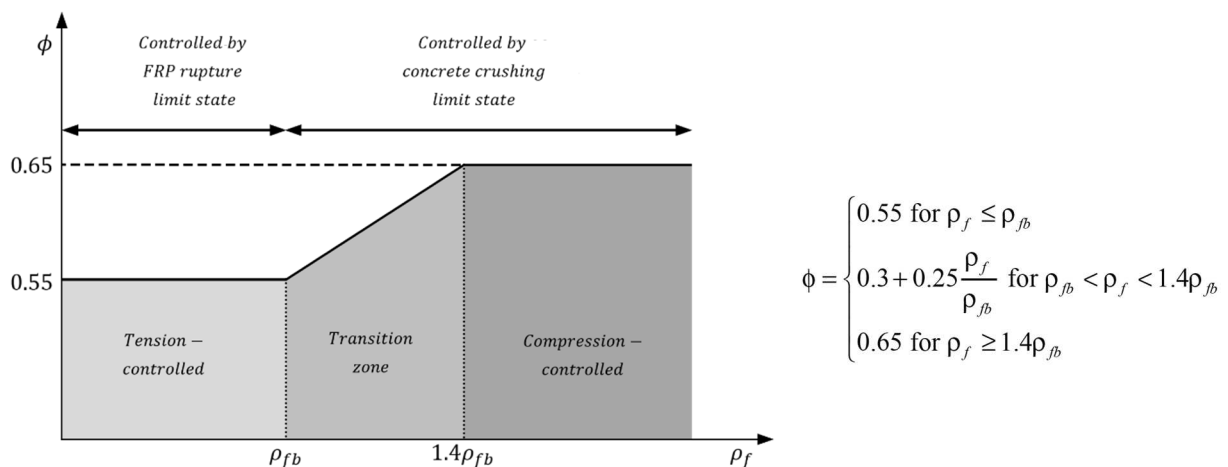
ε_{cu3} : Dimensjonerende bruddtøyninger, betong

Om tverrsnittets armeringsforhold er større enn det balanserte armeringsforholdet ($\rho_f > \rho_{fb}$) vil bruddet være trykkkontrollert. Har vi mindre armering enn ved balansert armeringsforhold vil strekksonen være begrensende for momentkapasiteten - vi får et FRP-kontrollert brudd.

Reduksjonsfaktor for duktilitet

For å kompensere for FRP-armeringens induktilitet introduserer *ACI 440.1R-15* en reduksjonsfaktor, ϕ , for å ivareta momentpåkjennte konstruksjoners sikkerhet. Basert på *ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete* settes ϕ -faktoren til 0,65 ved trykkkontroll og 0,55 for strekkkontroll, med utgangspunkt i en *target reliability index* på 3,5 til 4,0 [58].

Selv om man ved $\rho_f > \rho_{fb}$ teoretisk alltid vil ha et trykkkontrollert brudd, kan man likevel ikke være sikker på at dette faktisk vil skje i virkeligheten for tilfeller hvor ρ_f nærmer seg balansert verdi. Derfor etableres et lineært overgangsintervall for domenet $\rho_f \in \{\rho_{fb}, 1,4\rho_{fb}\}$.



Figur 4.3-4: Viser reduksjonsfaktor for duktilitet, ϕ , som funksjon av armeringsforhold. Kilde: *ACI 440.1R-15*.

4.3.3 Momentdimensjonering

Trykkkontrollert

For å regne ut et trykkkontrollert tverrsnitts nominelle bøyemomentkapasitet, M_n har vi basert på ACI;

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4.3-4)$$

M_n : Nominell bøyemomentkapasitet

f_f : Strekkspenninger, FRP

$$a = \lambda x = \frac{A_f f_f}{\eta f_{cd} b} \quad (4.3-5)$$

a : Ekvivalent trykksonehøyde

f_{cd} : Dimensjonerende trykkbruddfasthet, betong

x : Trykksonehøyde

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu3} \frac{\lambda d - a}{a} \quad (4.3-6)$$

Ved å bruke a fra ligning (4.3-5) i ligning (4.3-6) og løse for f_f fås;

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu3})^2}{4} + \frac{\eta \lambda f_{cd}}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu3} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu3}} \right) \leq f_{fu} \quad (4.3-7)$$

Nominell bøyemomentkapasite, M_n , i trykkkontrollerte tilfeller kan bestemmes ved ligning (4.3-4), (4.3-5) og (4.3-7).

Da FRP-armeringens tøyninger øker lineært til brudd, kan man også finne spenningsnivået i armeringen ved hjelp av ligning (4.3-6), siden faktisk spenning f_f vil være mindre enn f_{fu} for trykkkontrollerte bruddgrensetilstander.

Strekkkontrollert

I et strekkkontrollert tverrsnitt er $\rho_f < \rho_{fb}$ og det er trykksonen som dominerer - som i tilfelle c i figur 4.3-3. For å regne ut et strekkkontrollert tverrsnitts nominelle bøyemomentkapasitet, M_n har vi basert på ACI at;

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (4.3-8)$$

En får dog problemer ved denne fremgangsmåten. Selv om det er kjent at det er bruddspenning i armeringen, baserer denne fremgangsmåten seg også på trykksonehøyden, x , og betongtøyningene, ε_{cu3} , ved brudd i armeringen. Analyse med disse ukjente blir fort meget komplekst og ACI 440.1R-15 foreslår derfor en konservativ, forenklet metode for å beregne en nedre grense for den nominelle bøyemomentkapasiteten;

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\lambda x_b}{2} \right) \quad (4.3-9)$$

x_b : Balansert trykksonehøyde

$$x_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (4.3-10)$$

ε_{cu3} : Dimensjonerende bruddtøyninger i betong

ε_{fu} : Dimensjonerende bruddtøyninger i armering

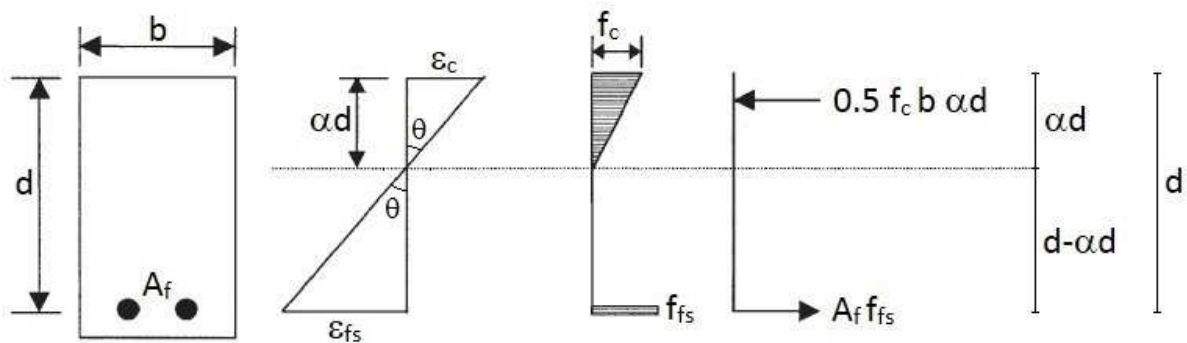
4.3.4 Bruksgrenstilstand

4.3.4.1 Nedbøyning

Ved utregning av nedbøyning i bruksgrensetilstand tar vi utgangspunkt i faktiske laster og materialegenskaper for å se på et konstruksjonselements deformasjon ved påkjenning under bruk [59].

Ved å regne ut den virkende stivheten til tverrsnittet kan vi enkelt sette dette inn i velkjente formler for nedbøyning av konstruksjoner med forskjellige lastsituasjoner og opplagerbetingelser.

Utrekningen av et tverrsnitts stivhet i bruksgrense baserer seg på å først finne ut en faktisk trykksonehøyde under bruksbelastning, $x = \alpha d$. Dette gjøres ved å kombinere likevektsprinsippet, Hookes lov og Naviers hypotese.



Figur 4.3-5: Likevektsbetraktning for bøyning i bruksgrensetilstand.

Kraften fra armeringen i strekk og resultanten fra den lineært økende spenningsfordelingen i trykksone med plassering i tredjedelspunktet, danner likevekt i x-retning. I bruksgrensetilstand legger vi til grunn et stadium II tverrsnitt der hele trykksone ligger innenfor det elastiske intervallet, og at vi derfor får en lineær spenningsfordeling. Slik får vi uttrykket;

$$f_c \cdot b \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{1}{2} - f_{fs} \cdot A_f = 0 \quad (4.3.11)$$

f_{fs} : Bruksspenninger i FRP – armering (Mpa).

Siden vi opererer innenfor materialets elastiske intervall vil Hookes lov for elastisitet gjelde for både armering og betongtrykksone [59];

$$f_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (4.3-12)$$

$$f_{fs} = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (4.3-13)$$

Naviers hypotese om momentbelastede bjelker, sier at et plant tverrsnitt før belastning vil forbli plant også under og etter bøyning for bjelker med lengde vesentlig større enn høyde [59]. Basert på dette kan vi ved å se på tøyingsbildet få at;

$$\tan \theta = \frac{\varepsilon_c}{\alpha d} = \frac{\varepsilon_f}{(d-\alpha d)} = \theta, \quad \text{når } \theta \approx 0 \quad (4.3-14)$$

$$\varepsilon_c = \theta \cdot \alpha d \quad (4.3-15)$$

$$\varepsilon_f = \theta(d - \alpha d) = \theta d - \theta \alpha d \quad (4.3-16)$$

Ved å kombinere de tre formlene som baserer seg på geometri og fysiske prinsipper som vil gjelde uansett materialegenskaper, kan vi, ved å innføre;

$$\text{armeringsforholdet, } \rho = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (4.3-17)$$

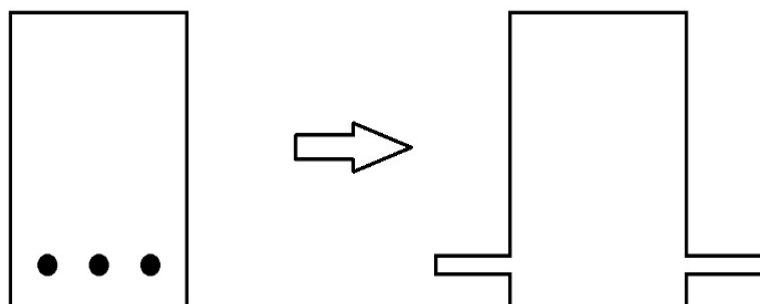
og

$$\text{elastitetsforholdet, } \eta = \frac{E_f}{E_{cm}} \quad (4.3-18)$$

finne faktisk trykksonehøyde, $x_s = \alpha_s d$ ved å løse andregradsligningen [59];

$$\alpha_s^2 + 2\eta\rho \cdot \alpha_s - 2\eta\rho = 0 \quad (4.3-19)$$

x_s anvendes til å regne ut det opprissede tverrsnittets arealregghetsmoment, I_{cr} . Dette gjøres ved å se på forholdet mellom E-modulene, η , og slik lage et ekvivalent homogent tverrsnitt av betong med samme arealregghetsmoment. Tvettnittets stivhet blir $E_{cm}I_{cr}$.



Figur 4.3-6: Ekvivalent tverrsnitt. Stålarmeringen kompenseres med et ekvivalent betongareal.

Det ekvivalente tverrsnittets stivhet legges så til grunn ved utregning av opptredende nedbøyinger ved karakteristiske laster.

4.3.4.2 Riss

For momentbelastede konstruksjonsdeler av betong vil strekksonen risse opp når de opptredende spenningene i strekksonen overskrider betongens lave strekkkapasitet. Vann trekker inn i rissene og fører sådan med seg stoffer som kan skade konstruksjonen. Spesielt utsatt er stålarmring, som også eksponeres til en viss grad med riss, noe som øker faren for rustdannelse. Rissviddebegrensning bestemmes ofte på bakgrunn av eksponeringsklasse hvor konstruksjoner i mer eksponerte miljø krever små rissvidder for å redusere miljøets innvirkning på konstruksjonens tilstand [60].

Grunnet FRP-armerings gode korrosjonsmotstand begrenser problematikken rundt armerings bestandighet seg. Likevel kan krav til maksimal rissvidde settes med bakgrunn i estetikk, krypbrudd eller skjærkapasitet.

Den amerikanske standarden presenterer ikke krav til rissvidde spesielt for FRP-armerte konstruksjonsdeler, men viser heller til andre standarder for FRP-armering, blant annet fra Canada og Japan. Disse har rissviddekrav i størrelsesorden med dem man finner i den amerikanske standarden for vanlig stålarmert betong, nemlig 0,018 - 0,022 tommer, eller 0,46 - 0,56 mm [6]. I våre beregninger vil vi ta utgangspunkt i 0,5 mm som krav.

Det finnes hovedsakelig to metoder for å påvise om ønskede rissvidder er tilfredstilt;

1. Metode hvor rissviddebredde regnes ut direkte.
2. Indirekte metode hvor maksimal armeringsavstand og spenning for å ivareta rissviddekrav bestemmes.

ACI 440.1R-15 henviser til den vanlige standarden for stålarmerte betongkonstruksjoner, *ACI 318-99*, når det kommer til riss. Grunnet skepsis til tilstrekkeligheten av den empirisk utviklede direkte metoden fra Gergely og Lutz [61], bruker ACI-standardene en indirekte metode - basert på Froschs teoretiske modell fra 1999 - for å begrense rissvidder [62]. Denne fremgangsmåten gir oss maksimal innbyrdes avstand mellom FRP-armeringen som sikrer ønsket reduksjon av rissvidder.

$$s_{max} = 1,15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2,5 c_c \leq 0,92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \quad (4.3-20)$$

s_{max} : Største tillatte innbyrdes avstand (c/c) for å ivareta rissviddekrav (mm).

w : Maksimal rissvidde (mm).

f_{fs} : Bruksspenninger i FRP – armering (Mpa).

k_b : Heftkoeffisient

c_c : Overdekningstykkelse (mm).

k_b er en koeffisient som tar høyde for heftforbindelsen mellom armeringen og den omsluttende betongen. Armeringsprodukter av FRP med tilsvarende heftegenskaper som stålarmering vil ha en heftkoeffisient på 1,0. Bedre heftegenskaper enn stål korresponderer til lavere verdier og vis-a-versa. Denne faktoren vil altså variere fra produkt til produkt, og tester av forskjellige produsenter, tverrsnitt, fibertyper, resiner og overflatebehandlinger gjennomført av C. E. Bakis et al. fra 2006 [63] viser variasjoner av k_b på mellom 0,60 og 1,72, med gjennomsnittsverdi på 1,10. Om heftkoeffisient

tilhørende valgt armeringsprodukt ikke kan dokumenteres av produsenten bør en konservativ verdi på 1,4 nyttes ifølge den amerikanske standarden. Glatte produkter, altså armeringsprodukter som ikke er designet spesielt for heft med kammer eller annen heftgunstig struktur, ekskluderes fra denne anbefalingen.

Opptredende armeringsspenninger under bruk, f_{fs} , beregnes som presentert under beregninger av nedbøying, nemlig ved å betrakte et opprisset tverrsnitt med trykksonespenninger innenfor lineærelastisk område. Lastene som legges til grunn for beregning av armeringsspenninger baserer seg på *NS-EN 1991-1-1* [53]. Hvilke laster som legges til grunn med bakgrunn i eksponeringsklasse fra *Tabell NA.7.1N*. Følgende skal det her brukes faktor for "ofte forekommende" laster, ψ_1 , for særlig utsatte konstruksjoner med stålarmering, men grunnet FRP-armeringens gode korrosjonsmotstand brukes i denne oppgaven laster som "tilnærmet permanent", ψ_2 , etter rådføring med veileder i Sweco. Lastene som legges til grunn med bakgrunn i *Tabell NA.A2.1 - Verdier av ψ -faktorer for vegbruer* for utregning av f_{fs} er altså;

- Egenlast (G) (ufaktorisert)
- Trafikklast, jevnt fordelt (Q) * ($\psi_2 = 0,5$ for FRP, $\psi_1 = 0,7$ for stål)
- Trafikklast, hjullast (P) * ($\psi_2 = 0,5$ for FRP, $\psi_1 = 0,7$ for stål)

ψ : Faktor som definerer representative verdier av variable påvirkninger

ψ_1 : For ofte forekommende verdier

ψ_2 : For tilnærmet permanente verdier

Som supplement til formelen for beregning av maksimal innbyrdes senteravstand har vi også maksimal avstand fra senter av nedre armering til underkant av bjelken, d_c . Denne tar høyde for at rissbredden vil være mindre i høyde med armeringen enn ved ekstrem tøyingsfiber i bunn av tverrsnittet.

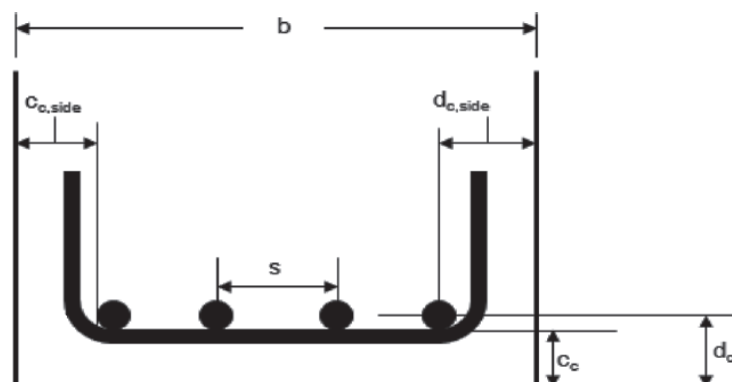
Kravet er at;

$$d_c \leq \frac{E_f W}{2 f_{fs} \beta k_b} \quad (4.3-21)$$

der;

$$\beta = \frac{h - \alpha d}{d - \alpha d} \quad (4.3-22)$$

β : Forhold mellom avstand fra nøytralakse til mest påkjente strekkfiber og avstand fra nøytralaksen til senter av strekkarmering



Figur 4.3-7: Geometriske parametere for rissviddeberegning. Kilde: ACI

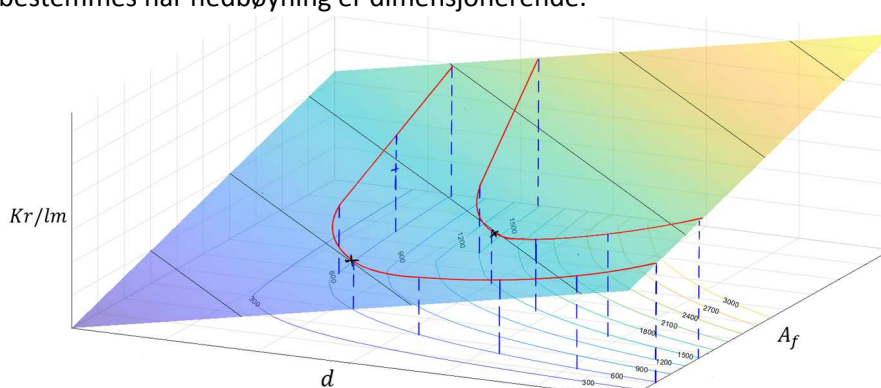
Om krav til stor overdekning eller små riss vanskeliggjør å imøtekomme kravene må dette løses ved å redusere armeringspenningene, typisk ved å legge inn større mengde armering.

En viktig ting å notere seg med hensyn til riss er forskjellige FRP-armeringers utvikling av egenskaper over tid. Uten å ta stilling til dette nevner *ACI 440.1R-15* Bakis og Boothbys forskning fra 2004 [64], som tar for seg utviklingen av rissvidder i GFRP-armerte betongbjelker under belastning over tid. Resultatene viste at opprinnelige rissvidder økte med omlag 40 og 60 prosent - for henholdsvis innendørs og utendørs klima - i løpet av en periode på 3 år. Dette kan være avgjørende for om bruken av slik armering i det heletatt er aktuell for konstruksjoner hvor det stilles spesielle krav til rissvidder i løpet av konstruksjonens levetid.

4.3.5 Prisoptimalisering av FRP-armerte tverrsnitt

Med den høye initiale kostnaden, mangel på erfaring, standarder og veiledere kan den fremtidige bruken av FRP-armering - som et godt alternativ til stål - være noe sen i sin utvikling. For at FRP-armering skal kunne være et godt alternativ til stål er en god forståelse over de økonomiske aspektene ved å benytte FRP-armering nødvendig. Prisoptimalisering av tverrsnitt, og et analytisk verktøy for dette presenteres derfor videre.

Ved å optimalisere funksjonen for momentkapasitet og for pris pr. meter av et tverrsnitt - med hensyn til både armeringsmengde (A_f) og effektiv tverrsnittshøyde (d) - kan en med dette verktøyet finne den mest økonomisk lønnsomme kombinasjonen av A_f og d , for en ønskelig momentkapasitet. Ved å approksimere en funksjon for prisen for de ulike tverrsnittene og utføre en Lagrange-optimalisering [65], med ønskelig momentkapasitet som bibetingelse, kan den laveste materialkostnaden for en bestemt momentkapasitet oppnås. Ved å repetere dette for alle mulige kombinasjoner av ønsket momentkapasitet fås en linje som viser mest prisgunstige kombinasjoner av A_f og d . Ved å velge sammensetninger på denne linjen oppnår man det billigste tverrsnittet for ønsket momentkapasitet. For at tverrsnittene også skal være tilfredsstillt for bruksgrense må en funksjon for nedbøyning også fremstilles. Ved å gjøre den samme Lagrange-optimaliseringen for pris, med en aktuell nedbøyningsgrense som bibetingelse, kan A_f , d -paret som gir det mest økonomisk gunstige tverrsnittet bestemmes når nedbøyning er dimensjonerende.



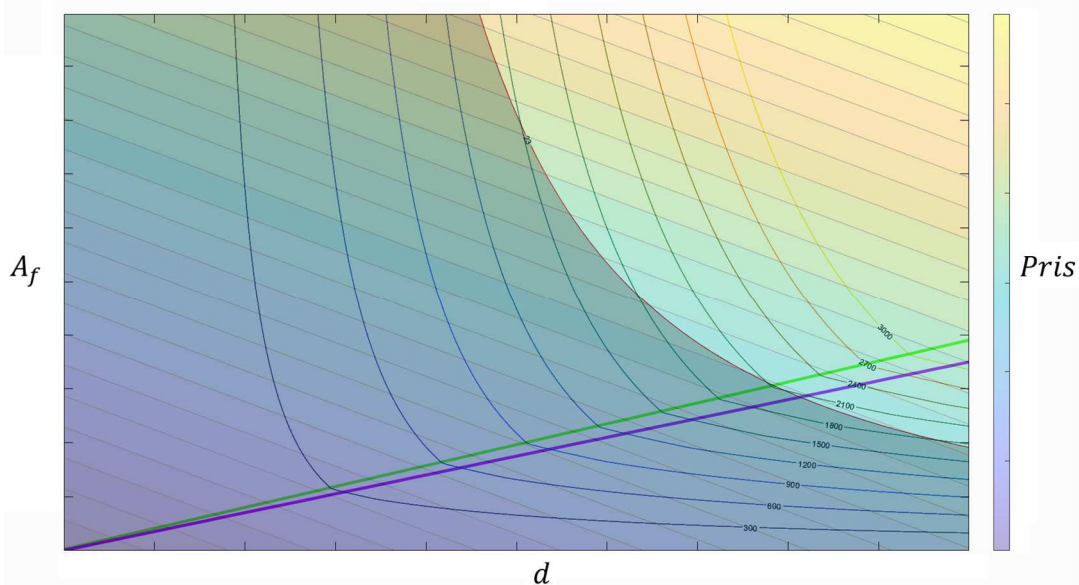
Figur 4.3-8: Fremstilling av Lagrange-optimalisering.

De røde linjene er eksempler på kotelinjer fra momentfunksjonen. Disse er projisert på prisplanet for et valgt FRP-produkt og fungerer som bibetingelse i Lagrange-optimaliseringen. Ved å følge den røde stien til det laveste punktet på prisplanet får man den billigste kombinasjonen av armeringsmengde og tverrsnittshøyde, for en valgt momentkapasitet.

De ulike dimensjoneringskravene gir rette linjer med ulik stigning. Linjen som representerer det dimensjonerende kriteriet må derfor benyttes, slik at tverrsnittet er tilfredsstillende for både moment og nedbøyning. Ved å fjerne det området som ikke tilfredsstiller nedbøyningskravet, oppnås et prisgunstighetspunkt der nedbøyning blir dimensjonerende.

Denne metoden kan brukes til å fremstille et nyttig design- og analyseverktøy som gjør det enklere å approksimere det økonomisk lønnsomme forholdet mellom FRP-armering og betongtverrsnittets geometri, for en ønskelig momentkapasitet eller nedbøyning.

For å utføre optimaliseringen har et MATLAB-skript blitt utarbeidet. Skriptet finnes i vedlegg H, og benytter seg av Lagrange-multiplikator. Ved å se på prikkproduktet mellom det normaliserte gradientfeltet til funksjonen for momentkapasitet og for pris, kan et prisoptimalt område for moment oppnås der prikkproduktet har verdien 1 [65]. Det samme kan gjøres for nedbøyning. En grafisk fremstilling av dette er vist i Figur 4.3-9.



Figur 4.3-9: Prisoptimaliseringsverktøy for BFRP.

Grønn linje representerer optimale kombinasjoner for momentkapasitet, lilla linje representerer optimale kombinasjoner for nedbøyning. Mørkt område viser kombinasjoner av A_f , d som ikke er tilfredsstillende for nedbøyning, ved et spenn på 8 m, med krav til største nedbøyning på $L/350$.

Ved å legge inn parametere knyttet til dimensjoneringsmodell, tverrsnitt, materialer, laster og statisk system får man ved å kjøre skriptet frem en grafisk og oversiktlig fremstilling. Verktøyet gjør det raskt og enkelt å se på ulike alternativer til tverrsnitt. I en tidlig fase av et prosjekt, hvor ting ofte endrer seg, gjør dette verktøyet at man senere unngår tidkrevende omregninger. Ulike kombinasjoner av armeringsmengde og geometri kan enkelt testes.

Skriptet kan også implimenteres for bruk til parametrisk design [66]. Ved å la skriptet fungere som et sett med regler, kan en påse at tverrsnittet alltid har tilfredsstillende kapasitet og befinner seg i et prisgunstig område. Dette ses ikke nærmere på, men kan være et interessant felt for videre forskning. Vedlegg H viser også skriptets resultater for parametere tilknyttet forutsetningene i vår case. Ved bruk av Data Cursor i MATLAB kan verdier enkelt og raskt hentes ut.

5 Resultat og diskusjon

5.1 Dimensjonering, del 1 – generell analyse

Det mest interessante i denne delen av oppgaven er å få generell forståelse over hvordan de ulike parameterne prosjekterende ingeniør kan påvirke spiller inn på momentkapasitet og nedbøying. Siden momentkapasiteten til en bjelke er avhengig av tverrsnittets design alene, blir dette det mest generelle å betrakte. Ved å ta for seg et valgt spenn og lasttilfelle kan man likevel gjøre observasjoner av hvordan parameterne påvirker nedbøyingen, men de kvantitative resultatene blir mindre generelle siden disse knyttes opp mot spesielle forutsetninger.

Det er gjennomført to analyser av hvert konstruksjonselement – en med låst tverrsnitt og en med låst armeringsmengde. Begge er gjennomført for både stål og FRP-armerte tverrsnitt. Økonomisk betydning blir nærmere beskrevet i 5.2 *Prisoptimalisering av tverrsnitt*. For utregninger refereres det til vedlegg C-I.

Denne fremstillingen gir oss et bilde på hvordan nødvendig armeringsmengde påvirkes av armeringstypen. Dette er teoretiske tilfeller hvor tverrsnittene som fremkommer ikke nødvendigvis er mulig å realisere i praksis. Krav til riss er vedlagt i utregningene, men er derfor av liten verdi. Blant annet vil flere av resultatene man får ved å se på låste tverrsnitt ha armeringsmengder som ikke er mulig å få plass til uten å bryte med krav til minimum innbyrdes avstand.

Det er tatt utgangspunkt i et 400 mm bredt tverrsnitt. Denne bredden er alltid låst, slik at det kun er høyden som varierer. Høyden av ståltverrsnittet, samt nødvendig armeringsmengde bestemmes ved vanlig dimensjonering etter EC2 [7].

5.1.1 Rektangulær bjelke

Tabell 5.1-1: Rektangulær bjelke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
$A_{s,f}$ (mm ²)	4 418	21 598	8 345	15 708	22 580	Låst tverrsnitt
$A_{s,f}/A_s$	1,00	4,89	1,89	3,56	5,11	
Brudmekanisme	-	Betongknusing				
δ (mm)	23	21	20	20	21	
d (mm)	720	979	792	902	989	Låst armering
$d_{s,f}/d_s$	1,00	1,36	1,10	1,25	1,37	
Brudmekanisme	-	Betongknusing				
δ (mm)	23	39	26	34	39	
d_δ (mm)	720	1 284	841	1 097	1 311	
$d_{s,f,\delta}/d_{s,\delta}$	1,00	1,78	1,17	1,52	1,82	
Riss	OK	OK	OK	OK	OK	

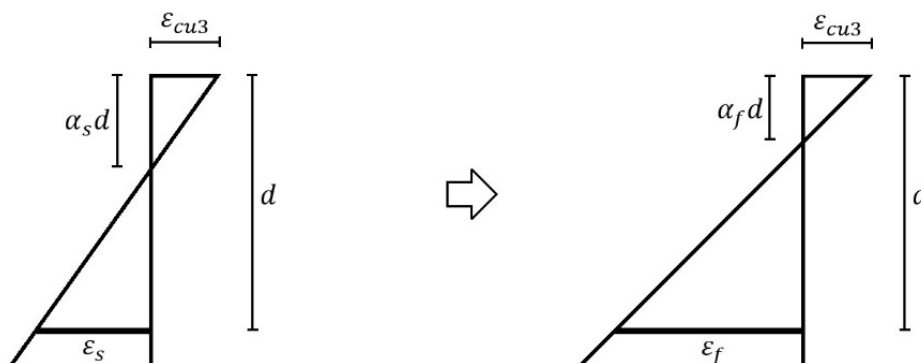
Tabell 5.1-1 viser nødvendige armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder. Nødvendige verdier for momentkapasitet vises, samt også for nedbøyning hvor de momentdimensjonerte tverrsnittene ikke tilfredsstillt dette.

Låst tverrsnitt - armeringsmengde varierer

Tabell 5.1-2: Sammenheng mellom armerings E-modul og nødvendig mengde armering relativt til stål.

Materiale	$E_s/E_{s,f}$	$A_{s,f}/A_s$
Stål	1,00	1,00
CFRP	1,61	1,89
AFRP	3,08	3,56
GFRP	4,35	4,89
BFRP	4,55	5,11

Ved å utelukkende variere armeringsmengden for å tilfredsstille momentkapasitet og nedbøyning, ser vi hvordan nødvendig areal korresponderer med E-modulen til de respektive armeringstypene. For alle disse tilfellene er momentkapasitet dimensjonerende og at bruddmekanismen skjer ved betongknusing. Forklaringen på dette finner vi ved å se på hvordan tøyingsbildet under momentpåkjøring varierer for armeringstyper med ulik E-modul.



Figur 5.1-1: Trykksonehøydens reduksjon ved bruk av armering med høyere bruddtøyning og lavere E-modul, når bruddmekanismen er betongknusing.

Lavere E-modul fører til større tøyninger for et bestemt spenningsnivå. Betongen er den begrensende faktoren, og siden dens egenskaper er like for alle tverrsnittstilfellene, vil tøyningene i betongen ved brudd alltid være ε_{cu3} . Det som av betydning varierer fra tverrsnitt til tverrsnitt er armerings E-modul, derav tøyningene. Resultatet av de store armeringstøyningene er at nøytralaksens plassering i tverrsnittet får en høyere plassering - derav reduseres tverrsnittets fungerende trykksonehøyde. Konsekvensen er at armeringsmengden må økes for å tilfredsstille kravene til trykksonekapasitet. Derav blir utnyttelsen av armerings kapasitet for strekkspenninger svært lav, med en utnyttelsesgrad på mellom 28 – 65 % ved betongknusing for de forskjellige FRP-armerte tverrsnittene. Ser vi på forholdet mellom bruddstyrke og momentkapasitet til de forskjellige tverrsnittene ser man også at en sammenheng er fraværende.

I brosjyrer og innsalg fra produsenter av FRP-armering heves FRP-armerings høye bruddstyrke frem som en faktor som tilsynelatende gjør det mulig å redusere armeringsmengden i konstruksjoner betraktelig. Resultatene fra denne oppgaven viser at det motsatte blir tilfelle for det låste rektangulære momentpåkjente tverrsnittet, grunnet produktens lave E-modul.

Låst armeringsmengde - effektiv tverrsnittshøyde varierer

Tabell 5.1-3: Sammenheng mellom armeringens E-modul og nødvendig effektiv trykksonehøyde.

Materiale	$E_s/E_{s,f}$	$d_{s,f}/d_s$
Stål	1,00	1,00
CFRP	1,61	1,10
AFRP	3,08	1,25
GFRP	4,35	1,36
BFRP	4,55	1,37

En annen måte å tilfredsstillere momentkapasiteten er ved å låse armeringsmengden, og heller variere den effektive tverrsnittshøyden, d . Resultatene viser, som for låst tverrsnitt, at det er E-modulen som spiller en rolle. Dette fordi også i disse situasjonene er betongknusing bruddmekanisme.

FRP-produsenter lokker ofte med at konstruksjoner med bruk av FRP-armering krever mindre betong fordi overdekning kan reduseres. For momentpåkjennte tverrsnitt viser det seg likevel at tverrsnittets høyde må økes betraktelig - noe som fører til at det totale betongvolumet i mange tilfeller sannsynligvis vil måtte økes for å ivareta krav til momentkapasitet.

Nedbøyning

De FRP-armerte bjelkene med låst armeringsmengde som er dimensjonert for å tilfredsstillere moment, tilfredsstiller ikke kravene til nedbøyning (se Tabell 5.1-1). For å i tillegg ivareta nedbøyingskrav må altså den effektive tverrsnittshøyden, og sådan også betongvolumet, økes ytterligere. Dette til tross for at den valgte casen har et spenn på beskjedne 8 meter. Ved momentpåkjennte bjelker vil man altså i mange tilfeller ikke få redusert det totale betongvolumet, tross reduksjon av overdekningstykkelse.

Selv om det ikke blir tatt høyde for i utregningene er vanlig prosedyre for bruer å kompensere for nedbøyninger ved å støpe med overhøyde som nøytraliseres under konstruksjonens egenvekt. Utenom konstruksjonens laster, spenn og opplagerbetingelser, er det altså tverrsnittets stivhet, EI , som spiller inn på bjelkens nedbøyning.

Studerer man hvilke parametere som har innvirkning på stivheten ved å plukke fra hverandre det virkende arealmomentet [vedlegg D], som i utregningene finnes ved I_{EKV} , er det vanskelig å finne klare sammenhenger. De fleste parameterne inngår på forskjellige plasser i regnestykket ved å noen ganger bidra positivt og andre ganger bidra negativt til stivhet. Fra formlene kan det tilsynelatende se ut som at den effektive tverrsnittshøyden skal ha mye å si for stivhet, men resultatene viser ingen klar sammenheng.

Som prosjekterende er det altså vanskelig å effektivt endre på ting ved tverrsnittet for at en konstruksjonsdel skal ivareta krav til nedbøyning. Slik aktualiseres verktøyet som presentert under *4.3.5 Prisoptimalisering av FRP-armerte tverrsnitt*.

5.1.2 T-bjelke

Disse tverrsnittene er betraktet som singulære frittspennende elementer. Resultatene presentert i tabellen under gir en klar indikasjon på at trykksoneproblematikken som oppsto i de rektangulære tverrsnittene, nå er løst. Dette ser vi ved at behovet for strekkarmering for kompensasjon av trykksonen er langt mindre enn for de rektangulære tverrsnittene. Det en dog merker seg er at nedbøyning nå blir et problem. For de presenterte T-tverrsnittene vil nedbøyning, bruksgrensetilstand, være dimensjonerende både for elementer med låst tverrsnitt og låst armering.

Tabell 5.1-4: T-bjelke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
$A_{s,f}$ (mm ²)	4 418	5 399	1 963	2 945	3 436	Låst tverrsnitt
$A_{s,f}/A_s$	1,00	1,22	0,44	0,67	0,78	
Brudmekanisme	-	FRP-Brudd				
δ (mm)	16,3	48,7	49,6	61,8	76,8	
$A_{s,f,\delta}$ (mm ²)	4 418	12 763	4 909	9 327	13 254	
$A_{s,f,\delta}/A_{s,\delta}$	1,00	2,89	1,11	2,11	3,00	
d (mm)	720	908	486	566	626	Låst armering
$d_{s,f}/d_s$	1,00	1,26	0,68	0,79	0,87	
Brudmekanisme	-	FRP-Brudd	Betongknusing			
δ (mm)	16,3	37,5	53,3	68,7	80,0	
d_δ (mm)	720	1 179	738	993	1 205	
$d_{s,f,\delta}/d_{s,\delta}$	1,00	1,64	1,02	1,38	1,67	
Riss	OK	OK	OK	OK	OK	

For låst tverrsnitt er det kun bruken av GFRP som krever en økning i armeringsmengde – 22% i forhold til stål – for å sikre statisk nødvendig momentkapasitet. De øvrige FRP-produktene krever mindre armeringsareal enn stål. Brudmekanismen er FRP-brudd, noe som betyr store armeringstøyninger og dermed betydelig nedbøyning. Det er kun det stålarmede tverrsnittet som tilfredsstillt kravet på 23 mm. Faktoren $A_{s,f,\delta}/A_{s,\delta}$ tilsier at BFRP må økes så mye som tre ganger i forhold til stål. Selv om dette er en drastisk økning er det langt mindre enn hva BFRP måtte økes med i et låst, rektangulært tverrsnitt.

For tverrsnitt med låst armering er det igjen kun bruken av GFRP som krever en økning i effektiv tverrsnittshøyde – 26% i forhold til stål - for å sikre statisk nødvendig momentkapasitet. De øvrige FRP-armeringene krever mindre d enn stål. Det er i likhet med tidligere resultater fortsatt nedbøyningen som blir dimensjonerende. Størst økning i d_δ er igjen for BFRP – 67%. Fortsatt noe mindre enn nødvendig økning for BFRP-armert, rektangulært tverrsnitt – 82%.

Da det både for låst tverrsnitt og låst armering er nedbøyning som blir dimensjonerende ser vi nå nærmere på hvorfor dette er tilfellet. Tverrsnittene er, som nevnt, dimensjonert som singulære, frittspennende elementer. Det vil si at spenninger fordeles slik man er vant med - kun innenfor tverrsnittets rand. Dette er dog ikke realiteten da den konvensjonelle fremgangsmåten for støp av T-tverrsnitt i de fleste konstruksjoner er at flensene støpes inn i dekket, slik at det oppnås samvirke. I

praksis betyr det at spenningenes utbredelse vil kunne strekke seg utenfor det som brukes som effektiv flensrand.

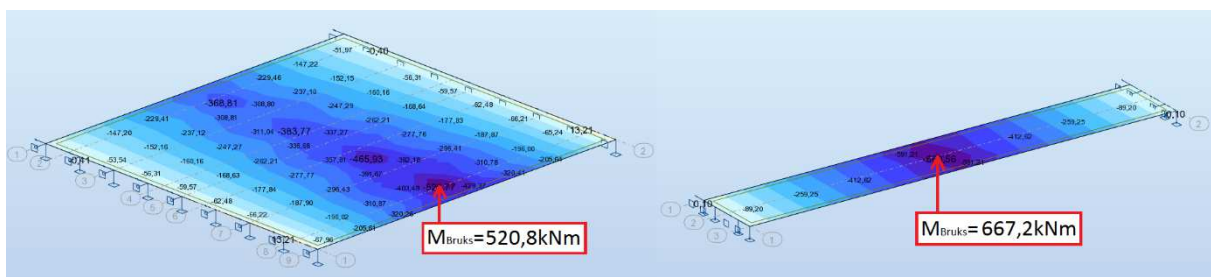
Å dimensjonere T-bjeltene som enkeltstående og ikke som deler av et ribbedekke er både svært konservativt og noe ukorrekt. Dette skyldes at bruksgrense er den dimensjonerende grensetilstanden og det er da ønskelig å undersøke hva som faktisk skjer. For å undersøke problematikken nærmere er det foreslått bruk av dimensjoneringsprogrammet Robot Structural Analysis, som på en god nok måte tar høyde for både samvirke og bedre momentfordeling. Dette gjøres kun for å sette lys på alternativ dimensjonering og det tas forbehold om at tidligere presentert metodikk og tilhørende resultater forblir gjeldende i denne oppgaven.

Det er laget to modeller, et ribbedekke og en frittstående T-bjelke. Begge er påført tidligere presenterte lastkombinasjon, bruksgrense. Den frittstående bjelken er den som står ytterst i dekkemodellen, altså under størst mulig belastning. Da Robot ikke tar høyde for redusert stivhet grunnet langtidseffekter har vi løst dette ved å redusere E-modulen til betongen som en virkning av redusert annet arealmoment grunnet riss og redusert E-modul over tid grunnet kryp. Denne analysen gjøres kun for GFRP-armert tværnsnitt og er nærmere presentert i vedlegg E. Resultatene fra Robot er konferert med veileder fra Sweco og det er tilnærmet like nedbøyningsresultater mellom håndberegninger og modell for singulær bjelke, med kun 12% avvik.

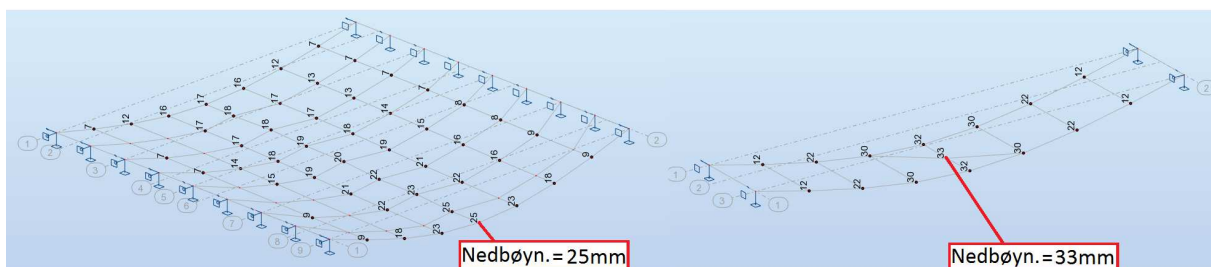
Tabell 5.1-5: Oppsummering av nedbøyningsresultater for GFRP-armerte T-bjelker.

	Nedbøyning (mm)	M_{bruks} (KNm)
Excel/Håndberegninger	37,5mm	764,4
Robot, singulær bjelke	33mm	667,2
Robot, ribbedekke	25mm	520,8

Det vi umiddelbart legger merke til i dekkemodellen er at ekstremalverdier for både moment og nedbøyning er sterkt redusert i forhold til verdiene i modellen for den frittstående bjelken.



Figur 5.1-2: Momentverdier, ribbedekke.



Figur 5.1-3: Nedbøyninger, ribbedekke.

Denne reduksjonen skyldes bedre momentfordeling, da spenningene nå har større utbredelse. På bakgrunn av disse resultatene er det grunnlag for å påstå at det, ved nærmere undersøkelser og ytterligere nøyaktighet i beregningene, kunne blitt ytterligere reduksjon av armeringsmengde og tverrsnittshøyde. Hovedgrunnen til dette er at nedbøyning ble dimensjonerende for samtlige T-bjelker.

5.1.3 Dekke

Alle tverrsnittene er dimensjonert for riss for både låst tverrsnitt og låst armeringsmengde. Belastningene er beregnet i robot og er modellert som et kontinuerlig dekke med linjeopplegg over bjelker. Dekket ses på som et enveisdekke da lengden i tverretning er mye mindre enn lengderetning. Stangdiameteren er satt til 20 mm slik at C_c settes til 45mm.

Tabell 5.1-6: Dekke - Relative armeringsmengder og effektive tverrsnittshøyder ved låst tverrsnitt og låst armeringsmengde.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
$A_{s,f}$ (mm ²)	1173	1153	402	708	940	Låst tverrsnitt
(CC)	(268)	(273)	(782)	(444)	(335)	
$A_{s,f}/A_s$	1,0	0,98	0,34	0,60	0,80	
δ (mm)	1,1	4,2	4,4	4,7	5,2	
$A_{s,f,\delta}$ (mm ²)	1173	1347	500	954	1409	
(CC)	(268)	(234)	(629)	(330)	(224)	
$A_{s,f,\delta}/A_{s,\delta}$	1,0	1,15	0,43	0,81	1,2	
Riss	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	
$A_{s,f,riss}$ (mm ²)	1266	1851	1002	1458	1935	
(CC)	(249)	(170)	(314)	(216)	(163)	
Bruddmekanisme	-	Overgang	Overgang	Betongknusing		
$A_{s,f,riss}/A_{s,riss}$	1,0	1,46	0,79	1,15	1,53	
$d_{s,f}$ (mm)	260	256	175	202	223	Låst armering
$d_{s,f}/d_s$	1,0	0,99	0,72	0,81	0,88	
δ (mm)	1,1	4,2	3,8	5,0	5,8	
d_δ (mm)	260	277	180	237	283	
$d_{s,f,\delta}/d_{s,\delta}$ (mm)	1,0	1,07	0,69	0,91	1,09	
Riss	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	Ikke OK	
d_{riss}	293	510	201	368	534	
Bruddmekanisme	-	FRP-brudd	Betongknusing	Overgang	FRP-brudd	
$d_{s,f,riss}/d_{s,riss}$	1,0	1,74	0,69	1,26	1,82	

Resultatene viser at både armeringsmengden og tverrsnittshøyden kan redusere og fortsatt ha tilfredsstillende momentkapasitet. Dekke har, på samme måte som T-tverrsnitt, en økt trykksone som medfører en bedre utnyttelse av armeringens høye bruddstyrke. Dette bidrar igjen til en reduksjon i armeringsmengden og tverrsnittshøyden. Sorterer man de ulike FRP-armerte tverrsnittene etter laves til høyest armeringsmengde for moment er den ekvivalent med en sortering fra høyest til lavest bruddstyrke. Dette kan ses i sammenheng med at alle befinner seg i regimet for FRP-brudd.

Tabell 5.1-7: Rangering av bruddstyrke og armeringsbehov ved låst tverrsnitt.

	Lav				Høy
Armeringsbehov for moment	CFRP	AFRP	BFRP	GFRP	STÅL
Bruddstyrke	STÅL	GFRP	BFRP	AFRP	CFRP

Det er bruksgrense som blir dimensjonerende for tverrsnittene og det kreves en stor økning av både A_f og d i forhold til det som er tilstrekkelig i bruddgrensetilstand. Nedbøyningene er beregnet med regneark som et fritt opplagt dekke med en bredde på 1 meter. Dette er svært konservativt og ved å se på dekket som kontinuerlig, med samvirke, vil nedbøyningene reduseres betydelig. I tillegg vil geometrien og opplagerbetingelsene også bidra til reduksjon av nedbøyningene. Ved å bytte ut et av endeoppleggene til en fastinnspenning reduseres nedbøyningene med opptil 40 %. Dette er i realiteten en mer korrekt fremstilling da dekket over støtte har en grad av innspenning grunnet dets kontinuitet. Dette kan gjøre at nedbøyningene reduseres og dermed også armeringsbehovet. Siden armeringsmengde for å tilfredsstille rissviddekravene er så mye større enn for nedbøyning, vil denne reduksjonen for nedbøyning være uten betydning.

Ved redusert nedbøyning vil også risvidden kunne reduseres. Dette betyr at risvidden ikke blir like kritisk som den er under gitte forutsetninger. Samtidig viser resultatene at riss er den dimensjonerende faktoren med stor margin. Samtlige tverrsnitt er dimensjonert for riss, noe som er å forvente for dekke. Kravet til maksimal senteravstand mellom stengene er det som gjør at armeringsmengden og tverrsnittshøyden i flere av tverrsnittene må dobles, sammenlignet med det som er statisk nødvendig.

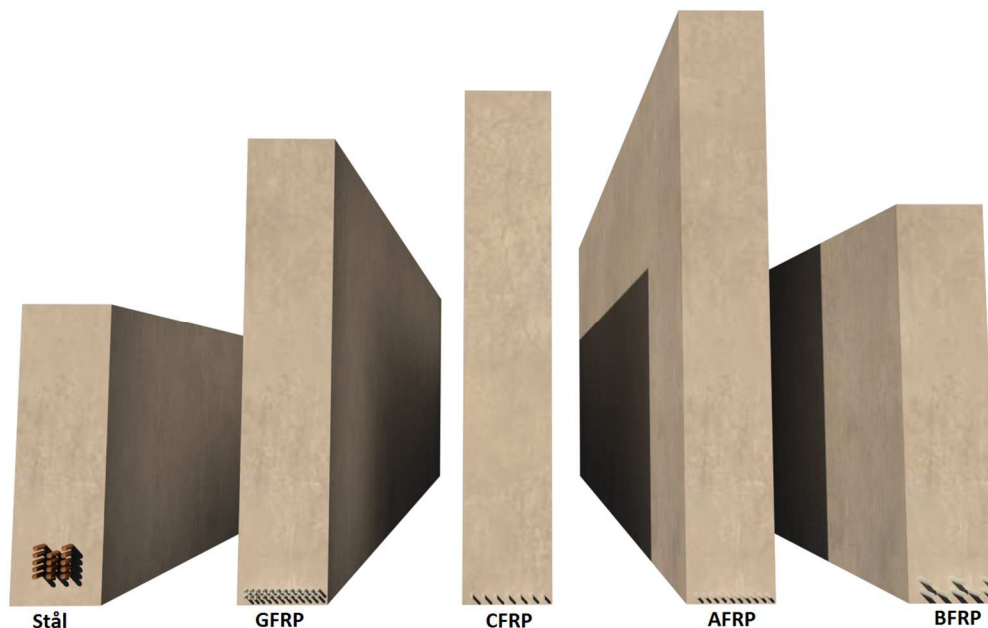
Generelt gir en utskifting av stål til FRP-armering en økning i både A_f og d for alle tverrsnitt, bortsett fra CFRP. Resultatene for CFRP viser at armeringsmengden kan reduseres med 21 % ved låst tverrsnitt, og effektiv tverrsnittshøyde kan reduseres med 31 % ved låst armeringsmengde. CFRP-dekket er det eneste konstruksjonselementet som gir en reduksjon i A_f og d i forhold til stål tverrsnittet. Dette kan skyldes den store kapasiteten til trykksone slik at armeringen blir maksimalt utnyttet, men også trykksoneens store bidrag til stivhet. Den store bredden gjør at trykksoneens bidrag til stivhet er stor, til tross for armeringens lave E-modul. Dette sikrer tilstrekkelig stivhet som gjør at bruksgrensetilstandene ikke blir like dominerende som ved bjelker. Dekket er også påkjent av betydelig lavere laster, som reduserer de negative virkningene FRP-armeringens lave E-modul har på tverrsnittets stivhet.

5.2 Prisoptimalisering av tverrsnitt

Resultatene fra den generelle analysen viser at utskifting fra stål til FRP-armering ikke nødvendigvis gir tilfredsstillende resultater uten videre. Det har på bakgrunn av dette blitt gjennomført en optimalisering av de FRP-armerte tverrsnittene, for å se om FRP-armering i det hele tatt kan være et reelt alternativ til stålarmering. Ut fra prisoptimaliseringen har følgende tverrsnitt blitt valgt som de mest optimale. Utregningene er utført i MATLAB [vedlegg H] og kontrollert i Excel [vedlegg I].

Tabell 5.2-1: Prisoptimale rektangulære-tverrsnitt.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
$A_{s,f}$ (mm ²)	4 398 (14Ø20)	1 807 (23Ø10)	549 (7Ø10)	785 (10Ø10)	2 513 (8Ø20)
$d_{s,f}$ (mm)	1 100	2 030	2 260	2 650	1 730
Brudmekanisme	Strekksone	FRP-brudd			Overgang
δ (mm)	9,6	23	23	23	23
Dimensjonerende grensetilstand	Riss	Nedbøyning			
Pris (Kr/lm)	1088	1 710	1 833	2 312	1 383
Spesifikk pris	1	1,57	1,68	2,13	1,27



Figur 5.2-1: Visuell fremstilling av prisoptimale tverrsnitt. Viser hvordan armeringsmengden og tverrsnittshøyden varierer for de ulike FRP-armeringene.

Samtlige FRP-armerte tverrsnitt er dimensjonert for nedbøyning og det er benyttet en stangdiameter på 10 mm for å tilfredsstille risviddekrav til GFRP, CFRP og AFRP. Dette gjør at d_c akkurat tilfredsstiller makskravet for den gitte FRP-armeringen. BFRP tilfredsstiller risviddekrav med stangdiameter på 20 mm.

Alle FRP-armerte tverrsnitt får reduksjon av armeringsmengde i forhold til stål. FRP-armeringens høye pris gjør at armeringsmengde spiller stor rolle på tverrsnittets totale pris, og lav armeringsmengde kan derfor assosieres med en lav totalpris. En rangering fra laves til høyest armeringsmengde mellom tverrsnittene er også tilsvarende med den relative prisen for de ulike armeringstypene. Selv om

armeringsmengden er betraktelig redusert for FRP har fortsatt totalprisen til tverrsnittet økt i forhold til ved bruk av stål. For videre reduksjon av prisen, må en bedring av produktegenskapene, eller en reduksjon i prisen for materialene finne sted. Økning av E-modul vil tillatte mindre armeringsmengde for å tilfredsstille nedbøyningskravet, og vil ytterligere redusere tverrsnittsprisen.

Ved å benytte lave armeringsmengder øker også spenningene i armeringen. Dermed har de fleste tverrsnittene FRP-brudd som bruddmekanisme, bortsatt fra BFRP som akkurat krysser grensen til overgangssonen. Dette sikrer også maksimal utnyttelse av FRP-armeringens høye strekkapasitet ved brudd av bjelke, men gjør tverrsnittene mer sårbare for riss grunnet den høye armeringsspenningen. Rissproblematikken reduseres for FRP-armerte tverrsnitt da det tillates relativt liten overdekning og at det ofte benyttes liten stangdiameter og flere stenger grunnet produksjonsmessige årsaker. Stenger med liten diameter i bunter ses derfor som mer hensiktsmessig når dette tillates med hensyn til riss. Stål har derimot store krav til overdekning for å hindre nedbrytning av materialet, og riss blir derfor ofte dimensjonerende. De strenge kravene til rissvidde gjør at d og A_s økes med henholdsvis 40 og 10 % i forhold til det optimale tverrsnittet dimensjonert for moment.

Det er også interessant å notere seg hvilke påvirkninger valg av armeringstype får for lastene som opplegg og søyler skal dimensjoneres for, da økning av tverrsnittshøyden har store utslag på bjelkens egenvekt. I tilfeller hvor egenvekt utgjør stor andel av det totale lasttilfellet kan dette være en faktor som må vurderes når det skal tas stilling til om FRP-armering er egnet for bruk i et spesifikt prosjekt.

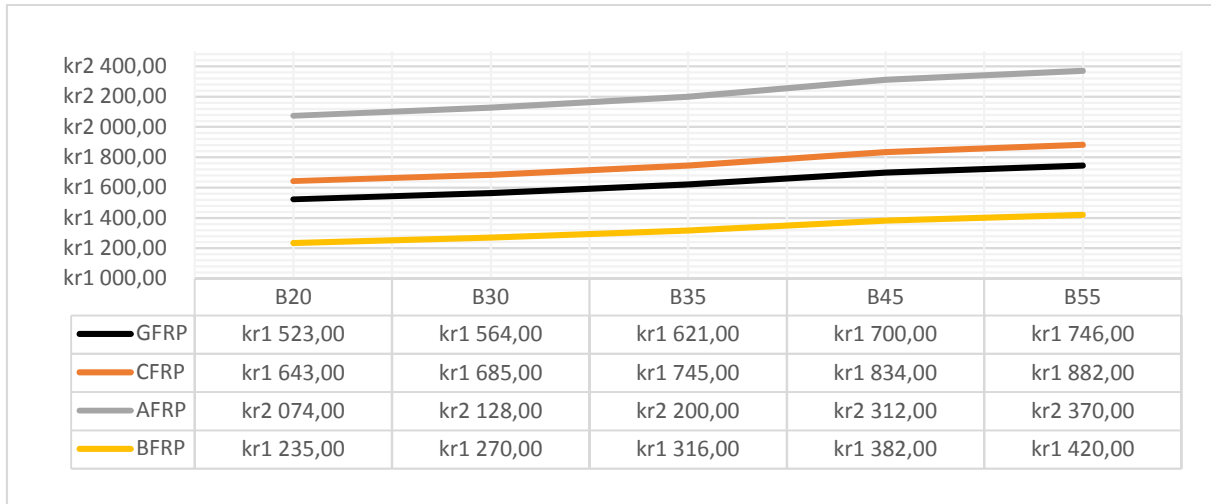
Tabell 5.2-2: Relativ egenvekt for prisoptimaliserte tverrsnitt.

	Stål	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
$G_{s,f}$	13,80	20,26	21,70	25,44	17,38
$G_{s,f}/G_s$	1,00	1,47	1,57	1,84	1,25

Den strenge reduksjonsfaktoren for duktilitet (ϕ) gjør også at tverrsnittene må kraftig overdimensjoneres for å ta hensyn til FRP-armeringens mangel på duktilitet. Ved moment som dimensjonerende faktor ville en mindre konservativ ϕ gjort tverrsnittene mer gunstige. Ved å sikre et duktilt brudd med andre metoder, innretninger eller produkter, kan en reduksjonsfaktor på 1,0 som for stål tillates. En alternativ dimensjonering med bakgrunn i dette finnes under kapittel 5.2 *Prisoptimalisering av tverrsnitt i designfilosofiens innvirkning på pris.*

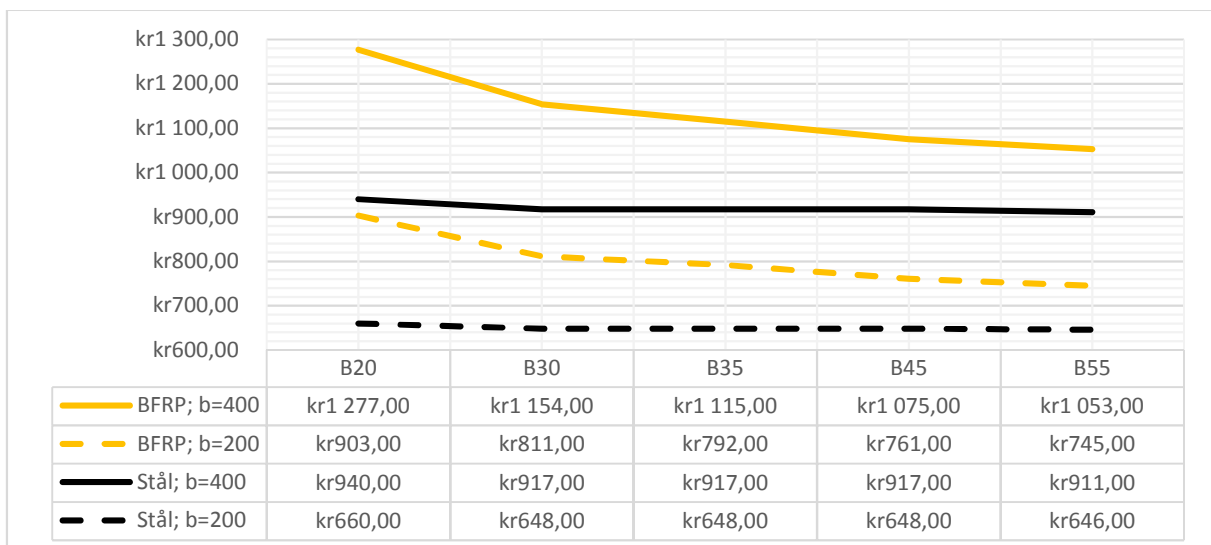
Betongkvalitetens innvirkning på pris.

Den høye prisen for de ulike FRP-armeringene gjør at mengden armering får større betydning for prisen til tverrsnittene, enn det vanlig stålarmering har. Dette gjør at tiltak for å redusere armeringsmengden kan ha utslag på tverrsnittsprisen.



Figur 5.2-2: Prisutvikling ved varierende betongkvalitet.

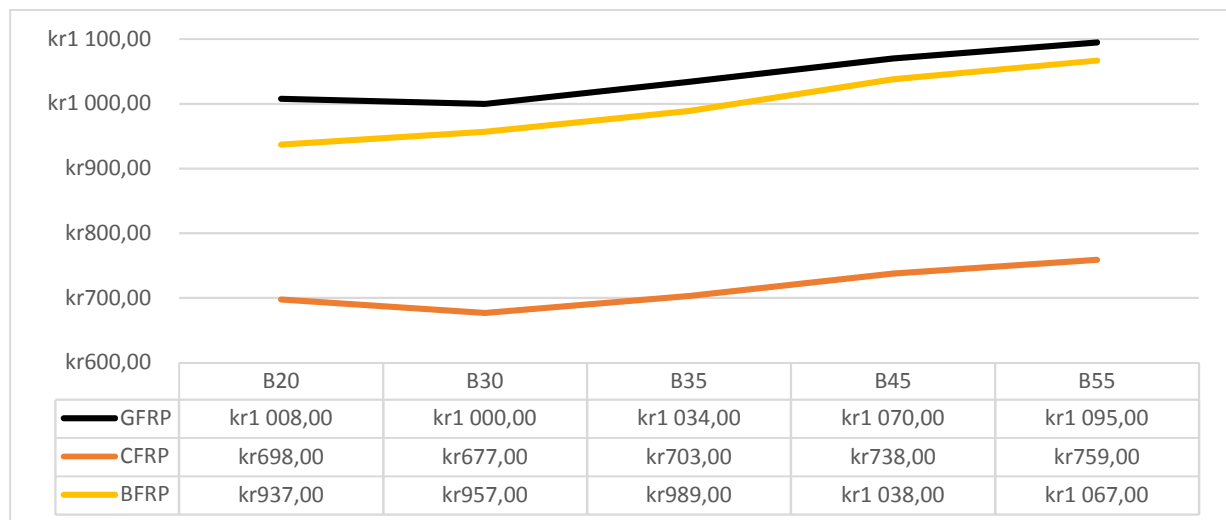
Ut fra resultatene ser vi at prisen øker ved økende betongkvalitet. Sammenhengen skyldes at alle tverrsnittene er styrt av FRP-brudd og er dimensjonert for nedbøyning. Den økte fastheten, som fører til økt trykksonekapasitet, fører ikke til økt momentkapasitet da det er armeringen som er det svake leddet. Dermed kan igjen ikke armeringsmengden reduseres og prisen vil heller øke da den økte betongkvaliteten fører til dyrere betong, som ikke utnyttes. Bedre betongkvalitet har høyere E-modul, noe som vil redusere nedbøyningene. Dette fører til et tverrsnitt med lavere armeringsmengde som fortsatt tilfredstiller nedbøyninger, men denne reduksjonen er ikke stort nok for å rettferdiggjøre den økte betongprisen. Resultatene viser at betongkvalitet B20 gir de billigste tverrsnittene. Ved å benytte B20 for de FRP-armerte tverrsnittene blir BFRP kun 14 % dyrere enn det stålarmede tverrsnittet med B45. Betongkvaliteten som benyttes i den stålarmede bjelken reduseres ikke grunnet ønsket om tett betong som beskytter armeringen bedre.



Figur 5.2-3: Prisutvikling for momentdimensjonerte tverrsnitt ved varierende betongkvalitet.

Hvis tverrsnittet derimot er dimensjonert for moment vil den økte betongkvaliteten føre til økt kapasitet og dermed en betydelig reduksjon i armeringsmengde. Ved å undersøke hvordan prisen varierer for et tverrsnitt dimensjonert for moment, ser vi fra resultatene i figur 5.2-3 at prisen avtar med økende betongkvalitet. Her kan den økte betongprisen rettfærdiggjøres ved reduksjon i armeringsmengde, slik at totalprisen til tverrsnittet avtar.

Det er verdt å bemerke seg at bjelken ved avtagende betongkvalitet går mot å bli dimensjonert for moment istedenfor nedbøyning. Fastheten avtar raskere enn E-modulen ved redusert betongkvalitet. Hvis reduksjonen av betongkvalitet derimot fører til et skifte av dimensjonerende kriterium, kan også dette føre til at prisen går over til å stige ved avtagende betongkvalitet. Det laveste punktet på prisgrafene oppnås ved overgangen fra nedbøyningskontrollert til momentkontrollert bjelke. Dette var tilfelle for både CFRP og GFRP med en bjelkebredde på 200 mm.

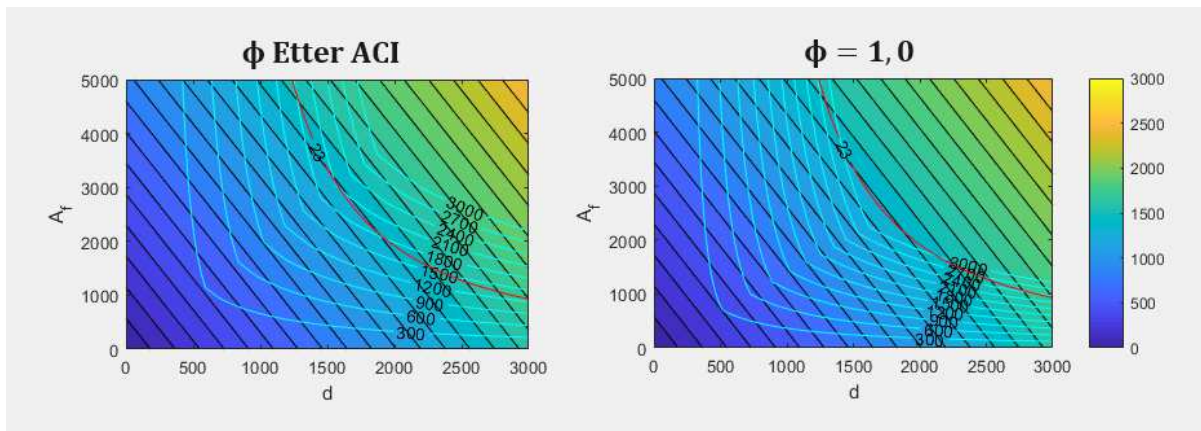


Figur 5.2-4: Prisutvikling med en bjelkebredde på 200mm ved varierende betongkvalitet. Knekkene på grafene indikerer et skifte av dimensjonerende kriterium. Tverrsnittene går fra å være dimensjonert for moment til å være dimensjonert for nedbøyning.

En bjelkebredde på 200 mm gir også en ytterligere reduksjon av prisen, men tas ikke med i betraktning da det er tatt utgangspunkt i en bjelkebredde på 400mm. Dette skyldes både estetiske hensyn og at faren for vipping av bjelken øker.

Designfilosofien innvirkning på pris.

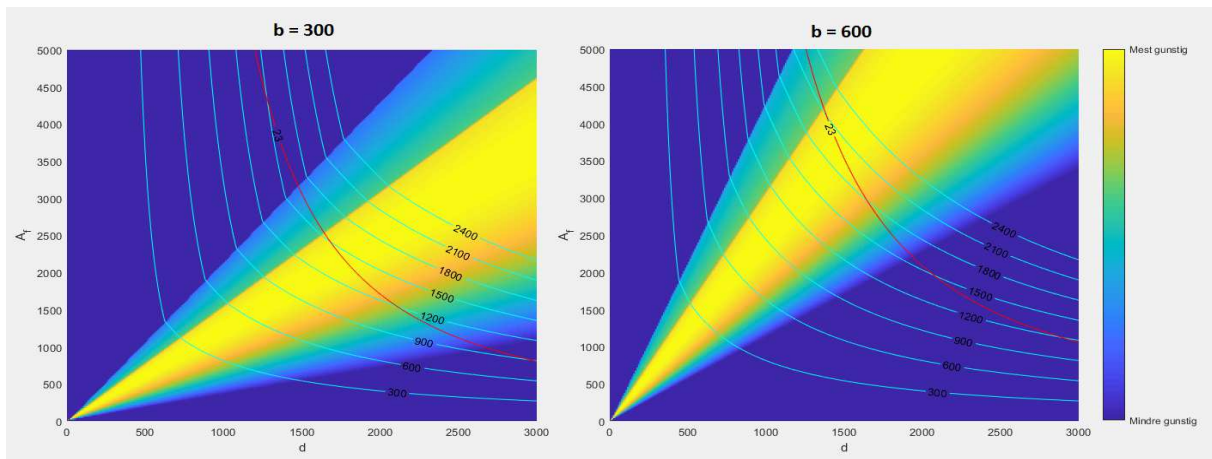
Ved å øke ϕ til 1,0 øker tverrsnittets momentkapasitet betraktelig. Dette gjør at armeringsmengden kan reduseres tilsvarende.



Figur 5.2-5: Reduksjonsfaktoren, ϕ , sin innvirkning på momentkapasitet.

Ved å se på optimalt tverrsnitt for en låst momentkapasitet kan prisen redusere med så mye som 23 % for BFRP, men kun beskjedne 6 % for CFRP. Økningen av ϕ viser derfor varierende påvirkning på pris. Da alle de optimale tverrsnittene er dimensjonert for nedbøyning vil en endring av ϕ -faktoren ikke gi noe utslag på tverrsnittsprisen. Som oftest er det nedbøyningene som blir den begrensende faktoren for FRP-armerte bjelker. En endring av designfilosofien, for å få mer prisgunstige tverrsnitt, ses derfor ikke på som hensiktsmessig under dagens forutsetninger. Hvis derimot materialegenskapene til FRP-armeringen bedres i fremtiden, slik at bruksgrense ikke blir like kritisk, bør en evaluering av designfilosofiens begrensning på pris tas stilling til.

Prisoptimalisering som en funksjon av bredden



Figur 5.2-6: Breddens innvirkning på stigningen av prisoptimal linje.

Som tidligere presenter i 4.3.5 *Prisoptimalisering av FRP-armerte tverrsnitt* oppnås det en linje der funksjonen – moment eller nedbøyning - er optimalisert for pris. Denne linjen kan representeres med en 1.ordens funksjon, der stigningstallet er gitt ved A_f/d . Ved å variere på bredden oppnås ulike stigningstall og en funksjon over det optimale forholdet ved ulike bredder oppnås. Metoden er presentert i *Vedlegg J* og følgende funksjoner oppnås:

$$\Lambda_{GFRP}(b) = 0,405b - 0,367 \quad (5.2-1)$$

$$\Lambda_{CFRP}(b) = 0,1213b - 0,1 \quad (5.2-2)$$

$$\Lambda_{AFRP}(b) = 0,1205b - 0,088 \quad (5.2-3)$$

$$\Lambda_{BFRP}(b) = 0,2408b \quad (5.2-4)$$

Λ_{FRP} : *Prisoptimalt forhold mellom armeringsmengde og effektiv trykksonehøyde*

Ved å knytte disse funksjonen opp mot *ACI 440.1R-15* sin filosofi - der et forhold mellom armeringsforholdet og det balanserte armeringsforholdet representeres - kan et tall representerer det prisoptimale forholdet for de ulike FRP-typerne.

Tabell 5.2-3: *Prisoptimale forholdstall for ulike FRP-typer.*

	ρ_f/ρ_{fb}
GFRP	0,784
CFRP	0,725
AFRP	0,457
BFRP	1,4

Dette gjør det enkelt å velge armeringsmengde og tverrsnittshøyde som gir et prisgunstig momentdimensjonert tverrsnitt. En mer utfyllende rapport om denne designmetoden er utarbeidet og sendt inn til den internasjonale betongkonferansen *SynerCrete'18 – Cost-optimal design of flexural concrete beam reinforced with FRP reinforcements*.

6 Konklusjon

Korrosjon av stålarmerede betongkonstruksjoner påfører samfunnet store kostnader. Det forskes mye på hvordan å oppnå mer levedyktige og bestandige konstruksjoner, og FRP-armering er ett av alternativene for «fremtidens betongkonstruksjoner». Denne oppgaven tar for seg bruken av FRP som slakkarmoring i momentpåkjennte konstruksjonselementer. Armeringstyper som har blitt betraktet er AFRP, BFRP, CFRP og GFRP. Oppgaven besvarer hvordan dimensjoneringsprosess, økonomi og geometri påvirkes, samt hvordan disse aspektene kan bedres.

Bruken av FRP-armering er nokså utbredt i Nord-Amerika - blant annet i brudekker - og får stadig større anerkjennelse i Europa. Begrensninger til videre utbredelse skyldes i hovedsak høy pris, mangel på standardisering og erfaring, samt relativt dårlige materialegenskaper som fører til store nedbøyninger. Grunnet FRP-armeringens lave E-modul må tverrsnittene ofte kompenseres med økt armeringsmengde og/eller tverrsnittshøyde, i forhold til stålarmerede tverrsnitt.

I motsetning til dimensjoneringsfilosofien for stålarmerede tverrsnitt, står man ved bruk av FRP-armering fritt til å velge bruddform grunnet dens mangel på duktilitet. Dette skaper et behov for optimalisering av forholdet mellom armeringsmengde og effektiv tverrsnittshøyde, for å oppnå et økonomisk gunstig tverrsnitt. For å gjøre denne prosessen enklere presenteres et optimalt forholdstall for de utvalgte FRP-typene ved dimensjonering for moment. I tillegg gjøres en optimalisering for nedbøyning av bjelken i oppgavens case, men vi ser et behov for å utarbeide mer generaliserbare metoder for å effektivisere dimensjoneringsprosessen, og slik gjøre FRP-armering til et mer konkurransedyktig alternativ.

Basert på prisoptimaliseringen viser bruk av BFRP beskjeden økning av materialkostnader i forhold til stål. Sett i sammenheng med reduserte vedlikeholdskostnader, kan konstruksjonens totale levetidskostnad potensielt reduseres. Det oppfordres derfor til videre forskning på vedlikeholdskostnader av FRP-armerte konstruksjoner.

For å fremme FRP-armering som byggemateriale kreves ytterligere forskning på produksjonsmetoder og materialsammensetninger som øker E-modulen til komposittarmeringen. Økning av E-modul muliggjør høyere utnyttelsesgrad av betongtrykksonens høyde, og dermed armeringens bruddstyrke. Vel etablerte metoder for teoretisk utregning av materialegenskaper indikerer at produktene på dagens marked har potensial for videre forbedring. I fremtiden kan dermed bruk av FRP-armering være en god løsning for å oppnå levedyktige og bestandige betongkonstruksjoner.

Kildeliste

- [1] *Excel*, Microsoft, 2016.
- [2] Autodesk, *Robot structural analysis professional*, Autodesk, 2018.
- [3] MathWorks, *MATLAB*, MathWorks, 2017.
- [4] International Federation for Structural Concrete (fib), "FRP reinforcement in RC structures," International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2007.
- [5] S. Nilsen, Ø. Engan, M. G. Norman og J. Braastad, «vg.no,» Verdens Gang AS, 13. November 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.vg.no/spesial/2017/de-forsomte-broene/alvorlige-skader/>. [Funnet 4. April 2018].
- [6] American Concrete Insitute, «ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars,» American Concrete Insitute, Farmington Hills, MI, 2015.
- [7] Standard Norge, «Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger,» Standard Norge, 2008.
- [8] J. V. Thue, «snl.no,» Store norske leksikon, 14 Februar 2009. [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/armeringsst%C3%A5l>. [Funnet 23 April 2018].
- [9] Nasjonal digital læringsdata, «ndla.no,» Nasjonal digital læringsdata, 28 August 2010. [Internett]. Tilgjengelig: <https://ndla.no/nb/node/60015?fag=35>. [Funnet 23 April 2018].
- [10] E. Juliebø, *Armeringsboka*, Oslo: Universitetsforlaget AS, 1997.
- [11] Den Store Danske, «denstoredanske.dk,» Gyldendal, 2 Juli 2017. [Internett]. Tilgjengelig: http://denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Teknik/Bygningsstatik,_teknisk_statik_og_styrkel%C3%A6re/materialeegenskaber. [Funnet 23 April 2018].
- [12] R. M. Gro Markeset, «Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art,» SINTEF Building and Infrastructure, Oslo, 2008.
- [13] M. Maage, *Betong - Regelverk, teknologi og utførelse*, Byggenæringens Forlag AS, 2015.
- [14] YtskyddsGruppen, «ysg.se,» YtskyddsGruppen, 2016. [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.ysg.se/betong/karbonatisering/>. [Funnet 23 April 2018].
- [15] B. -. B. Nord, «bonord.no,» BONORD - Boligbyggelaget Nord, [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.bonord.no/korrosjon-i-betongkonstruksjoner.4939050-169694.html>. [Funnet 23 April 2018].
- [16] Betongelementforeningen, «betongelement.no,» 20 Mars 2017. [Internett]. Tilgjengelig: https://www.betongelement.no/notfound?aspxerrorpath=/betongbok/BindD/Del_2/D10/10_1_Korrosjon_av_stal.pdf. [Funnet Mai 2017].
- [17] Motek AS, «motek.no,» [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.motek.no/mediabank/store/8329/Korrosjon-v01.pdf>. [Funnet 23 April 2018].
- [18] B. Pedersen, «snl.no,» Store Norske Leksikon, 9 Desember 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/komposittmaterialer>. [Funnet 23 April 2018].
- [19] Høgskolen i Narvik, «slideplayer.no,» [Internett]. Tilgjengelig: <http://slideplayer.no/slide/1911671>. [Funnet 23 April 2018].

- [20] NTB, «tu.no,» Teknisk Ukeblad, 5 Februar 2015. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.tu.no/artikler/norske-bruer-trenger-vedlikehold-for-opp-mot-19-milliarder/223077>. [Funnet 23 April 2018].
- [21] Structures, Smart, «YouTube,» Smart Structures, 7 Desember 2016. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.youtube.com/watch?v=GBRel7QBfTM>. [Funnet 23 April 2018].
- [22] T. Årtun, «SNL.no,» Store norske leksikon, 8 August 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/glassfiber#-Typer>. [Funnet 23 April 2018].
- [23] «Wikipedia,» 4 April 2016. [Internett]. Tilgjengelig: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber. [Funnet 7 April 2018].
- [24] Wikipedia, «Wikipedia.com,» Wikipedia, 22 Juli 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://no.wikipedia.org/wiki/Karbonfiber>. [Funnet 23 April 2018].
- [25] B. Pedersen, «snl.no,» Store Norske Leksikon, 20 Februar 2018. [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/anisotropi>. [Funnet 23 April 2018].
- [26] Yantai Qiubite Sports co, «qiubitesports.net,» Yantai Qiubite Sports co, 21 November 2016. [Internett]. Tilgjengelig: <http://no.qiubitesports.net/info/carbon-fiber-classification-2353592.html>. [Funnet 23 April 2018].
- [27] DuPont, «DuPont.com,» DuPont, [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.dupont.com/corporate-functions/our-company/dupont-history.html>. [Funnet 6 Mai 2018].
- [28] K. Hillermeier, «"Prospects of Aramid as a Substitute for Asbestos,» 1984.
- [29] Wikipedia, «Wikipedia,» 13 April 2018. [Internett]. Tilgjengelig: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aramid>. [Funnet 6 Mai 2018].
- [30] A. Ross, «Compositesworld.com,» CompositesWorld, 1 August 2006. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass>. [Funnet 23 April 2018].
- [31] J. Seehusen, «tu.no,» Teknisk Ukeblad Media AS, 14 Februar 2014. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.tu.no/artikler/na-brukes-grastein-som-betongarmering/226528>. [Funnet 23 April 2018].
- [32] M. Schulze, «VDI-nachrichten.com,» VDI nachrichten, 10 Januar 2014. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Basalt-unerschöpflich-unausgeschöpft>. [Funnet 23 April 2018].
- [33] Fibramax Ltd, «Aramid.eu,» Fibramax Ltd, [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.aramid.eu/manufacturing-methods.html>. [Funnet 23 April 2018].
- [34] Composites World, «compositesworld.com,» Composites World, 1 Januar 2014. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>. [Funnet 23 April 2018].
- [35] ZOLTEK Corporation, «zoltek.com,» ZOLTEK Corporation, [Internett]. Tilgjengelig: <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>. [Funnet 23 April 2018].
- [36] M. Schulze, «VDI-nachrichten.com,» VDI nachrichten, 10 Januar 2014. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Basalt-unerschöpflich-unausgeschöpft>. [Funnet 23 April 2018].
- [37] A. Nanni, «Flexural Behavior and Design of RC,» 1993.

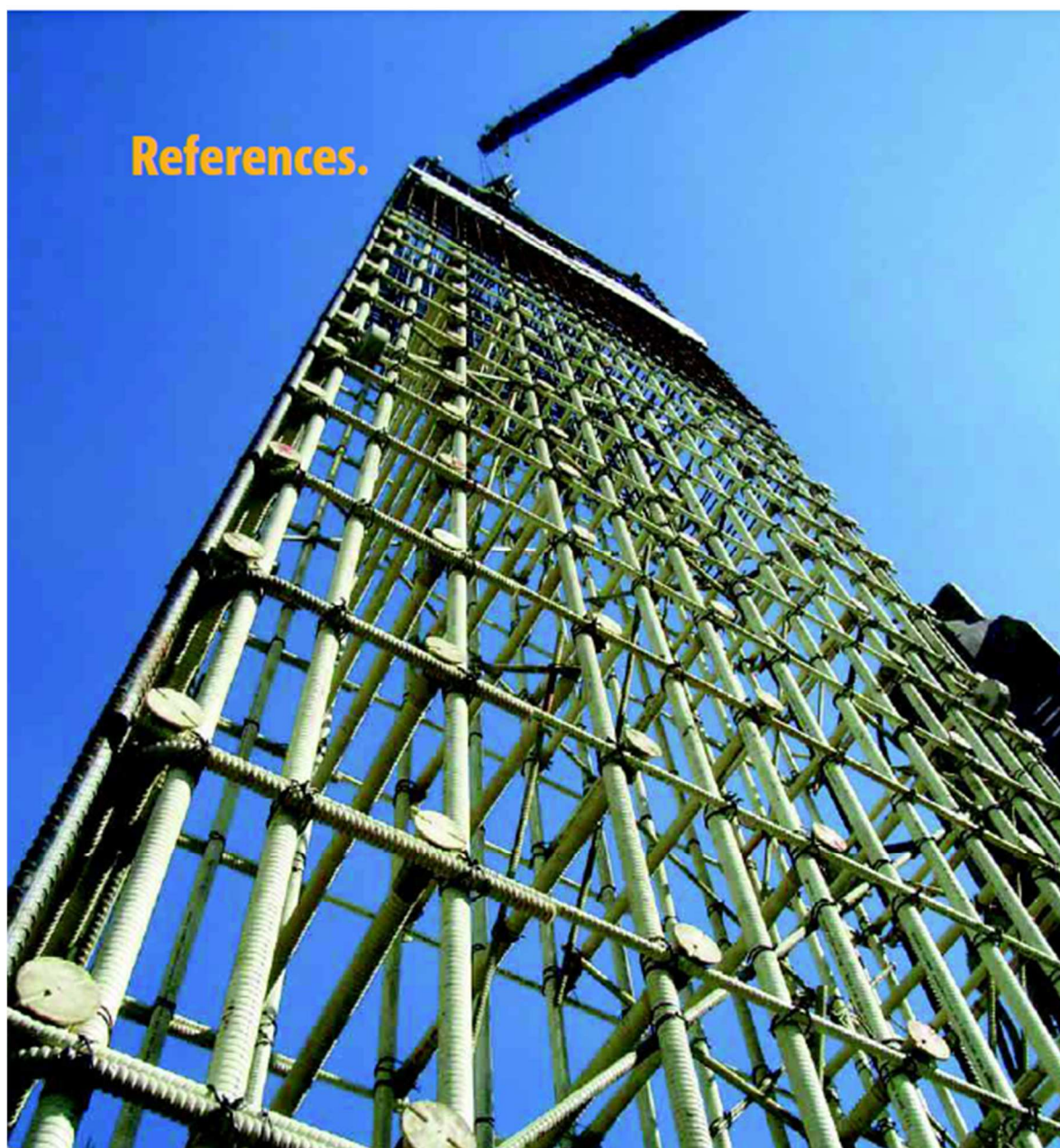
- [38] O. I. Isaac M. Daniel, «Scribd.com,» [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.scribd.com/document/126493303/45677573-Engineering-Mechanics-of-Composite-Materials-I-Daniel-O-Isha>. [Funnet 23 April 2018].
- [39] A. Almar-Næss, «snl.no,» Store Norske Leksikon, 15 Februar 2009. [Internett]. Tilgjengelig: https://snl.no/utmatting_-_teknikk. [Funnet 23 April 2018].
- [40] H. Saadatmanesh og F. Tannous, «Durability of FRP rebars and tendons,» *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 147-154, 1997.
- [41] I. Sasaki, I. Nishizaki, H. Sakamoto, K. Katawaki og Y. Kawamoto, «Durability evaluation of FRP cables by exposure tests,» *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.*, pp. 131-137, 1997.
- [42] R. Sen, M. Shahawy, J. Rosas og S. Sukumar, «Durability of AFRP & CFRP pretensioned piles in a marine environment,» *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 123-130, 1997.
- [43] H. V. Gangarao og P. V. Vijay, «Aging of structural composites under varying environmental conditions,» *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 91-98, 1997.
- [44] G. L. Steckel, G. F. Hawkins og J. L. Bauer, «Environmental durability of composites for seismic retrofit of bridge columns,» *Second International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation (Vol. 2).*, Januar 1998.
- [45] H. Toutanji og T. El-Korchi, «Tensile durability performance of cementitious composites externally wrapped with FRP sheets,» *Second International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation (Vol. 2).*, Januar 1998.
- [46] Y. Kateo, T. Yamaguchi, T. Nishimura og T. Uomoto, «Computational model for deterioration of aramid fibre by ultraviolet rays,» *Proceedings of the 3rd International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 163-170, 1997.
- [47] F. Tomosawa og F. Nakatsuji, «Evaluation of ACM Reinforcement Durability By Exposure Test,» *International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 139-146, 1997.
- [48] P. Sheard, J. Clark, M. Dill, G. Hammersley og D. Richardson, «EUROCRETE-Taking Account of Durability for Design of FRP Reinforced Concrete Structures,» *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 75-82, 1997.
- [49] N. J. Gimsing, Concrete Technology, København: A/S Storebæltsforbindelsen, 1999.
- [50] Techtextil Blog, «Techtextil-Blog.com,» Techtextil Blog, [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.techtextil-blog.com/en/eco-giant-the-worlds-only-carbon-reinforced-bridge-construction/>. [Funnet 23 April 2018].
- [51] Statens vegvesen, «Håndbok N100: Veg- og gateutforming,» Statens vegvesen, Oslo, 2014.
- [52] Statens vegvesen, «Håndbok N400: Bruprosjektering,» Statens Veivesen, Oslo, 2015.
- [53] Standard Norge, «NS-EN 1991-1-1: Allmenne laster Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger,» Standard Norge, Oslo, 2009.
- [54] Standard Norge, «NS-EN 1991-1-2: Trafikklast på bruer,» Standard Norge, Oslo, 2010.

- [55] L. G. Jaeger, A. Mufti og G. Tadros, «The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular Section Reinforced Concrete Beams,» Tokio, Japan, 1997.
- [56] GangaRao, H. V. S. og P. V. Vijay, «Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars,» Tokio, Japan, 1997.
- [57] M. Theriault og Benmokrane, «Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams,» 1998.
- [58] M. Szerszen og A. Nowak, «Calibration of Design Code for Building Structures (ACI 318): Part 2 - Reliability Analysis and Resistance Factors,» 2003.
- [59] S. I. Sørensen, «Betongkonstruksjoner,» Akademika, Trondheim, Norway, 2013.
- [60] SINTEF Byggforsk, «Rissfrie betongkonstruksjoner,» [Internett]. Tilgjengelig: <https://byggforsk.no/file/index/345>. [Funnet 6 May 2018].
- [61] P. Gergely og L. A. Lutz, «Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members,» 1968.
- [62] R. J. Frosch, «Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete,» 1999.
- [63] C. Bakis, C. Ospina, T. Bradberry, B. Benmokrane, S. Gross, J. Newhook og G. Thiagarajan, «Evaluation of Crack Widths in Concrete Flexural Members Reinforced with FRP Bars,» 2006.
- [64] C. E. Bakis og T. E. Boothby, «Evaluation of Crack Width and Bond Strength in GFRP Reinforced Beams Subjected to Sustained Loads,» 2004.
- [65] J. Haugan, Kalkulus med flere variabler, Oslo: Pearson Education, 2010.
- [66] N. Lobonnote, «NTNU.edu,» NTNU, [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.ntnu.edu/kt/research/csdg/research/parametric-modelling>. [Funnet 6 Mai 2018].
- [67] Meccanica, «meccanica.no,» Meccanica, [Internett]. Tilgjengelig: <http://meccanica.no/fasthet/materialer.htm>. [Funnet 23 April 2018].
- [68] O. Dalland, Metode og oppgaveskriving for studenter, Gyldendal akademisk, 2007.
- [69] Byggutengrenser, «byggutengrenser.no,» Byggutengrenser, 2 April 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.byggutengrenser.no/fordeler/armeringskorrosjon>. [Funnet Mai 2017].
- [70] ATP srl, «atp-frp.no,» ATP srl, [Internett]. Tilgjengelig: http://www.atp-frp.com/html/excavation_with_tbm.html. [Funnet 23 April 2018].
- [71] V. B. Brik, «Basalt.Today,» Basalt.Today, 19 August 2016. [Internett]. Tilgjengelig: <http://basalt.today/2016/08/6322/>. [Funnet 23 April 2018].
- [72] L. v. Lieshout, «Wikipedia,» 11 Mas 2007. [Internett]. Tilgjengelig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pultrusion_process_01.png. [Funnet 23 April 2018].
- [73] ReforceTech, «Reforcetech.com,» [Internett]. Tilgjengelig: <http://wpstatic.idium.no/reforcetech.com/2016/12/RFT-BFRP-EN121217.pdf>. [Funnet 23 April 2018].
- [74] D. Nemo, «qualitymag.com,» 17 November 2017. [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.qualitymag.com/articles/94171-stress-life-fatigue-testing-basics>. [Funnet 15 Mai 2018].

Vedlegg

Vedlegg A	-	Referanseprosjekter
Vedlegg B	-	Prisoversikt
Vedlegg C	-	Beregninger for rektangulær-bjelke
Vedlegg D	-	Parametres innvirkning på I_{ekv}
Vedlegg E	-	Beregninger for T-bjelke
Vedlegg F	-	Reduksjon av bøyestivhet for kryp og riss
Vedlegg G	-	Beregninger for dekke
Vedlegg H	-	MATLAB skript
Vedlegg I	-	Excel ark for prisoptimale tverrsnitt
Vedlegg J	-	Excel ark for prisoptimal funksjon

Vedlegg A – Referanseprosjekter



Vedlegg A-1

Table of contents.

Contents	Page
Rail and track construction	4
Façade and precast concrete components	5
Research institutions/hospitals	6
Industrial flooring	7
Multi-storey car parks	8
Residential buildings	9
Tunnel construction	10 - 11
Industrial buildings	12 - 13
Bridge construction	14 - 16
Other	17

Rail and track construction.



Station square, Bern, Switzerland

Construction project	City	Country	Year
University square	Magdeburg	DE	2004
Tram	Delft	NL	2005
Tram	Basel	CH	2006
Randstad Rail	Rotterdam	NL	2006
Station square Bern	Bern	CH	2007
Railway	Monterrey	MX	2008
Basel Tram Depot	Basel	CH	2009
Bahnhofcity West station (Wolkenbügel)	Vienna	AT	2009
Track slab bridge over the factory stream	Munich	DE	2011
S19 Munich Pasing section Gleichmannstrasse	Munich Pasing	DE	2012
Edinburgh Tram Network Haymarket	Edinburgh	UK	2012

Façade and precast concrete components.



Façade panels on the lecture building at RWTH Aachen

Construction project	City	Country	Year
Façade at the school in Guthirt	Zug	CH	2005
Cabel duct cover Essen EVAG	Essen	DE	2007
Coastal defence project	Blackpool	UK	2007
Concrete furniture/washstands	Wangen	DE	2009
Reinforced screed slabs	Aitrach	DE	2010
Freight terminal: Concrete stairs	Freiburg	DE	2010
Façade panels at the Surgical Hospital	Ulm	DE	2010
Façade panels on the lecture building at RWTH	Aachen	DE	2010
Cellar window frames	Wörleschwang	DE	2010
Geomagnetic field simulator, foundation piles	Lehmbek	DE	2011
St. Leonhard grammar school, precast slabs	Aachen	DE	2012
Renovation of concrete pergola	Albstadt	DE	2012

Research institutions/hospitals.



Max Planck Institute for Solid State Research In Stuttgart

Construction project	City	Country	Year
Institute for Plant Genetics	Gatersleben	DE	2005
Carreé	Enschede	NL	2008
Quantum-Nano Center, University of Waterloo	Waterloo	CA	2008
Microscopy building at Technical University Berlin	Berlin	DE	2009
Helmholtz Centre	Munich	DE	2009
IBM Nanotech Center	Zürich	CH	2010
Centre for Addiction and Mental Health (CAMH), Toronto	Toronto	CA	2010
CeNTech II, Centre for Nanotechnology	Münster	DE	2010
Max Planck Institute for Solid State Research	Stuttgart	DE	2010
IBM Rüschlikon: Concrete base foundation	Rüschlikon	CH	2011
Helmholtz Centre Berlin	Berlin	DE	2011
Kampus UW w Białymstoku	Białystok	PL	2011
Chair for Experimental Physics	Aachen	DE	2011
Rostock University, Physics Institute	Rostock	DE	2012

Industrial flooring.



FTS Niederrhein Gold Hall Froog Complex In Moers

Construction project	City	Country	Year
Driverless transportation system Niederrhein Gold Hall Froog Complex	Moers	DE	2007
Coca-Cola Osnabrück	Osnabrück	DE	2007
Driverless transportation system Niederrhein Gold Halls 5 and 6	Moers	DE	2008
Knauf KG: Floor slab at gas service station	lphofen	DE	2010
Turner Contemporary	Burbach	DE	2010

Multi-storey car parks.



Multi-storey car park in the Gesundheitszentrum an der Nahe (health centre) in Bad Kreuznach

Construction project	City	Country	Year
Gesundheitszentrum an der Nahe (health centre)	Bad Kreuznach	DE	2006
Forum Steglitz	Berlin	DE	2006
T-Mobile car park	Bonn	DE	2007
Festo Esslingen 1st phase	Esslingen	DE	2007
Lidl Freiburg multi-storey car park	Freiburg	DE	2008
Park & Fly multi-storey car park Kelsterbach	Kelsterbach	DE	2008
VEGA Grieshaber multi-storey car park	Schiltach	DE	2008
Multi-storey car park at Küchwald hospital	Küchwald	DE	2008
Edeka Zuffenhausen	St.-Zuffenhausen	DE	2010
Buchholz multi-storey car-park	Buchholz	DE	2010
Renovation of multi-storey car park Siegen	Siegen	DE	2011
Pre-fab parking deck Marienhospital	Emsdetten	DE	2011

Residential buildings.



Floor slab in Dr. Moldan's residence in Iphofen

Construction project	City	Country	Year
Hausmann residence	Zürich	CH	1997
Residence	Bad Lippspringe	DE	2006
Kiessling residence	Arnsberg	DE	2008
Zülle residence	Fahrwangen	CH	2011
Foundation for Schäfer residence	Alpirsbach-Reutin	DE	2011
Floor slab for Moldan residence	Iphofen	DE	2011
House suitable for Multiple Chemical Sensitivity patients	Zürich-Leimbach	CH	2012
Hoschek residence	Waging am See	DE	2012

Tunnel construction.



Central Station, City Tunnel Malmö, Sweden

Construction project	City	Country	Year
Randstad Rail	Rotterdam	NL	2004
North-south line	Amsterdam	NL	2004
Main drainage collector (WSK-E)	Vienna	AT	2005
Berlin U5 Brandenburg Gate	Berlin	DE	2006
Cologne north-south suburban train	Cologne	DE	2006
Harbour Crossing Tunnel	Durban	ZA	2006
Northern access route to Brenner pass	Inntal	AT	2006
Leipzig rescue tunnel - section 1a	Leipzig	DE	2007
Flood spillway tunnel Lake Thun	Thun	CH	2007
Malmö City Tunnel	Malmö	SE	2007
T5 Heathrow Airport	London	UK	2007
U4 launching shaft	Hamburg	DE	2007
Metroline 4	Budapest	HU	2007
Wehrhahn line	Düsseldorf	DE	2008
Leipzig rescue tunnel	Leipzig	DE	2008

Tunnel construction.

Construction project	City	Country	Year
Emscherkanal: tubbing segment	Dortmund	DE	2008
Diabolo Tunnel	Brussels	BE	2008
U4 terminal shafts	Hamburg	DE	2008
Liefkenshoekspoorverbinding	Antwerpes	BE	2009
Rainwater sedimentation tank Quellenbusch	Düsseldorf	DE	2009
K5-Kiehlufer	Berlin	DE	2009
XFEL Desy particle accelerator	Hamburg	DE	2009
Emscherkanal: Pump stations Bottrop & Gelsenkirchen	Bottrop	DE	2009
Dattelner Mühlenbach	Datteln	DE	2010
CFPP power station Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	DE	2010
Schelmsrasen	Schweinfurt	DE	2010
Large-scale power plant Mannheim	Mannheim	DE	2010
Wehrhahn line	Düsseldorf	DE	2011
Underground feed channel to rainwater sedimentation tank	Düsseldorf	DE	2011
Kö-Bogen	Düsseldorf	DE	2011
Metro Toronto: Steeles West station	Toronto	CA	2011
Metro Toronto: Sheppard West station	Toronto	CA	2011
Metro tunnel	Karlsruhe	DE	2012
Metro U5 Berlin	Berlin	DE	2012
Emscherkanal: Lots 31, 32, 33	Gelsenkirchen	DE	2012
Ecological improvements for Schondelle river	Dortmund	DE	2012
Emscherkanal pump station AKE Bottrop II	Bottrop	DE	2012
Air-Sea-Link Gdansk	Gdansk	PL	2012

Industrial buildings.



Ras Al Khair Aluminium Factory Jubail, Saudi Arabia

Construction project	City	Country	Year
Dubai Aluminium Factory	Dubai	AE	2006
Transformer foundation	Hamneset	NO	2006
Qatar Aluminium Factory - rectifiers	Qatar	AE	2008
Seafront Villa Qatari Royal Family	Doha, Qatar	AE	2008
Carriageway slab	Péage de Tain, France	FR	2009
Underground transformer block 5063	Kaprun	AT	2009
Peiner Träger GmbH steelworks	Peine	DE	2009
Large-scale power plant Mannheim: Ceiling reinforcement	Mannheim	DE	2010
Large-scale power plant Mannheim: Cooling buildings	Mannheim	DE	2010
Conversion of switching stations at chemical park	Marl	DE	2010
ERAM repository	Morsleben	DE	2010
Reactive current compensation plant	Emmenbrücke	CH	2010
ThyssenKrupp: Coal scraper	Duisburg	DE	2010
Taschinas II power station	Taschinasbach	CH	2011
Thyssen-Krupp: Coal scraper	Duisburg	DE	2011

Industrial buildings.

Construction project	City	Country	Year
Transformer foundations	Nantes	FR	2011
Ras Al Khair Aluminium Factory	Jubail	SA	2011
Taschinas II power station	Grüsch	CH	2011
Thyssen-Krupp Steel Europe: MS filter circuit system	Bochum	DE	2011
Rio Tinto Alcan: Aluminium smelter	Hafnarfjordur	IE	2011
Poste RTE, Siemens	Nantes	FR	2011
RTE Siemens Tourbe	Chicheboville	FR	2011
Louis Neel	Grenoble	FR	2011
Reactor coil foundations	Wehrendorf, Bad Essen	DE	2012

Bridge construction.



Weightman Bridge, Niagara Falls, Ontario, Canada

Construction project	City	Country	Year
Foundation reinforcement railway underpass	Vernayaz	CH	2005
Bridge strengthening	Arnhem	NL	2005
Irvine Creek Bridge Rehabilitation	Ontario	CA	2007
Walker Road Overpass	Ontario	CA	2008
Caso Overhead	Windsor	CA	2008
Provincial Road Underpass	Windsor	CA	2008
9th Concession Road Underpass	Windsor	CA	2008
Essex County Road 43 Underpass	Windsor	CA	2008
Dwyer Hill Road	Kingston	CA	2008
Ashton Station Road	Kingston	CA	2008
3rd Concession	Ontario	CA	2008
Queen's Line Bridge	Ruscom	CA	2008
Albstadt Bridge	Albstadt	DE	2009
McHugh Little River Bridge	Windsor	CA	2009
Weightman Bridge	Niagara Falls	CA	2009

Bridge construction.

Construction project	City	Country	Year
Southminster, Black Creek (MTO 2010-3003)	London	CA	2009
Nanticoke Creek Bridge	Ontario	CA	2010
Furnival Road Bridge	London	CA	2010
Blacks Road Underpass	London	CA	2010
Wilson's Bridge	Wellington	CA	2010
Waterloo Memorial Recreational Center	Waterloo	CA	2010
Fairway Extension (Grand River Bridge)	Kitchener	CA	2011
MTO 2010-3010: Hwy 40 parapets & ret. wall	Ontario	CA	2011
MTO 2010-3016: Hwy 24 precast deck, parapets	near Brantford	CA	2011
MTO 2010-4042: Hwy 417 parapets, side walk	Ottawa	CA	2011
Dawes Rd. Bridge over Massey Creek	Toronto	CA	2011
HWY 40 NBL / SBL - 6 Structures	Ruscom	CA	2011
Sarnia Road improvements	London	CA	2011
Coutt's Line Bridge	Chatham-Kent	CA	2011
Queen's Line Underpass	Chatham-Kent	CA	2011
Alma Street Bridge	Norwood	CA	2011
Rehabilitation of Christie St. Bridge	Grimsby	CA	2011
Highway 40	Chatham and Wallaceburg	CA	2011
Atkinson's Bridge @ Jones Baseline	Township of Centre Wellington	CA	2011
MTO 2011-4042	Petewawa	CA	2011
College Avenue Bridge	Windsor	CA	2011
North Channel Bridge Replacement	Cornwall	CA	2012
Queen's University - Project No. 337	Kingston	CA	2012
MTO 2011-4008	Deacon	CA	2012
James Potter Rd Bridge & Culvert	Brampton	CA	2012
MTO 2011-4005	Toronto	CA	2012
Windsor Essex B15	Windsor	CA	2012

Bridge construction.

Construction project	City	Country	Year
Duck Creek Bridge	Town of Lakeshore	CA	2012
MTO 2011-6000	Thunder Bay	CA	2012
Rehabilitation of Dawn Mills Bridge	Municipality of Chatham-Kent	CA	2012
Regional Road 5 (Nafziger Road) Bridge	Region of Waterloo	CA	2012
Southeast Coll. Trunk Sewer CDC Chamber	Pickering	CA	2012
Garage Entrance Repair Albrecht	Kitchener	CA	2012
Culvert C241120	Hillsburgh	CA	2012
22 Side Road Halton Hills	Halton Hills	CA	2012
Fairway Extension (Randall Creek Bridge)	Kitchener	CA	2012

Other.



Gare de Péage de Tain, southern France

Construction project	City	Country	Year
Gare de Péage de Tain	Southern France	FR	2005
Renovation of anchors for minster façade slabs	Salem	DE	2006
Renovation of St. Stephan's Cathedral	Vienna	AT	2006
Templo de la Sagrada Familia	Barcelona	ES	2008
Bam citadel (UNESCO heritage site)	Iran	IR	2009
Manching airfield: Compass rose	Manching	DE	2009
Renovation of Thalheim Castle Vienna	Vienna	AT	2010
Arctic Sea attraction at Hagenbeck zoo	Hamburg	DE	2010
Renovation of the swimming pool at the Technical University	Darmstadt	DE	2010
Upstream fish migration Algershofer weir	Algershofen	DE	2010
Student hall of residence	Heidenheim an der Brenz	DE	2011
Qatar Old Palace, ringwall reinforcement	Doha	AE	2012

Vedlegg B – Prisoversikt

Tilbud

BYGGER'N

Nr.: 0292503



Martin Wilhelmsen

AURSKOG BYGGSENER AS
Toverudveien 342
1930 Aurskog

Kundenr.:

Foretaksregisteret: NO 884 068 452 MVA

E-post:

Telefonnr.: 63 85 70 00

Telefonnr.:

E-post: info@aurskog.byggern.no

Mobiltelefonnr.:

Selger: Erich Malnes

Referanse:

Dato: 07.02.2018

Beskrivelse:

Gyldig til: 17.02.2018

Nr.	Beskrivelse	Antall	Pris	Rabatt	Beløp	Beløp inkl. mva
24519852	KAMSTÅL Ø8 MM 6M RETT LGD B500NC	1,00 LGD	41,71	30,00 %	29,19	36,49
24519704	KAMSTÅL Ø10 MM 6M RETT LGD B500NC	1,00 LGD	65,20	30,00 %	45,64	57,05
24519738	KAMSTÅL Ø12 MM 6M RETT LGD B500NC	1,00 LGD	93,80	30,00 %	65,66	82,08
24537078	KAMSTÅL Ø16 MM 6M RETT LGD B500NC	1,00 LGD	166,84	30,00 %	116,79	145,99
Totalt:						257,28
Herav mva: 25 % av 257,28						64,32
Totalt inkl. mva:						321,61

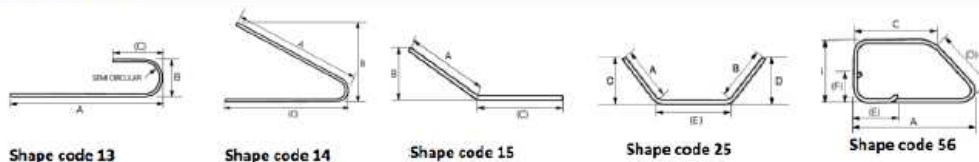
STANDARD PRODUCTS

MiniBars	Nom Dia	NOK/kg	Packing	Boxes/ Pallet	Kg/Box	Pallet
Basalt fiber 24mm-30mm-43mm-55mm	Ø0,65	85	Corrugated Box	12	10-20kg	EURO
Cem-FIL MiniBars	Nom Dia	NOK/kg	Packing	Boxes/ Pallet	Kg/Box	Pallet
Cem-FIL AR glass fiber 24mm-30mm-43mm-55mm	Ø0,65	85	Corrugated Box	12	10-20kg	EURO

BasBars							
Nom Dia			Ø6	Ø8	Ø10	Ø16	Ø20
NOK/M mid point		NOK	5,55	7,69	10,91	23,73	38,26
Kg/m			0,055	0,097	0,152	0,386	0,600
Shape code			0	0	0	0	0
Delivered as coils in 500 or 1000 m lengths			yes	yes	yes	no	no
Cut at standard lengths of 3m, 6m, and 12m		Price after 15% surcharge	6,38	8,84	12,54	27,28	44,00

BasBar Winding							
Nom Dia			Ø6	Ø8	Ø10	Ø16	Ø20
NOK Price/m		NOK	9,67	13,17	19,81	37,21	59,24
Kg/m			0,055	0,097	0,152	0,386	0,600
Shape code			11,21,51,63,77	11,21,51,63,77	11,21,51,63,77	11,21,51,63,77	11,21,51,63,77
Cut at length according to customer order added 10% surcharge		NOK/M	10,64	14,49	21,79	40,93	65,16
Internal bending radii			Ø35	Ø35	Ø35	Ø57	Ø57

Examples of BasBar Winding shapes which can be delivered upon request.
Separate pricelist applies.



Contact:

ReforTech AS
Luftveien 4
3440 Røyken
Norway

Len Miller
Silje Helen Sagvik

Phone 0047 900 51 721
Phone 0047 469 63 592

Stål						
Ø	6	8	10	12	16	Gjennomsnitt
pris		7	10,86667	15,63	27,8	15,3241675
kvmm	28,2743339	50,2654825	78,5398163	113,097336	201,06193	
pris/kvmm	0	0,13926058	0,13835874	0,13819954	0,13826586	0,110816943
pris me gj.snit	3,13327524	5,57026709	8,70354233	12,533101	22,2810684	
diff	-3,13327524	1,42973291	2,16312767	3,09689904	5,51893163	
BFRP						
Ø	6	8	10	16	18	Gjennomsnitt
pris	6,38	8,84	12,54	27,28	44	19,808
kvmm	28,2743339	50,2654825	78,5398163	201,06193	254,469005	
pris/kvmm	0,22564634	0,17586621	0,15966424	0,13567959	0,17290907	0,173953091
pris me gj.snit	4,91840778	8,74383605	13,6622438	34,9753442	44,26567	
diff	1,46159222	0,09616395	-1,12224383	-7,6953442	-0,26567	

	GFRP	CFRP	AFRP
Faktor:	3	10	10

Vedlegg C – Beregninger for rektangulær-bjelke

Låst armering:

Stål										
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster		
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,015336806	h	800	q_{ED}	30,975	G	17,375	
ϵ_{fu}	0,218 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,530263608	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75	
α_b	0,616740088	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300	
λ	0,8	ϵ_f	0,500 %			Med	1 147,800			
η	1	α	0,4120	A_f	4417,00mm ²	Mn	1 155,4193549			
f_f	500	f_f	435,00							
C_e	0,87	a	237,3							
f_{fu}	435									
E_f	200 000									
ρ_{fb}	0,028923							ϕ 25	ϕ 20	ϕ 16
f_{ck}	45				$A_{s, ned}$	4417,00mm ²	8,998	14,060	21,968	
f_{cd}	25,50				A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39	4423,36	
E_{cm}	36000				h	1057	9	15	22	
					b	400				
					d	977				

GFRP										
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster		
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,008598277	h	1364,268994	q_{ED}	37,09137881	G	22,4719823	
ϵ_{fu}	1,57 %	ρ_f/ρ_{fb}	1,677402183	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75	
α_b	0,181920904	ϵ_c	0,350 %	d	1284,268994	L	8	P	300	
λ	0,8	ϵ_f	1,180 %			Med	1 196,731			
η	1	α	0,228768	A_f	4417,00mm ²	Mn	2 797,1744281			
f_f	724	f_f	542,77			ϕ Mn	1 818,1633783			
C_e	1	a	235,0							
f_{fu}	724	strenght reduction	0,650000							
E_f	46 000	Betong knusing								
ρ_{fb}	0,005126							ϕ 25	ϕ 20	ϕ 16
f_{ck}	45				$A_{s, ned}$	4417,00mm ²	8,998	14,060	21,968	
f_{cd}	25,50				A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39	4423,36	
E_{cm}	36000				h	1057	9	15	22	
					b	400				
					d	977				

CFRP										
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster		
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,013124815	h	921,3451796	q_{ED}	31,98889647	G	18,2199137	
ϵ_{fu}	1,67 %	ρ_f/ρ_{fb}	7,670278622	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75	
α_b	0,173461231	ϵ_c	0,350 %	d	841,3451796	L	8	P	300	
λ	0,8	ϵ_f	0,510 %			Med	1 155,911			
η	1	α	0,406937	A_f	4417,00mm ²	Mn	1 967,9217277			
f_f	2068	f_f	632,50			ϕ Mn	1 279,1491230			
C_e	1	a	273,9							
f_{fu}	2068	strenght reduction	0,650000							
E_f	124 000	Betong knusing								
ρ_{fb}	0,001711							ϕ 25	ϕ 20	ϕ 16
f_{ck}	45				$A_{s, ned}$	4417,00mm ²	8,998	14,060	21,968	
f_{cd}	25,50				A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39	4423,36	
E_{cm}	36000				h	1057	9	15	22	
					b	400				
					d	977				

AFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_r	0,010063678	h	1177,26284	q_{ED}	34,93706792	G	20,6767233
ϵ_{fu}	1,80 %	ρ_r/ρ_{fb}	3,545543728	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,162790698	ϵ_c	0,350 %	d	1097,26284	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_r	0,884 %			Med	1 179,497		
η	1	α	0,283559	A_r	4417,00mm ²	Mn	2 469,8561600		
f_r	1300	f_r	574,80			ϕMn	1 605,4065040		
C_e	0,9	a	248,9						
f_{ru}	1170	strenght reduction	0,650000						
E_r	65 000	Betong knusing						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,002838					$A_{s,red}$	4417,00mm ²	8,998	14,060
f_{ck}	45					A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39
f_{cd}	25,50			h	1057			9	15
E_{cm}	36000			b	400				
				d	977				

BFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_r	0,008420116	h	1391,44273	q_{ED}	37,40442025	G	22,7328502
ϵ_{fu}	2,00 %	ρ_r/ρ_{fb}	2,43876751	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,14893617	ϵ_c	0,350 %	d	1311,44273	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_r	1,224 %			Med	1 199,235		
η	1	α	0,222332	A_r	4417,00mm ²	Mn	2 842,7637902		
f_r	1100	f_r	538,66			ϕMn	1 847,7964636		
C_e	0,8	a	233,3						
f_{ru}	880	strenght reduction	0,650000						
E_r	44 000	Betong knusing						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,003453					$A_{s,red}$	4417,00mm ²	8,998	14,060
f_{ck}	45					A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39
f_{cd}	25,50			h	1057			9	15
E_{cm}	36000			b	400				
				d	977				

STÅL

φ (mm):	25	E,armering:	200000	η,kort:	5,5555556	E,c,lang:	12000
Antall stenger	9	E,c:	36000	ρ:	0,01533981	η,lang:	16,66666667
g,k (kN/m):	17,38	A,armering:	4417,9	α,bruks,kort:	0,3363295	α,bruks,lang:	0,5037381
q,k (kN/m):	6,75	b:	400	I,ekv, kort:	7497503127	I,ekv, lang:	15761806009
P,k (kN)	300	d:	720	EI,kort:	2,6991E+14	EI,lang:	1,89142E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ,kort (mm):	16,6	δ,tot (mm):	22,5
				δ,lang (mm):	5,9		
				δ,kryp (mm):	1,8		

GFRP

φ (mm):	25	E,armering:	46000	η,kort:	1,27777778	E,c,lang:	12000
Antall stenger	9	E,c:	36000	ρ:	0,00859996	η,lang:	3,833333333
g,k (kN/m):	22,47	A,armering:	4417,9	α,bruks,kort:	0,13766657	α,bruks,lang:	0,225915344
q,k (kN/m):	6,75	b:	400	I,ekv, kort:	7660443726	I,ekv, lang:	19993457467
P,k (kN)	300	d:	1284,26899	EI,kort:	2,7578E+14	EI,lang:	2,39921E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ,kort (mm):	17,3	δ,tot (mm):	23,0
				δ,lang (mm):	5,7		
				δ,kryp (mm):	0,7		

CFRP

φ (mm):	25	E,armering:	124000	η,kort:	3,44444444	E,c,lang:	12000
Antall stenger	9	E,c:	36000	ρ:	0,01312738	η,lang:	10,33333333
g,k (kN/m):	18,22	A,armering:	4417,9	α,bruks,kort:	0,2588848	α,bruks,lang:	0,402588323
q,k (kN/m):	6,75	b:	400	I,ekv, kort:	7294100915	I,ekv, lang:	16714543121
P,k (kN)	300	d:	841,34518	EI,kort:	2,6259E+14	EI,lang:	2,00575E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ,kort (mm):	17,3	δ,tot (mm):	23,0
				δ,lang (mm):	5,7		
				δ,kryp (mm):	1,4		

AFRP

φ (mm):	25	E,armering:	65000	η,kort:	1,80555556	E,c,lang:	12000
Antall stenger	9	E,c:	36000	ρ:	0,01006565	η,lang:	5,416666667
g,k (kN/m):	20,68	A,armering:	4417,9	α,bruks,kort:	0,17334216	α,bruks,lang:	0,280167444
q,k (kN/m):	6,75	b:	400	I,ekv, kort:	7480358049	I,ekv, lang:	18802615287
P,k (kN)	300	d:	1097,26284	EI,kort:	2,6929E+14	EI,lang:	2,25631E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ,kort (mm):	17,3	δ,tot (mm):	23,0
				δ,lang (mm):	5,7		
				δ,kryp (mm):	0,9		

BFRP

φ (mm):	25	E,armering:	44000	η,kort:	1,22222222	E,c,lang:	12000
Antall stenger	9	E,c:	36000	ρ:	0,00842176	η,lang:	3,666666667
g,k (kN/m):	22,73	A,armering:	4417,9	α,bruks,kort:	0,13355556	α,bruks,lang:	0,21954617
q,k (kN/m):	6,75	b:	400	I,ekv, kort:	7688192231	I,ekv, lang:	20152278120
P,k (kN)	300	d:	1311,44273	EI,kort:	2,7677E+14	EI,lang:	2,41827E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ,kort (mm):	17,2	δ,tot (mm):	23,0
				δ,lang (mm):	5,8		
				δ,kryp (mm):	0,7		

STÅL

w	0,3
k,b	1
c,c	50
E,s	200000
A,s	4417,86467
d	720
h	800

α	0,5037381
M,bruk	596,8
f,ss	225,483629
β	1,22389611
dc, max	109

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	182

GFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	46000
A,f	4417,86467
d	1284,26899
h	1364,26899

α	0,22591534
M,bruk	506,775859
f,fs	96,5937567
β	1,08047214
dc, max	79

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	259

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	124000
A,f	4417,86467
d	841,34518
h	921,34518

α	0,40258832
M,bruk	472,75931
f,fs	146,904107
β	1,15916298
dc, max	130

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	544

AFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	65000
A,f	4417,86467
d	1097,26284
h	1177,26284

α	0,28016744
M,bruk	492,413786
f,fs	112,043382
β	1,10128563
dc, max	94

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	343

BFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	44000
A,f	4417,86467
d	1311,44273
h	1391,44273

α	0,21954617
M,bruk	508,862802
f,fs	94,7642508
β	1,0781616
dc, max	77

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	249

Låst tverrsnitt:

Stål									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,015336806	h	800	q_{ED}	30,975	G	17,375
ϵ_{fu}	0,218 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,530263608	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,616740088	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,500 %			Med	1 147,800		
η	1	α	0,4120	A_f	4417,00mm ²	Mn	1 155,4193549		
f_f	500	f_f	435,00						
C_e	0,87	a	237,3						
f_{fu}	435								
E_f	200 000							$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,028923			$A_{s, ned}$	4417,00mm ²			8,998	14,060
f_{ck}	45			A_s	4417,86mm ²			4417,86	4712,39
f_{cd}	25,50			h	1057			9	15
E_{cm}	36000			b	400				22
				d	977				

GFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,074993056	h	800	q_{ED}	30,591	G	17,055
ϵ_{fu}	1,57 %	ρ_f/ρ_{fb}	14,63008477	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,181920904	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,312 %			Med	1 144,728		
η	1	α	0,528347	A_f	21598,00mm ²	Mn	1 762,6459040		
f_f	724	f_f	143,72			ϕMn	1 145,7198376		
C_e	1	a	304,3						
f_{fu}	724	strenght reduction f	0,650000						
E_f	46 000	Betong knusing						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,005126			$A_{s, ned}$	21598,00mm ²			43,999	68,749
f_{ck}	45			A_s	21598,45mm ²			21598,45	21676,99
f_{cd}	25,50			h	1057			44	69
E_{cm}	36000			b	400				108
				d	977				

CFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,028975694	h	800	q_{ED}	30,591	G	17,055
ϵ_{fu}	1,67 %	ρ_f/ρ_{fb}	16,93369745	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,173461231	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,304 %			Med	1 144,728		
η	1	α	0,535250	A_f	8345,00mm ²	Mn	1 779,4221493		
f_f	2068	f_f	376,84			ϕMn	1 156,6243970		
C_e	1	a	308,3						
f_{fu}	2068	strenght reduction f	0,650000						
E_f	124 000	Betong knusing						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,001711			$A_{s, ned}$	8345,00mm ²			17,000	26,563
f_{ck}	45			A_s	8835,73mm ²			8835,73	8482,30
f_{cd}	25,50			h	1057			18	27
E_{cm}	36000			b	400				42
				d	977				

AFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,054541667	h	800	q_{ED}	30,591	G	17,055
ϵ_{fu}	1,80 %	ρ_f/ρ_{fb}	19,215625	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,162790698	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,307 %			Med	1 144,728		
η	1	α	0,532977	A_r	15708,00mm ²	Mn	1 773,9169134		
f_r	1300	f_f	199,35			ϕMn	1 153,0459937		
C_e	0,9	a	307,0						
f_{ru}	1170	strenght reduction f	0,650000						
E_f	65 000	Betong knusing						ϕ 25	ϕ 20
ρ_{fb}	0,002838				$A_{s, ned}$	15708,00mm ²	32,000	50,000	ϕ 16
f_{ck}	45				A_s	16198,84mm ²	16198,84	16022,12	15883,89
f_{cd}	25,50			h		1057	33	51	79
E_{cm}	36000			b		400			
				d		977			

BFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,078402778	h	800	q_{ED}	30,591	G	17,055
ϵ_{fu}	2,00 %	ρ_f/ρ_{fb}	22,70825552	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,14893617	ϵ_c	0,350 %	d	720	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,312 %			Med	1 144,728		
η	1	α	0,528349	A_r	22580,00mm ²	Mn	1 762,6508988		
f_r	1100	f_f	137,47			ϕMn	1 145,7230842		
C_e	0,8	a	304,3						
f_{ru}	880	strenght reduction f	0,650000						
E_f	44 000	Betong knusing						ϕ 25	ϕ 20
ρ_{fb}	0,003453				$A_{s, ned}$	22580,00mm ²	46,000	71,874	112,304
f_{ck}	45				A_s	22580,20mm ²	22580,20	22619,47	22720,00
f_{cd}	25,50			h		1057	46	72	113
E_{cm}	36000			b		400			
				d		977			

STÅL

φ (mm):	25	E,armering:	200000	η _{kort} :	5,55555556	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,01533981	η _{lang} :	16,66666667
g _k (kN/m):	17,38	A _{armering} :	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,3363295	α _{bruks,lang} :	0,5037381
q _k (kN/m):	6,75	b:	400	I _{ekv, kort} :	7497503127	I _{ekv, lang} :	15761806009
P _k (kN)	300	d:	720	EI _{kort} :	2,6991E+14	EI _{lang} :	1,89142E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	16,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	22,5
				δ _{lang} (mm):	5,9		
				δ _{kryp} (mm):	1,8		

GFRP

φ (mm):	25	E,armering:	46000	η _{kort} :	1,27777778	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	44	E _c :	36000	ρ:	0,07499462	η _{lang} :	3,833333333
g _k (kN/m):	17,06	A _{armering} :	21598,4	α _{bruks,kort} :	0,35232042	α _{bruks,lang} :	0,523447952
q _k (kN/m):	6,75	b:	400	I _{ekv, kort} :	8178003236	I _{ekv, lang} :	16884985784
P _k (kN)	300	d:	720	EI _{kort} :	2,9441E+14	EI _{lang} :	2,0262E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	15,2	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	20,6
				δ _{lang} (mm):	5,4		
				δ _{kryp} (mm):	1,7		

CFRP

φ (mm):	25	E,armering:	124000	η _{kort} :	3,44444444	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	18	E _c :	36000	ρ:	0,03067962	η _{lang} :	10,33333333
g _k (kN/m):	17,06	A _{armering} :	8835,7	α _{bruks,kort} :	0,36604126	α _{bruks,lang} :	0,540035518
q _k (kN/m):	6,75	b:	400	I _{ekv, kort} :	8781633051	I _{ekv, lang} :	17851705557
P _k (kN)	300	d:	720	EI _{kort} :	3,1614E+14	EI _{lang} :	2,1422E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	14,1	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	19,2
				δ _{lang} (mm):	5,1		
				δ _{kryp} (mm):	1,6		

AFRP

φ (mm):	25	E,armering:	65000	η _{kort} :	1,80555556	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	33	E _c :	36000	ρ:	0,05624596	η _{lang} :	5,416666667
g _k (kN/m):	17,06	A _{armering} :	16198,8	α _{bruks,kort} :	0,36042301	α _{bruks,lang} :	0,533279717
q _k (kN/m):	6,75	b:	400	I _{ekv, kort} :	8532289709	I _{ekv, lang} :	17455659716
P _k (kN)	300	d:	720	EI _{kort} :	3,0716E+14	EI _{lang} :	2,09468E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	14,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	19,8
				δ _{lang} (mm):	5,2		
				δ _{kryp} (mm):	1,7		

BFRP

φ (mm):	25	E,armering:	44000	η _{kort} :	1,22222222	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	46	E _c :	36000	ρ:	0,07840346	η _{lang} :	3,666666667
g _k (kN/m):	17,06	A _{armering} :	22580,2	α _{bruks,kort} :	0,35232042	α _{bruks,lang} :	0,523447952
q _k (kN/m):	6,75	b:	400	I _{ekv, kort} :	8178003236	I _{ekv, lang} :	16884985784
P _k (kN)	300	d:	720	EI _{kort} :	2,9441E+14	EI _{lang} :	2,0262E+14
L (m):	8	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	15,2	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	20,6
				δ _{lang} (mm):	5,4		
				δ _{kryp} (mm):	1,7		

STÅL

w	0,3
k,b	1
c,c	50
E,s	200000
A,s	4417,86467
d	720
h	800

α	0,5037381
M,bruk	596,8
f,ss	225,483629
β	1,22389611
dc, max	109

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	182

GFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	46000
A,f	21598,4495
d	720
h	800

α	0,52344795
M,bruk	463,44
f,fs	36,1004187
β	1,2331563
dc, max	185

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	821

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	124000
A,f	8835,72934
d	720
h	800

α	0,54003552
M,bruk	463,44
f,fs	88,840508
β	1,24156455
dc, max	201

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	899

AFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	65000
A,f	16198,8371
d	720
h	800

α	0,53327972
M,bruk	463,44
f,fs	48,3257419
β	1,23806789
dc, max	194

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	867

BFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,f	44000
A,f	22580,1972
d	720
h	800

α	0,52344795
M,bruk	463,44
f,fs	34,5308353
β	1,2331563
dc, max	185

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	821

Vedlegg D – Parametres innvirkning på I_{ekv}

PARAMETRES INNVIRKNING PÅ $I_{ekv} \rightarrow 2$

I_{ekv} blir beskrivende for nedbøyninger.
Vi ønsker derfor å se nærmere på hvilke parametre som påvirker denne størrelsen.

$$I_{ekv} = \underbrace{b \cdot (\alpha d)^3 / 12}_A + \underbrace{b \cdot \alpha d \left(\frac{\alpha d}{2}\right)^2}_B + \underbrace{\eta \cdot A_f \cdot (d - \alpha d)^2}_C$$

I utregningene fra Ex 1 ser vi at ledd C utgjør 70% - 90% av I_{ekv} for alle tverrsnitt.

$$C = \eta \cdot A_f \cdot d^2 (1 - \alpha)^2, \quad \eta = \frac{E_f}{E_c}$$
$$= \frac{E_f}{E_c} \cdot A_f \cdot d^2 (1 - \alpha)^2$$

$$\alpha^2 + 2\eta\rho \cdot \alpha - 2\eta\rho = 0, \quad \rho = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

Kvadratiske spiller parametrene inn på α ?

α :	$A_f: \uparrow$	$b: \downarrow$	$d: \downarrow$	$E_f: \uparrow$	$E_c: \downarrow$
------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------------

(\uparrow : Høy verdi øker verdi av α , og motsatt).

Vi ser nå på leddet c i I_{EKV} :

$$I_{EKV,C}: \quad E_f: \uparrow, \quad E_c: \downarrow, \quad A_f: \uparrow, \quad d: \uparrow, \quad \alpha: \downarrow$$

Siden α har negativ innvirkning kan vi "passe ut" og se hva parametrene som inngår i α påvirker I_{EKV} . Vi ender opp med:

$$I_{EKV,C}: \quad \boxed{E_f: \uparrow, \downarrow}, \quad \boxed{E_c: \uparrow, \downarrow}, \quad \boxed{A_f: \uparrow, \downarrow}$$
$$\quad \boxed{d: \uparrow, \uparrow}, \quad \boxed{b: \uparrow}$$

Vi ser altså at virkningen til de forskjellige parametrene går ofte i begge retninger. Det er altså vanskelig å konkludere med noen. Effektiv tverrsnittshøyde, d , er eneste parameter som ser ut til å utvilsomt ha positiv innvirkning på I_{EKV} . Likevel, når vi ser på sammenheng mellom d og nedbøyning for tverrsnittene ser det ut til å være ingen sammenheng.

Vedlegg E – Beregninger for T-bjelke

Låst armering:

Stål									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,004907778	h	800	q_{ED}	27,375	G	14,375
E_{fu}	0,22 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,169567	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,61685824	ϵ_c	FRP brudd	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,500 %	t	300	Med	1 119,000		
η	1	α	0,412000000	d	720	Mn	1 154,8419339		
f_{ku}	500	f_f	434,78						
C_e	0,869565217	a	237,3	Af	4417,00mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{tu}	434,7826087	ϕ	0,550000			M_{rd}	4548,758446		
E_f	200 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,028943								
f_c	45								
f_{td}	25,50								
E_{cm}	36000								

Stål ($\alpha=0,412$)				
$A_{s,reqd}$	4417,00mm ²	$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
A_s	4417,86mm ²	8,998	14,060	21,968
		4417,86	4712,39	4423,36
h		9	15	22
b				
d				

GFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,002997116	h	1259	q_{ED}	31,97268	G	18,2064
E_{fu}	1,26 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,391224	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,21750878	ϵ_c	FRP brudd	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	1,259 %	t	300	Med	1 155,781		
η	1	α	0,217508781	d	1179	Mn	2 753,8410169		
f_{ku}	724	f_f	579,20			ϕMn	1 514,6125593		
C_e	0,8	a	205,2	Af	4417,00mm ²	$M_{rd,max}$	9839,8125		
f_{tu}	579,2	ϕ	0,550000			M_{rd}	7039,044205		
E_f	46 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,007661								
f_c	45								
f_{td}	25,50								
E_{cm}	36000								

GFRP				
$A_{s,reqd}$	4417,00mm ²	$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
A_s	4417,86mm ²	8,998	14,060	21,968
		4417,86	4712,39	4423,36
h		9	15	22
b				
d				

CFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,004788076	h	818	q_{ED}	26,89236	G	13,9728
E_{fu}	1,33 %	ρ_f/ρ_{fb}	1,868510	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,20781459	ϵ_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,935 %	t	300	Med	1 115,139		
η	1	α	0,272267698	d	738	Mn	3 369,5508680		
f_{ku}	2068	f_f	1 160,02			ϕMn	2 190,2080642		
C_e	0,8	a	160,7	Af	4417,00mm ²	$M_{rd,max}$	5622,7500		
f_{tu}	1654,4	ϕ	0,650000			M_{rd}	3369,550868		
E_f	124 000	Betong knusing							
ρ_{fb}	0,002563								
f_c	45								
f_{td}	25,50								
E_{cm}	36000								

CFRP				
$A_{s,reqd}$	4417,00mm ²	$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
A_s	4417,86mm ²	8,998	14,060	21,968
		4417,86	4712,39	4423,36
h		9	15	22
b				
d				

AFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,00355851	h	1073	q_{ED}	29,82996	G	16,4208
E_{fu}	1,60 %	ρ_f/ρ_{fb}	1,010736	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,17948718	E_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	E_f	1,591 %	t	300	Med	1 138,640		
η	1	α	0,180352903	d	993	Mn	4 207,6898915		
f_{fu}^*	1300	f_f	1 033,92			ϕMn	2 325,5232280		
C_e	0,8	a	143,3	Af	4417,00mm ²	$M_{rd,max}$	8061,1875		
f_{tu}	1040	ϕ	0,552684			M_{rd}'	4207,689892		
E_f	65 000	Betong knusing (Transition)							
ρ_{fb}	0,003521								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

AFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,req}$	4417,00mm ²	8,998	14,060	21,968
A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39	4423,36
h		9	15	22
b				
d				

BFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,002932448	h	1285	q_{ED}	32,2722	G	18,456
E_{fu}	2,00 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,849342	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,14893617	E_c	FRP brudd	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	E_f	2,000 %	t	300	Med	1 158,178		
η	1	α	0,148936170	d	1205	Mn	4 404,7526928		
f_{fu}^*	1100	f_f	880,00			ϕMn	2 422,6139810		
C_e	0,8	a	143,6	Af	4417,00mm ²	$M_{rd,max}$	10088,4375		
f_{tu}	880	ϕ	0,550000			M_{rd}'	5186,075891		
E_f	44 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,003453								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

BFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,req}$	4417,00mm ²	8,998	14,060	21,968
A_s	4417,86mm ²	4417,86	4712,39	4423,36
h		9	15	22
b				
d				

STÅL									
φ (mm):	25	E,armering:	200000	η _k ,kort:	5,555555556	E _c ,lang:	12000		
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,004908739	η _k ,lang:	16,66666667		
g,k (kN/m):	14,38	A _s ,armering:	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,207857353	α _{bruks,lang} :	0,330883549		
q,k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	9380470857	I _{ekv, lang} :	22723442481		
P,k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	3,37697E+14	EI _{lang} :	2,72681E+14		
L (m):	8	d:	720						
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2						
				δ _{kort} (mm):	12,8	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	16,3		
				δ _{lang} (mm):	3,5				
				δ _{kryp} (mm):	0,7				
GFRP									
φ (mm):	25	E,armering:	46000	η _k ,kort:	1,277777778	E _c ,lang:	12000		
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,002997703	η _k ,lang:	3,833333333		
g,k (kN/m):	18,21	A _s ,armering:	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,083779352	α _{bruks,lang} :	0,140543132		
q,k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6988670261	I _{ekv, lang} :	19284260321		
P,k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,51592E+14	EI _{lang} :	2,31411E+14		
L (m):	8	d:	1179						
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2						
				δ _{kort} (mm):	18,0	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	23,0		
				δ _{lang} (mm):	5,0				
				δ _{kryp} (mm):	0,4				
CFRP									
φ (mm):	25	E,armering:	124000	η _k ,kort:	3,444444444	E _c ,lang:	12000		
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,004789013	η _k ,lang:	10,33333333		
g,k (kN/m):	13,97	A _s ,armering:	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,1658862	α _{bruks,lang} :	0,268981504		
q,k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6530788997	I _{ekv, lang} :	16546163956		
P,k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,35108E+14	EI _{lang} :	1,98554E+14		
L (m):	8	d:	738						
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2						
				δ _{kort} (mm):	18,3	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	23,0		
				δ _{lang} (mm):	4,7				
				δ _{kryp} (mm):	0,7				
AFRP									
φ (mm):	25	E,armering:	65000	η _k ,kort:	1,805555556	E _c ,lang:	12000		
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,003559206	η _k ,lang:	5,416666667		
g,k (kN/m):	16,42	A _s ,armering:	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,107125348	α _{bruks,lang} :	0,178027196		
q,k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6772057177	I _{ekv, lang} :	18244502860		
P,k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,43794E+14	EI _{lang} :	2,18934E+14		
L (m):	8	d:	993						
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2						
				δ _{kort} (mm):	18,2	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	23,0		
				δ _{lang} (mm):	4,8				
				δ _{kryp} (mm):	0,5				
BFRP									
φ (mm):	25	E,armering:	44000	η _k ,kort:	1,222222222	E _c ,lang:	12000		
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,002933022	η _k ,lang:	3,666666667		
g,k (kN/m):	18,46	A _s ,armering:	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,081164594	α _{bruks,lang} :	0,136298252		
q,k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	7009107976	I _{ekv, lang} :	19392252654		
P,k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,52328E+14	EI _{lang} :	2,32707E+14		
L (m):	8	d:	1205						
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2						
				δ _{kort} (mm):	18,0	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	23,0		
				δ _{lang} (mm):	5,0				
				δ _{kryp} (mm):	0,4				

STÅL

w	0,3
k,b	1
c,c	50
E,s	200000
A,s	4417,86467
d	720
h	800

α	0,33088355
M,bruk	572,8
f,ss	202,400619
β	1,16605646
dc, max	127

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	216

GFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	46000
A,s	4417,86467
d	1179
h	1259

α	0,14054313
M,bruk	472,6512
f,ss	95,2033557
β	1,07894999
dc, max	80

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	264

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	124000
A,s	4417,86467
d	738
h	818

α	0,2689815
M,bruk	438,7824
f,ss	147,834924
β	1,14828774
dc, max	130

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	541

AFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	65000
A,s	4417,86467
d	993
h	1073

α	0,1780272
M,bruk	458,3664
f,ss	111,075825
β	1,09801291
dc, max	95

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	347

BFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	44000
A,s	4417,86467
d	1205
h	1285

α	0,13629825
M,bruk	474,648
f,ss	93,404042
β	1,07686686
dc, max	78

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	255

Låst tverrsnitt:

Stål

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,004755459	h	800	q_{ED}	27,375	G	14,375
ϵ_{fu}	0,22 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,164304	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,61685824	ϵ_c	FRP brudd	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,500 %	t	300	Med	1 119,000		
η	1	α	0,412000000	d	720	Mn	1 119,0000000		
f_{ku}	500	f_f	434,78						
C_e	0,869565217	a	237,3	Af	4279,91mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{ku}	434,7826087	ϕ	0,550000			Mrd'	4548,758446		
E_f	200 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,028943								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

Stål ($\alpha=0,412$)		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,req}$	4279,91mm ²	8,719	13,623	21,287
A_s	4417,86mm ²	4417,86	4398,23	4423,36
h		9	14	22
b				
d				

GFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,0141808	h	800	q_{ED}	26,685	G	13,8
ϵ_{fu}	1,26 %	ρ_f/ρ_{fb}	1,851068	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,21750878	ϵ_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,886 %	t	300	Med	1 113,480		
η	1	α	0,283229389	d	720	Mn	3 319,8941350		
f_{ku}	724	f_f	407,44			ϕMn	2 157,9311877		
C_e	0,8	a	163,1	Af	12762,72mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{ku}	579,2	ϕ	0,650000			Mrd'	3319,894135		
E_f	46 000	Betong knusing							
ρ_{fb}	0,007661								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

GFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,req}$	12762,72mm ²	26,000	40,625	63,477
A_s	12762,72mm ²	12762,72	12880,53	12867,96
h		26	41	64
b				
d				

CFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongknusing)		Tverrsnittsparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,005454154	h	800	q_{ED}	26,685	G	13,8
ϵ_{fu}	1,33 %	ρ_f/ρ_{fb}	2,128441	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,20781459	ϵ_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,867 %	t	300	Med	1 113,480		
η	1	α	0,287526476	d	720	Mn	3 363,7296857		
f_{ku}	2068	f_f	1 075,43			ϕMn	2 186,4242957		
C_e	0,8	a	165,6	Af	4908,74mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{ku}	1654,4	ϕ	0,650000			Mrd'	3363,729686		
E_f	124 000	Betong knusing							
ρ_{fb}	0,002563								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

CFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,req}$	4908,74mm ²	10,000	15,625	24,414
A_s	4908,74mm ²	4908,74	5026,55	5026,55
h		10	16	25
b				
d				

AFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,010362892	h	800	q_{ED}	26,685	G	13,8
ϵ_{fu}	1,60 %	ρ_f/ρ_{fb}	2,943410	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,17948718	ϵ_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,869 %	t	300	Med	1 113,480		
η	1	α	0,287043451	d	720	Mn	3 358,8119870		
f_{ku}	1300	f_f	565,06			ϕMn	2 183,2277915		
C_e	0,8	a	165,3	Af	9326,60mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{tu}	1040	ϕ	0,650000			Mrd'	3358,811987		
E_f	65 000	Betong knusing							
ρ_{fb}	0,003521								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

AFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,ngd}$	9326,60mm ²	19,000	29,688	46,387
A_s	9326,60mm ²	9326,60	9424,78	9449,91
h		19	30	47
b				
d				

BFRP

Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkusing)		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,014726216	h	800	q_{ED}	26,685	G	13,8
ϵ_{fu}	2,00 %	ρ_f/ρ_{fb}	4,265240	beff	1250	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,14893617	ϵ_c	0,350 %	bw	400	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	0,889 %	t	300	Med	1 113,480		
η	1	α	0,282436610	d	720	Mn	3 311,7854803		
f_{ku}	1100	f_f	391,26			ϕMn	2 152,6605622		
C_e	0,8	a	162,7	Af	13253,59mm ²	$M_{rd,max}$	5450,6250		
f_{tu}	880	ϕ	0,650000			Mrd'	3311,78548		
E_f	44 000	Betong knusing							
ρ_{fb}	0,003453								
f_c	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

BFRP		$\phi 25$	$\phi 20$	$\phi 16$
$A_{s,ngd}$	13253,59mm ²	27,000	42,188	65,918
A_s	13253,59mm ²	13253,59	13508,85	13270,09
h		27	43	66
b				
d				

STÅL							
φ (mm):	25	E,armering:	200000	η _{kort} :	5,555555556	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	9	E _c :	36000	ρ:	0,004908739	η _{lang} :	16,66666667
g _k (kN/m):	14,38	A _{armering} :	4417,9	α _{bruks,kort} :	0,207857353	α _{bruks,lang} :	0,330883549
q _k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	9380470857	I _{ekv, lang} :	22723442481
P _k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	3,37697E+14	EI _{lang} :	2,72681E+14
L (m):	8	d:	720				
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2				
				δ _{kort} (mm):	12,8	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	16,3
				δ _{lang} (mm):	3,5		
				δ _{kryp} (mm):	0,7		

GFRP							
φ (mm):	25	E _{armering} :	46000	η _{kort} :	1,277777778	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	26	E _c :	36000	ρ:	0,0141808	η _{lang} :	3,833333333
g _k (kN/m):	13,80	A _{armering} :	12762,7	α _{bruks,kort} :	0,173108104	α _{bruks,lang} :	0,279817537
q _k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6587190938	I _{ekv, lang} :	16561670820
P _k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,37139E+14	EI _{lang} :	1,9874E+14
L (m):	8	d:	720				
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2				
				δ _{kort} (mm):	18,1	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	22,7
				δ _{lang} (mm):	4,6		
				δ _{kryp} (mm):	0,7		

CFRP							
φ (mm):	25	E _{armering} :	124000	η _{kort} :	3,444444444	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	10	E _c :	36000	ρ:	0,005454154	η _{lang} :	10,33333333
g _k (kN/m):	13,80	A _{armering} :	4908,7	α _{bruks,kort} :	0,175959443	α _{bruks,lang} :	0,284074815
q _k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6799114232	I _{ekv, lang} :	17042743936
P _k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,44768E+14	EI _{lang} :	2,04513E+14
L (m):	8	d:	720				
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2				
				δ _{kort} (mm):	17,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	22,0
				δ _{lang} (mm):	4,5		
				δ _{kryp} (mm):	0,7		

AFRP							
φ (mm):	25	E _{armering} :	65000	η _{kort} :	1,805555556	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	19	E _c :	36000	ρ:	0,010362892	η _{lang} :	5,416666667
g _k (kN/m):	13,80	A _{armering} :	9326,6	α _{bruks,kort} :	0,175638519	α _{bruks,lang} :	0,283596244
q _k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6775105533	I _{ekv, lang} :	16988362700
P _k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,43904E+14	EI _{lang} :	2,0386E+14
L (m):	8	d:	720				
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2				
				δ _{kort} (mm):	17,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	22,1
				δ _{lang} (mm):	4,5		
				δ _{kryp} (mm):	0,7		

BFRP							
φ (mm):	25	E _{armering} :	44000	η _{kort} :	1,222222222	E _c ,lang:	12000
Antall stenger	27	E _c :	36000	ρ:	0,014726216	η _{lang} :	3,666666667
g _k (kN/m):	13,80	A _{armering} :	13253,6	α _{bruks,kort} :	0,172582953	α _{bruks,lang} :	0,279032147
q _k (kN/m):	6,75	bw:	400	I _{ekv, kort} :	6548501230	I _{ekv, lang} :	16473585834
P _k (kN)	300	beff:	1250	EI _{kort} :	2,35746E+14	EI _{lang} :	1,97683E+14
L (m):	8	d:	720				
Langtidsfraksj	0,5	φ:	2				
				δ _{kort} (mm):	18,2	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	22,9
				δ _{lang} (mm):	4,6		
				δ _{kryp} (mm):	0,7		

STÅL

w	0,3
k,b	1
c,c	50
E,s	200000
A,s	4417,86467
d	720
h	800

α	0,33088355
M,bruk	572,8
f,ss	202,400619
β	1,16605646
dc, max	127

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	216

GFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	46000
A,s	12762,7202
d	720
h	800

α	0,27981754
M,bruk	437,4
f,ss	52,4960049
β	1,15428189
dc, max	136

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	565

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	124000
A,s	4908,73852
d	720
h	800

α	0,28407481
M,bruk	437,4
f,ss	136,703564
β	1,15519933
dc, max	140

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	585

AFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	65000
A,s	9326,60319
d	720
h	800

α	0,28359624
M,bruk	437,4
f,ss	71,9365681
β	1,15509566
dc, max	140

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	582

BFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,c	50
E,s	44000
A,s	13253,594
d	720
h	800

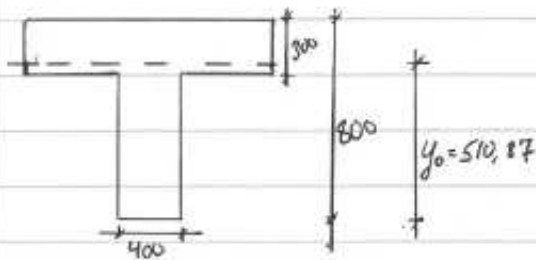
α	0,27903215
M,bruk	437,4
f,ss	50,537117
β	1,15411382
dc, max	135

dc (mm)	62,5
s,max (mm)	561

Vedlegg F – Reduksjon av bøyestivhet for kryp og riss

E_{mod} = Modifisert E-modul.

I_u = Annet arealmoment, u-risset.



$$I_u = \frac{1250 \cdot 300^3}{12} + 1250 \cdot 300 \cdot 139,15^2 + \frac{400 \cdot 500^3}{12} + 400 \cdot 500 \cdot 260,87^2 = 2,7849 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$y_0 = \frac{1250 \cdot 300 \cdot 650 + 400 \cdot 500 \cdot 250}{1250 \cdot 300 + 400 \cdot 500} = 510,87 \text{ mm}$$

- Da Robot ikke åpner for reduksjon av bøyestivhet (EI) i valgt modul/konstruksjonselement gjøres dette ved å definere et nytt materiale, med redusert E-modul.
- Denne reduksjonen av E-modul skal både ta høyde for riss i tverrsnittet og reduksjon av $E_{c,m}$ på grunn av kryp.
- Følgende sammenheng er brukt

$$I_u \cdot E_{mod} = E_{c,kort} \cdot I_{EKV,kort} \cdot X + E_{c,lang} \cdot I_{EKV,lang} \cdot (1-X)$$

X bestemmes på bakgrunn av vektning mellom EI_{kort} og EI_{lang} .

Da forholdet er ≈ 1 , (Se Excel-resultater, nedbøyning, T-tverrsnitt) settes $x = 0,5$. Dvs EI_{kort} og EI_{lang} vektet like mye; 50% hver.

Løser nå tidligere presenterte sammenheng for E_{mod} og bruker dette som ny, modificert E-modul; det nye egendefinerte materialet.

$$E_{\text{mod}} = \frac{E_{c, \text{kort}} \cdot I_{EKV, \text{kort}} \cdot 0,5}{I_u} + \frac{E_{c, \text{lang}} \cdot I_{EKV, \text{lang}} \cdot 0,5}{I_u} = \underline{\underline{5040,04 \text{ N/mm}^2}}$$

$$E_{c, \text{kort}} = 36000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{c, \text{lang}} = 12000 \text{ N/mm}^2$$

$$I_{EKV, \text{kort}} = 4083837895 \text{ mm}^4$$

$$I_{EKV, \text{lang}} = 11141820946 \text{ mm}^4$$

$$I_u = 2,7849 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

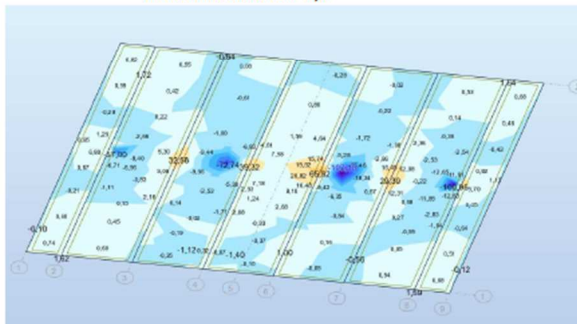
Vedlegg G – Beregninger for dekke

Låst armering:

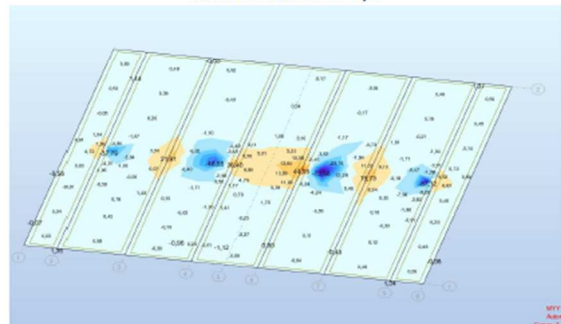
Bruddgrense						Ved låst armeringsmengde
$\phi M_n = 110,7 \text{ kNm/m}$						
	stål ($\alpha=0,412$)	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
A_s	1173 mm ²	1173 mm ²	1173 mm ²	1173 mm ²	1173 mm ²	
h	300 mm	296 mm	215 mm	242 mm	263 mm	
α	0,412	0,182	0,313	0,224	0,180	
δ	1,1	4,2	3,8	5,0	5,8	

Bruksgrense						Ved låst armeringsmengde
$\phi M_n = 74,6 \text{ kNm/m}$						
	stål ($\alpha=0,412$)	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
A_s	1173 mm ²	1173,00 mm ²	1173,00 mm ²	1173,00 mm ²	1173,00 mm ²	
h	215,1502409	317	220	277	323	
α	0,412	0,182	0,309	0,209	0,162	
δ	2,5	3,6	3,6	3,6	3,6	
Riss	ikke OK	ikke OK	OK	OK	Ikke OK	
Nød. h for riss	294	373		279	388	

Brudd: Lastfaktor=1,0



Bruks: Lastfaktor=1,0



Stål														
Materialfaktorer			Faktiske verdier (ved betongkusing)			Tverrsnittparametere			Lastbetingelser			Karakteristiske laster		
E _{cu3}	0,35 %	D _r	0,004509941	h	300	q _{ED}	17,1	G	7,5					
E _{su}	0,22 %	D _r /D _{tb}	0,15580537	b	1000	P _{ED}	450	Q	5,4					
α _{fb}	0,616875964	E _c	FRP brudd	d	260	L	1,25	P	300					
λ	0,8	E _r	0,217 %			Med	110,700							
η	1	α	0,412000	A _f	1172,58mm ²	Min	110,700000							
f _r	500	f _r	434,75			M _{rd}	474,5310							
C _a	0,8695	a	85,7											
f _{td}	434,75	strengt reduction	0,5500											
E _r	200 000	FRP brudd				∅		32	25	20	16	12	10	
D _{tb}	0,028946					A _{s,red}	1172,58mm ²	Av	804,25	490,87	314,16	201,06	113,10	78,54
f _{ck}	45					A _s	1172,58mm ²	cc _{neg}	686	419	268	172	97	67
f _{td}	25,50					h	300							
E _{cm}	36000					b	1000							
							d	230						

GFRP														
Materialfaktorer			Faktiske verdier (ved betongkusing)			Tverrsnittparametere			Lastbetingelser			Karakteristiske laster		
E _{cu3}	0,35 %	D _r	0,006717953	h	295,690108	q _{ED}	16,61887511	G	7,09656259					
E _{su}	1,57 %	D _r /D _{tb}	0,894655968	b	1000	P _{ED}	450	Q	5,4					
α _{fb}	0,181920904	E _c	FRP brudd	d	255,690108	L	1,25	P	300					
λ	0,8	E _r	1,574 %			Med	110,700							
η	1	α	0,181921	A _f	1172,58mm ²	Min	201,2727273							
f _r	724	f _r	724,00			∅Min	110,700000							
C _a	1	a	37,2											
f _{td}	724	strengt reduction	0,550000											
E _r	46 000	FRP brudd				∅		32	25	20	16	12	10	
D _{tb}	0,005126					A _{s,red}	1172,58mm ²	Av	804,25	490,87	314,16	201,06	113,10	78,54
f _{ck}	45					A _s	1172,58mm ²	cc _{neg}	686	419	268	172	97	67
f _{td}	25,50					h	295,690108							
E _{cm}	36000					b	1000							
							d	260,690108						

CFRP														
Materialfaktorer			Faktiske verdier (ved betongkusing)			Tverrsnittparametere			Lastbetingelser			Karakteristiske laster		
E _{cu3}	0,35 %	D _r	0,006717953	h	214,5449267	q _{ED}	14,27889389	G	5,14907824					
E _{su}	1,67 %	D _r /D _{tb}	3,92604171	b	1000	P _{ED}	450	Q	5,4					
α _{fb}	0,173461231	E _c	0,350 %	d	174,5449267	L	1,25	P	300					
λ	0,8	E _r	0,767 %			Med	110,700							
η	1	α	0,313283	A _f	1172,58mm ²	Min	170,3076917							
f _r	2068	f _r	951,33			∅Min	110,6999996							
C _a	1	a	43,7											
f _{td}	2068	strengt reduction	0,650000											
E _r	124 000	Betong knusing				∅		32	25	20	16	12	10	
D _{tb}	0,001711					A _{s,red}	1172,58mm ²	Av	804,25	490,87	314,16	201,06	113,10	78,54
f _{ck}	45					A _s	1172,58mm ²	cc _{neg}	686	419	268	172	97	67
f _{td}	25,50					h	214,5449267							
E _{cm}	36000					b	1000							
							d	179,5449267						

AFRP														
Materialfaktorer			Faktiske verdier (ved betongkusing)			Tverrsnittparametere			Lastbetingelser			Karakteristiske laster		
E _{cu3}	0,35 %	D _r	0,005794728	h	242,3537086	q _{ED}	15,07978681	G	5,81648901					
E _{su}	1,80 %	D _r /D _{tb}	2,041545851	b	1000	P _{ED}	450	Q	5,4					
α _{fb}	0,162790698	E _c	0,350 %	d	202,3537086	L	1,25	P	300					
λ	0,8	E _r	1,213 %			Med	110,700							
η	1	α	0,223944	A _f	1172,58mm ²	Min	170,3076918							
f _r	1300	f _r	788,38			∅Min	110,6999997							
C _a	0,9	a	36,3											
f _{td}	1170	strengt reduction	0,650000											
E _r	65 000	Betong knusing				∅		32	25	20	16	12	10	
D _{tb}	0,002838					A _{s,red}	1172,58mm ²	Av	804,25	490,87	314,16	201,06	113,10	78,54
f _{ck}	45					A _s	1172,58mm ²	cc _{neg}	686	419	268	172	97	67
f _{td}	25,50					h	242,3537086							
E _{cm}	36000					b	1000							
							d	207,3537086						

BFRP														
Materialfaktorer			Faktiske verdier (ved betongkusing)			Tverrsnittparametere			Lastbetingelser			Karakteristiske laster		
E _{cu3}	0,35 %	D _r	0,005247972	h	263,4357605	q _{ED}	15,6869499	G	6,32245825					
E _{su}	2,00 %	D _r /D _{tb}	1,520000871	b	1000	P _{ED}	450	Q	5,4					
α _{fb}	0,14893617	E _c	0,350 %	d	223,4357605	L	1,25	P	300					
λ	0,8	E _r	1,592 %			Med	110,700							
η	1	α	0,180215	A _f	1172,58mm ²	Min	170,3076919							
f _r	1100	f _r	700,53			∅Min	110,6999997							
C _a	0,8	a	32,2											
f _{td}	880	strengt reduction	0,650000											
E _r	44 000	Betong knusing				∅		32	25	20	16	12	10	
D _{tb}	0,003453					A _{s,red}	1172,58mm ²	Av	804,25	490,87	314,16	201,06	113,10	78,54
f _{ck}	45					A _s	1172,58mm ²	cc _{neg}	686	419	268	172	97	67
f _{td}	25,50					h	263,4357605							
E _{cm}	36000					b	1000							
							d	228,4357605						

STÅL

E_c :	200000	η_{kon} :	5,55555556	$E_{z,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00450994	η_{lang} :	16,66666667
A_c :	1172,6	$\alpha_{bruks,kon}$:	0,20019623	$\alpha_{bruks,lang}$:	0,319778925
G_k (kN/m):	7,50	$I_{pl,ok,kon}$:	328706411	$I_{rel,lang}$:	802858645,5
Q_k (kN/m):	5,40	d :	260	El_{lang} :	9,6343E+12
P_k (kN)	300,00	φ :	2		
L (m):	1,25				
Langtidsfraksj:	0,5				
		δ_{kon} (mm):	1,1	δ_{tot} (mm):	1,1
		δ_{lang} (mm):	0,0		
		δ_{xrp} (mm):	0,0		

GFRP

E_c :	46000	η_{kon} :	1,27777778	$E_{z,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00458596	η_{lang} :	3,833333333
A_c :	1172,6	$\alpha_{bruks,kon}$:	0,10255609	$\alpha_{bruks,lang}$:	0,170750162
G_k (kN/m):	7,10	$I_{pl,ok,kon}$:	84904063,9	$I_{rel,lang}$:	229818018,7
Q_k (kN/m):	5,40	El_{kon} :	3,0565E+12	El_{lang} :	2,75782E+12
P_k (kN)	300,00	d :	255,690108		
L (m):	1,25	φ :	2		
Langtidsfraksj:	0,5				
		δ_{kon} (mm):	4,1	δ_{tot} (mm):	4,2
		δ_{lang} (mm):	0,1		
		δ_{xrp} (mm):	0,0		

CFRP

E_c :	124000	η_{kon} :	3,44444444	$E_{z,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00671795	η_{lang} :	10,33333333
A_c :	1172,6	$\alpha_{bruks,kon}$:	0,19322737	$\alpha_{bruks,lang}$:	0,309601828
G_k (kN/m):	5,15	$I_{pl,ok,kon}$:	92878453	$I_{rel,lang}$:	228556740
Q_k (kN/m):	5,40	El_{kon} :	3,3436E+12	El_{lang} :	2,74268E+12
P_k (kN)	300,00	d :	174,544927		
L (m):	1,25	φ :	2		
Langtidsfraksj:	0,5				
		δ_{kon} (mm):	3,8	δ_{tot} (mm):	3,8
		δ_{lang} (mm):	0,1		
		δ_{xrp} (mm):	0,0		

AFRP

E_c :	65000	η_{kon} :	1,80555556	$E_{z,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00579473	η_{lang} :	5,416666667
A_c :	1172,6	$\alpha_{bruks,kon}$:	0,13457134	$\alpha_{bruks,lang}$:	0,221122148
G_k (kN/m):	5,82	$I_{pl,ok,kon}$:	71660033,7	$I_{rel,lang}$:	187636014,9
Q_k (kN/m):	5,40	El_{kon} :	2,5798E+12	El_{lang} :	2,25163E+12
P_k (kN)	300,00	d :	202,353709		
L (m):	1,25	φ :	2		
Langtidsfraksj:	0,5				
		δ_{kon} (mm):	4,9	δ_{tot} (mm):	5,0
		δ_{lang} (mm):	0,1		
		δ_{xrp} (mm):	0,0		

BFRP

E_c :	44000	η_{kon} :	1,22222222	$E_{z,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00524797	η_{lang} :	3,666666667
A_c :	1172,6	$\alpha_{bruks,kon}$:	0,10702971	$\alpha_{bruks,lang}$:	0,177875179
G_k (kN/m):	6,32	$I_{pl,ok,kon}$:	61611171,4	$I_{rel,lang}$:	166002151,1
Q_k (kN/m):	5,40	El_{kon} :	2,218E+12	El_{lang} :	1,99203E+12
P_k (kN)	300,00	d :	223,43576		
L (m):	1,25	φ :	2		
Langtidsfraksj:	0,5				
		δ_{kon} (mm):	5,7	δ_{tot} (mm):	5,8
		δ_{lang} (mm):	0,1		
		δ_{xrp} (mm):	0,0		

Stål									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkning)		Tverrsnittsparetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	D_r	0,004005823	h	332,82375	Q_{ep}	17,685324	G	7,98777
E_{tu}	0,22 %	$D_r D_{fb}$	0,138389547	b	1000	P_{ep}	450	Q	5,4
α_b	0,616875964	E_c	FRP brudd	d	292,82375	L	1,25	P	300
λ	0,8	E_r	0,217 %	A_r	1173,00mm ²	Med	74,600		
η	1	α	0,412000			Mn	124,7195073		
f_r	500	f_r	434,75			M_{id}	601,9085		
C_a	0,8695	a	96,5						
$f_{r,d}$	434,75	strenght reduction	0,5500						
E_r	200 000	FRP brudd							
D_{fb}	0,028946								
f_{ok}	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

GFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkning)		Tverrsnittsparetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	D_r	0,002298109	h	550,4196295	Q_{ep}	23,95208533	G	13,2100711
E_{tu}	1,57 %	$D_r D_{fb}$	0,448328593	b	1000	P_{ep}	450	Q	5,4
α_b	0,181920904	E_c	FRP brudd	d	510,4196295	L	1,25	P	300
λ	0,8	E_r	1,574 %	A_r	1173,00mm ²	Med	74,600		
η	1	α	0,181921			Mn	401,9316336		
f_r	724	f_r	724,00			ϕMn	221,0623985		
C_a	1	a	74,3						
$f_{r,d}$	724	strenght reduction	0,550000						
E_r	46 000	FRP brudd							
D_{fb}	0,005126								
f_{ok}	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

CFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkning)		Tverrsnittsparetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	D_r	0,005820209	h	241,5391618	Q_{ep}	15,05632786	G	5,79693988
E_{tu}	1,67 %	$D_r D_{fb}$	3,401390599	b	1000	P_{ep}	450	Q	5,4
α_b	0,173461231	E_c	0,350 %	d	201,5391618	L	1,25	P	300
λ	0,8	E_r	0,835 %	A_r	1173,00mm ²	Med	74,600		
η	1	α	0,295377			Mn	215,8343846		
f_r	2068	f_r	1 035,31			ϕMn	140,2923500		
C_a	1	a	47,6						
$f_{r,d}$	2068	strenght reduction	0,650000						
E_r	124 000	Betong knusing							
D_{fb}	0,001711								
f_{ok}	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

AFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkning)		Tverrsnittsparetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	D_r	0,00318944	h	407,7762008	Q_{ep}	19,84395458	G	9,78662882
E_{tu}	1,80 %	$D_r D_{fb}$	1,123674434	b	1000	P_{ep}	450	Q	5,4
α_b	0,162790698	E_c	0,350 %	d	367,7762008	L	1,25	P	300
λ	0,8	E_r	1,689 %	A_r	1173,00mm ²	Med	74,600		
η	1	α	0,171649			Mn	441,1091531		
f_r	1300	f_r	1 097,88			ϕMn	256,2485154		
C_a	0,9	a	50,5						
$f_{r,d}$	1170	strenght reduction	0,580919						
E_r	65 000	Betong knusing (Transition)							
D_{fb}	0,002838								
f_{ok}	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

BFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier (ved betongkning)		Tverrsnittsparetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	D_r	0,002197183	h	573,8653015	Q_{ep}	24,62732068	G	13,7727672
E_{tu}	2,00 %	$D_r D_{fb}$	0,636383103	b	1000	P_{ep}	450	Q	5,4
α_b	0,14893617	E_c	FRP brudd	d	533,8653015	L	1,25	P	300
λ	0,8	E_r	2,000 %	A_r	1173,00mm ²	Med	74,600		
η	1	α	0,148936			Mn	518,2469926		
f_r	1100	f_r	880,00			ϕMn	285,0358459		
C_a	0,8	a	63,6						
$f_{r,d}$	880	strenght reduction	0,550000						
E_r	44 000	FRP brudd							
D_{fb}	0,003453								
f_{ok}	45								
f_{cd}	25,50								
E_{cm}	36000								

STÅL

E_s :	200000	η_{kort} :	5,55555556	$E_{s,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00400582	η_{lang} :	16,66666667
A_s :	1173,0	$\alpha_{bruk,kort}$:	0,18988785	$\alpha_{bruk,lang}$:	0,304699361
G_k (kN/m):	7,99	b :	1000	$I_{siv,kort}$:	1047171818
Q_k (kN/m):	5,40	d :	292,82375	EI_{kort} :	1,5265E+13
P_k (kN):	300,00	φ :	2	δ_{kort} (mm):	0,8
L (m):	1,25			δ_{lang} (mm):	0,0
Langtidsfraksj:	0,5			δ_{kryp} (mm):	0,0
				δ_{tot} (mm):	0,9

GFRP

E_s :	46000	η_{kort} :	1,27777778	$E_{s,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00229811	η_{lang} :	3,833333333
A_s :	1173,0	$\alpha_{bruk,kort}$:	0,07375491	$\alpha_{bruk,lang}$:	0,124218558
G_k (kN/m):	13,21	b :	1000	$I_{siv,kort}$:	983466778,6
Q_k (kN/m):	5,40	d :	510,419629	EI_{kort} :	1,2701E+13
P_k (kN):	300,00	φ :	2	δ_{kort} (mm):	1,0
L (m):	1,25			δ_{lang} (mm):	0,0
Langtidsfraksj:	0,5			δ_{kryp} (mm):	0,0
				δ_{tot} (mm):	1,1

CFRP

E_s :	124000	η_{kort} :	3,44444444	$E_{s,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00582021	η_{lang} :	10,33333333
A_s :	1173,0	$\alpha_{bruk,kort}$:	0,18119046	$\alpha_{bruk,lang}$:	0,291854141
G_k (kN/m):	5,80	b :	1000	$I_{siv,kort}$:	314724725,9
Q_k (kN/m):	5,40	d :	201,539162	EI_{kort} :	4,5453E+12
P_k (kN):	300,00	φ :	2	δ_{kort} (mm):	2,8
L (m):	1,25			δ_{lang} (mm):	0,1
Langtidsfraksj:	0,5			δ_{kryp} (mm):	0,0
				δ_{tot} (mm):	2,8

AFRP

E_s :	65000	η_{kort} :	1,80555556	$E_{s,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00318944	η_{lang} :	5,416666667
A_s :	1173,0	$\alpha_{bruk,kort}$:	0,10171493	$\alpha_{bruk,lang}$:	0,169407365
G_k (kN/m):	9,79	b :	1000	$I_{siv,kort}$:	673506142,2
Q_k (kN/m):	5,40	d :	367,776201	EI_{kort} :	8,9498E+12
P_k (kN):	300,00	φ :	2	δ_{kort} (mm):	1,4
L (m):	1,25			δ_{lang} (mm):	0,0
Langtidsfraksj:	0,5			δ_{kryp} (mm):	0,0
				δ_{tot} (mm):	1,5

BFRP

E_s :	44000	η_{kort} :	1,22222222	$E_{s,lang}$:	12000
E_{cm} :	36000	ρ :	0,00219718	η_{lang} :	3,666666667
A_s :	1173,0	$\alpha_{bruk,kort}$:	0,07065011	$\alpha_{bruk,lang}$:	0,119134789
G_k (kN/m):	13,77	b :	1000	$I_{siv,kort}$:	1036916952
Q_k (kN/m):	5,40	d :	533,865301	EI_{kort} :	1,3349E+13
P_k (kN):	300,00	φ :	2	δ_{kort} (mm):	1,0
L (m):	1,25			δ_{lang} (mm):	0,0
Langtidsfraksj:	0,5			δ_{kryp} (mm):	0,0
				δ_{tot} (mm):	1,0

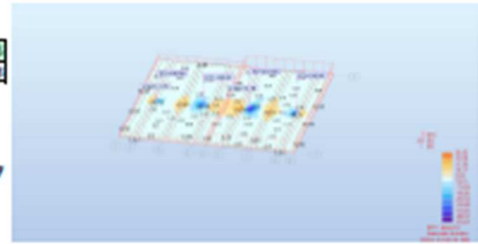
STÅL

w	0,3
k _b	1
c _c	45
E _s	200000
A _s	1173
d	292,82375
h	332,82375

η	0,30469936
M _{bruk}	56
f _{yk}	181,467041
β	1,19646313
d _{c,max}	138

d _c (mm)	55
s _{y,max} (mm)	268

Mbruks for stål: $\psi = 0,7$

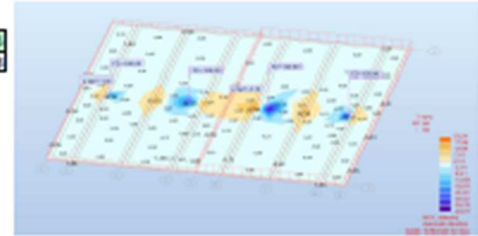


GFRP

w	0,5
k _b	1,4
c _c	45
E _s	46000
A _s	1173
d	510,419629
h	550,419629

η	0,12421856
M _{bruk}	56
f _{yk}	97,5726331
β	1,08948225
d _{c,max}	77

d _c (mm)	55
s _{y,max} (mm)	268



M_{bruks} for FRP: $\psi = 0,5$

CFRP

w	0,5
k _b	1,4
c _c	45
E _s	124000
A _s	1173
d	201,539162
h	241,539162

η	0,29185414
M _{bruk}	56
f _{yk}	262,409631
β	1,28027078
d _{c,max}	66

d _c (mm)	55
s _{y,max} (mm)	268

AFRP

w	0,5
k _b	1,4
c _c	45
E _s	65000
A _s	1173
d	367,776201
h	407,776201

η	0,16940736
M _{bruk}	56
f _{yk}	137,578407
β	1,13094481
d _{c,max}	75

d _c (mm)	55
s _{y,max} (mm)	268

BFRP

w	0,5
k _b	1,4
c _c	45
E _s	44000
A _s	1173
d	533,865301
h	573,865301

η	0,11913479
M _{bruk}	56
f _{yk}	93,1229308
β	1,08506872
d _{c,max}	78

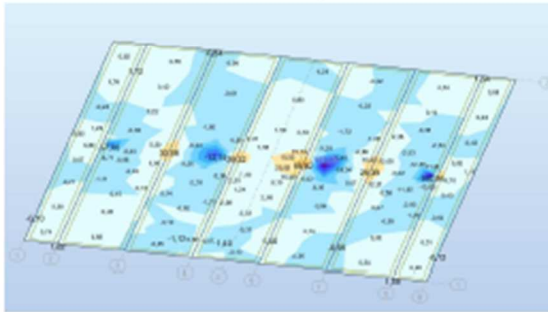
d _c (mm)	55
s _{y,max} (mm)	268

Låst tversnitt:

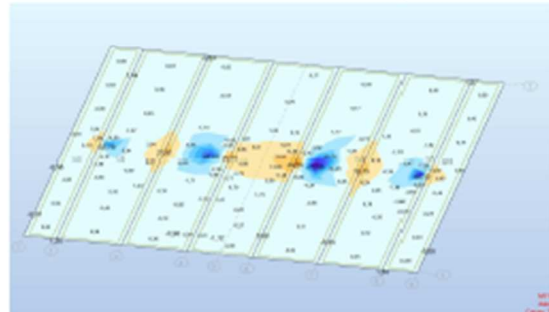
Bruddgrense						Ved låst tversnitt: h=300
ØMn=110,7KNm/m						
	stål ($\alpha=0,412$)	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
$A_{s,t}$	1173	1153	402	708	940	
CC	268	273	782	444	335	
α	0,412	0,182	0,173	0,163	0,152	
δ	1,1	4,2	4,4	4,7	5,2	

Bruksgrense						Ved låst tversnitt: h=300
ØMn=74,6KNm/m						
	stål ($\alpha=0,412$)	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	
$A_{s,t}$	790mm ²	1347mm ²	500mm ²	954mm ²	1409mm ²	
CC	398 mm	234 mm	629 mm	330 mm	224 mm	
α	0,412	0,183	0,183	0,183	0,183	
δ	1,5 mm	3,6 mm	3,6 mm	3,6 mm	3,6 mm	
Riss	OK med 1173	OK	ikke OK	ikke OK	OK	
Nød. $A_{s,t}$ for riss	1150 mm		806 mm	1120 mm		
CC	274 mm		390 mm	281 mm		

Brudd: Lastfaktor=1,0



Bruks: Lastfaktor=1,0



STÅL

φ (mm):		E,armering:	20000	η _k kort:	5,5555556	E,c,lang:	12000
Antall stenger:		E,c:	36000	ρ:	0,00450994	η _l lang:	16,66666667
g,k (kN/m):	7,50	A,armering:	1172,6	α _b bruks,kort:	0,20019623	α _b bruks,lang:	0,319778925
q,k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort:}	328706411	I _{ekv, lang:}	802858645,5
P,k (kN)	300	d:	260	EI _{kort:}	1,1833E+13	EI _{lang:}	9,6343E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	1,1	δ _{tot} (mm):	1,1
				δ _{lang} (mm):	0,0		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

GFRP

φ (mm):		E,armering:	46000	η _k kort:	1,27777778	E,c,lang:	12000
Antall stenger:		E,c:	36000	ρ:	0,00443518	η _l lang:	3,833333333
g,k (kN/m):	7,20	A,armering:	1153,1	α _b bruks,kort:	0,10094647	α _b bruks,lang:	0,168179766
q,k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort:}	86538094,9	I _{ekv, lang:}	234629147,6
P,k (kN)	300	d:	260	EI _{kort:}	3,1154E+12	EI _{lang:}	2,81555E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	4,0	δ _{tot} (mm):	4,2
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

CFRP

φ (mm):		E,armering:	124000	η _k kort:	3,44444444	E,c,lang:	12000
Antall stenger:		E,c:	36000	ρ:	0,0015471	η _l lang:	10,33333333
g,k (kN/m):	7,20	A,armering:	402,2	α _b bruks,kort:	0,09804506	α _b bruks,lang:	0,163537434
q,k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort:}	81716714,2	I _{ekv, lang:}	222218499,1
P,k (kN)	300	d:	260	EI _{kort:}	2,9418E+12	EI _{lang:}	2,66662E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	4,3	δ _{tot} (mm):	4,4
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

AFRP

φ (mm):		E,armering:	65000	η _k kort:	1,80555556	E,c,lang:	12000
Antall stenger:		E,c:	36000	ρ:	0,00272204	η _l lang:	5,416666667
g,k (kN/m):	7,20	A,armering:	707,7	α _b bruks,kort:	0,09435126	α _b bruks,lang:	0,157610423
q,k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort:}	75771750,4	I _{ekv, lang:}	206834158
P,k (kN)	300	d:	260	EI _{kort:}	2,7278E+12	EI _{lang:}	2,48201E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	4,6	δ _{tot} (mm):	4,7
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

BFRP

φ (mm):		E,armering:	44000	η _k kort:	1,22222222	E,c,lang:	12000
Antall stenger:		E,c:	36000	ρ:	0,00361608	η _l lang:	3,666666667
g,k (kN/m):	7,20	A,armering:	940,2	α _b bruks,kort:	0,08970173	α _b bruks,lang:	0,150123124
q,k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort:}	68597443,7	I _{ekv, lang:}	188143872,4
P,k (kN)	300	d:	260	EI _{kort:}	2,4695E+12	EI _{lang:}	2,25773E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	5,1	δ _{tot} (mm):	5,2
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

STÅL

φ (mm):		E,armering:	200000	η _{kort} :	5,55555556	E _{c,lang} :	12000
Antall stenger:		E _c :	36000	p:	0,00487027	η _{lang} :	16,66666667
g _k (kN/m):	7,50	A,armering:	1266,3	α _{bruks,kort} :	0,20713554	α _{bruks,lang} :	0,329841033
q _k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort} :	351016783	I _{ekv, lang} :	850972007,7
P _k (kN)	300	d:	260	EI _{kort} :	1,2637E+13	EI _{lang} :	1,02117E+13
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	1,0	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	1,0
				δ _{lang} (mm):	0,0		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

GFRP

φ (mm):		E,armering:	46000	η _{kort} :	1,27777778	E _{c,lang} :	12000
Antall stenger:		E _c :	36000	p:	0,00711722	η _{lang} :	3,833333333
g _k (kN/m):	7,20	A,armering:	1850,5	α _{bruks,kort} :	0,1260766	α _{bruks,lang} :	0,207897435
q _k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort} :	133817509	I _{ekv, lang} :	353507330,3
P _k (kN)	300	d:	260	EI _{kort} :	4,8174E+12	EI _{lang} :	4,24209E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	2,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	2,7
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

CFRP

φ (mm):		E,armering:	124000	η _{kort} :	3,44444444	E _{c,lang} :	12000
Antall stenger:		E _c :	36000	p:	0,00385344	η _{lang} :	10,33333333
g _k (kN/m):	7,20	A,armering:	1001,9	α _{bruks,kort} :	0,15019589	α _{bruks,lang} :	0,245178025
q _k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort} :	188321507	I _{ekv, lang} :	485093456,8
P _k (kN)	300	d:	260	EI _{kort} :	6,7796E+12	EI _{lang} :	5,82112E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	1,9	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	1,9
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

AFRP

φ (mm):		E,armering:	65000	η _{kort} :	1,80555556	E _{c,lang} :	12000
Antall stenger:		E _c :	36000	p:	0,00560578	η _{lang} :	5,416666667
g _k (kN/m):	7,20	A,armering:	1457,5	α _{bruks,kort} :	0,13251627	α _{bruks,lang} :	0,217932175
q _k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort} :	147505472	I _{ekv, lang} :	387060822,7
P _k (kN)	300	d:	260	EI _{kort} :	5,3102E+12	EI _{lang} :	4,64473E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	2,4	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	2,4
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

BFRP

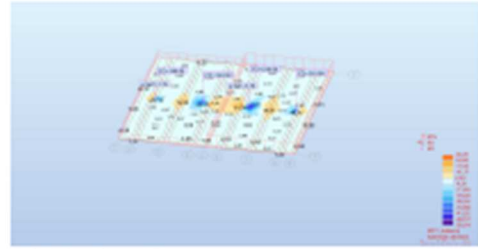
φ (mm):		E,armering:	44000	η _{kort} :	1,22222222	E _{c,lang} :	12000
Antall stenger:		E _c :	36000	p:	0,00744073	η _{lang} :	3,666666667
g _k (kN/m):	7,20	A,armering:	1934,6	α _{bruks,kort} :	0,1260766	α _{bruks,lang} :	0,207897433
q _k (kN/m):	5,40	b:	1000	I _{ekv, kort} :	133817506	I _{ekv, lang} :	353507322,5
P _k (kN)	300	d:	260	EI _{kort} :	4,8174E+12	EI _{lang} :	4,24209E+12
L (m):	1,25	φ:	2				
Langtidsfraksj	0,5						
				δ _{kort} (mm):	2,6	δ <sub,tot< sub=""> (mm):</sub,tot<>	2,7
				δ _{lang} (mm):	0,1		
				δ _{kryp} (mm):	0,0		

STÅL

w	0,5
k,b	1
c,r	45
C,x	200000
A,x	1266,36946
d	260
h	300

α	0,32984105
M,bruk	50
f,ax	191,105279
β	1,22956666
d _{c, max}	128

d _c (mm)	50
s,max (mm)	249



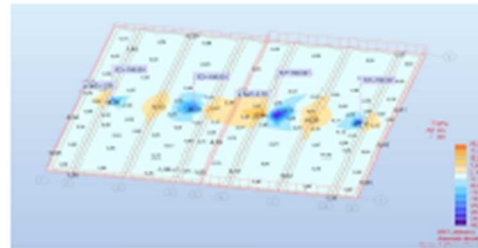
M_{bruk} for ståll: $\psi = 0,7$

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,r	45
C,x	46000
A,x	1850,47665
d	260
h	300

α	0,20789744
M,bruk	50
f,ax	125,060729
β	1,19422504
d _{c, max}	50

d _c (mm)	50
s,max (mm)	184



M_{bruk} for FRP: $\psi = 0,5$

CFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,r	45
C,x	124000
A,x	1001,89328
d	260
h	300

α	0,24517802
M,bruk	50
f,ax	234,110522
β	1,20381178
d _{c, max}	79

d _c (mm)	50
s,max (mm)	314

AFRP

w	0,5
k,b	1,4
c,r	45
C,x	65000
A,x	1457,50325
d	260
h	300

α	0,21793218
M,bruk	50
f,ax	159,352429
β	1,19671715
d _{c, max}	61

d _c (mm)	50
s,max (mm)	216

CFRP

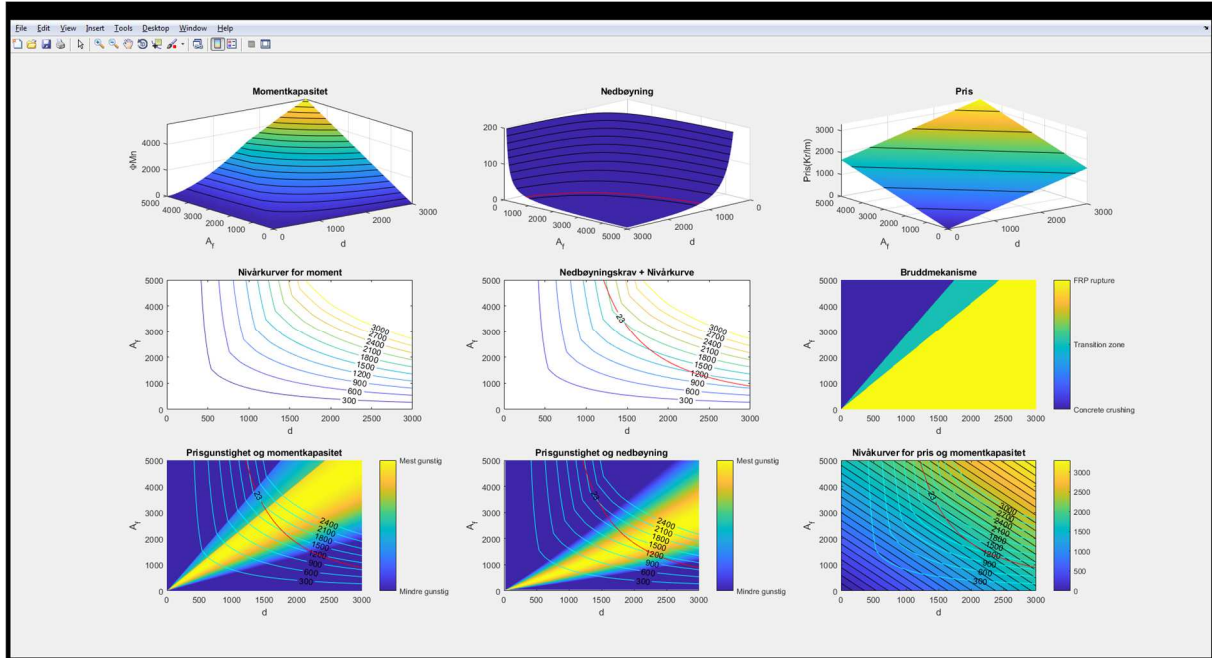
w	0,5
k,b	1,4
c,r	45
C,x	46000
A,x	1934,58918
d	260
h	300

α	0,20789743
M,bruk	50
f,ax	119,623309
β	1,19422504
d _{c, max}	50

d _c (mm)	50
s,max (mm)	184

Vedlegg H – MATLAB skript

For FRP-armerte tverrsnitt:



Mkap:

```
% Momentkapasitet til GFRP armert tverrsnitt
ffu=724; %bruddstyrke til armering
Ef=46000; %E-modulen til armeringen
Eps=0.0035; %Bruddtøyning til betong
Ec=36000; %E-modul til betong
fi=2; %kryptall til betong
Ld=0.8; %Lamda
Eta=1; %Etta
Fcd=25.5; %bruddspenning til betong
b=400; %bredde til tverrsnittet
c=80; %overdekning (h-d)
Gp=7.5*1.25; %påført egenlast
Q=6.75; %nyttelast
P=300; %Punktlast
Lf=0.5; %Langtidsfraksjon
l=8000; %spennvidde i mm
%LK=1/350; %Nedbøyningskrav må skrives manuelt i make_plot
Af_pris=0.33245; %Pris for armering (kr/mm^2)
Bc_pris=1365; %pris for betong (kr/m^3)
```

```
d=0:10:3000;
Af=1:20:5000;
```

```
[ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix(d, Af, Ef, Eps, Ld, Fcd, b, Eta,
ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris);
figure()
make_plot(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
```

```
% Momentkapasitet til CFRP armert tverrsnitt
ffu=2068; %bruddstyrke til armering
Ef=124000; %E-modulen til armeringen
Eps=0.0035; %Bruddtøyning til betong
Ec=38000; %E-modul til betongc
fi=2; %kryptall til betong
Ld=0.8; %Lamda
```

Vedlegg H-1

```

Eta=1; %Etta
Fcd=25.5; %bruddspenning til betong
b=400; %bredden til tverrsnittet
c=80; %overdekning (h-d)
Gp=7.5*1.25; %påført egenlast
Q=6.75; %nyttelast
P=300; %Punktlast
Lf=0.5; %Langtidsfraksjon
l=8000; %spennvidde i mm
LK=1/350; %Nedbøyningskrav må skrives manuelt i make_plot
Af_pris=1.108; %Pris for armering (kr/mm^2)
Bc_pris=1365; %pris for betong (kr/m^3)

[ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix(d, Af, Ef, Eps, Ld, Fcd, b, Eta,
ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris);
figure()
make_plot(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
% Momentkapasitet til AFRP armert tverrsnitt
ffu=1170; %bruddstyrke til armering
Ef= 65000; %E-modulen til armeringen
Eps=0.0035; %Bruddtøyning til betong
Ec=38000; %E-modul til betong
fi=2; %kryptall til betong
Ld=0.8; %Lamda
Eta=1; %Etta
Fcd=25.5; %bruddspenning til betong
b=400; %bredden til tverrsnittet
c=80; %overdekning (h-d)
Gp=7.5*1.25; %påført egenlast
Q=6.75; %nyttelast
P=300; %Punktlast
Lf=0.5; %Langtidsfraksjon
l=8000; %spennvidde i mm
LK=1/350; %Nedbøyningskrav må skrives manuelt i make_plot
Af_pris=1.108; %Pris for armering (kr/mm^2)
Bc_pris=1365; %pris for betong (kr/m^3)

[ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix(d, Af, Ef, Eps, Ld, Fcd, b, Eta,
ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris);
figure()
make_plot(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
% Momentkapasitet til BFRP armert tverrsnitt
ffu=880; %dimensjonerende bruddstyrke til armering
Ef= 44000; %E-modulen til armeringen
Eps=0.0035; %Bruddtøyning til betong
Ec=36000; %E-modul til betong
fi=2; %kryptall til betong
Ld=0.8; %Lamda
Eta=1; %Etta
Fcd=25.5; %bruddspenning til betong
b=400; %bredden til tverrsnittet
c=80; %overdekning (h-d)
Gp=7.5*1.25; %påført egenlast
Q=6.75; %nyttelast
P=300; %Punktlast
Lf=0.5; %Langtidsfraksjon
l=8000; %spennvidde i mm
LK=1/350; %Nedbøyningskrav må skrives manuelt i make_plot
Af_pris=0.17395; %Pris for armering (kr/mm^2)
Bc_pris=1365; %pris for betong (kr/m^3)

[ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix(d, Af, Ef, Eps, Ld, Fcd, b, Eta,
ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris);
figure()
make_plot(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)

```

make_plot:

```
function make_plot(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
    [XXX, YYY] = meshgrid(d, Af);

    subplot(3,3,1)
    surf(XXX, YYY, ZZ, 'EdgeColor', 'none')
    title('Momentkapasitet')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');
    zlabel('\Phi Mn');
    box on
    hold on
    contour3(XXX,YYY,ZZ,300:300:10000,'k')

    subplot(3,3,2)
    surf(XXX, YYY, delta, 'EdgeColor', 'none')
    zlim([0 200])
    view(135, 30)
    hold on
    contour3(XXX, YYY, delta, 0:20:200, 'k')
    hold on
    contour3(XXX, YYY, delta,[23 23],'red')
    title('Nedbøyning')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');

    subplot(3,3,3)
    surf(XXX,YYY,Pris, 'EdgeColor', 'none')
    hold on
    contour3(XXX, YYY, Pris,'k')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');
    zlabel('Pris(Kr/lm)');
    title('Pris')

    subplot(3,3,4)
    contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:3000, 'showtext','on','LabelSpacing',600)
    title('Nivårkurver for moment')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');

    subplot(3,3,5)
    contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:3000, 'showtext','on','LabelSpacing',600)
    hold on
    contour(XXX, YYY, delta,[23 23],'red','showtext','on','LabelSpacing',600)
    title('Nedbøyningskrav + Nivårkurve')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');

    subplot(3,3,6)
    h = pcolor(XXX, YYY, regime);
    set(h, 'EdgeColor', 'none')
    colorbar('Ticks',[0,1,2],'TickLabels',{'Concrete crushing','Transition
zone','FRP rupture'})
    title('Bruddmekanisme')
    ylabel('A_{f}');
    xlabel('d');

    subplot(3,3,7)
    [ax, ay] = gradient(ZZ);
    [Px,Py] = gradient(Pris);
    [ny, nx] = size(ZZ);
    KK = zeros(ny, nx);
    for i=1:nx
        for j=1:ny
            a = ([ax(j, i), ay(j, i)]/(sqrt((ax(j,i))^2+(ay(j,i))^2)));
```

```

        b = ([Px(j, i), Py(j, i)]/(sqrt((Px(j,i))^2+(Py(j,i))^2)));
        KK(j, i) = dot(a,b);
    end
end
PD = pcolor(XXX,YYY,KK);
shading flat
set(PD, 'EdgeColor', 'none')
colorbar('Ticks',[0.93 1], 'TickLabels', {'Mindre gunstig', 'Mest gunstig'})
caxis([0.93 1])
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:2400, 'c', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 600)
hold on
contour(XXX, YYY, delta, [23 23], 'red', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 600)
title('Prisgunstighet og momentkapasitet')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

```

```

subplot(3,3,8)
[dx, dy] = gradient(delta);
[Px,Py] = gradient(Pris);
[ndy, ndx] = size(delta);
DP = zeros(ndy, ndx);
for i=1:ndx
    for j=1:ndy
        d = ([dx(j, i), dy(j, i)]/(sqrt((dx(j,i))^2+(dy(j,i))^2)));
        b = ([Px(j, i), Py(j, i)]/(sqrt((Px(j,i))^2+(Py(j,i))^2)));
        DP(j, i) = dot(b,d);
    end
end
PD = pcolor(XXX,YYY,-DP);
shading flat
set(PD, 'EdgeColor', 'none')
colorbar()
colorbar('Ticks',[0.93 1], 'TickLabels', {'Mindre gunstig', 'Mest gunstig'})
caxis([0.93, 1])
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:2400, 'c', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 600)
hold on
contour(XXX, YYY, delta, [23 23], 'red', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 600)
title('Prisgunstighet og nedbøyning')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

```

```

subplot(3,3,9)
contourf(XXX, YYY, Pris, 0:100:10000)
colorbar()
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:3000, 'c', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 800)
hold on
contour(XXX, YYY, delta, [23 23], 'red', 'showtext', 'on', 'LabelSpacing', 600)
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');
title('Nivåkurver for pris og momentkapasitet')

```

end

Mn:

```

function [z, regime,delta,Pris] = Mn(d, Af, Ef, Eps, Ld, Fcd, b, Eta, ffu, c, Gp,
Q,P, Lf, l, Ec, fi,Af_pris,Bc_pris)
    Epsfu=ffu/Ef; %bruddtøyning til armering
    ab=Eps/(Eps+Epsfu); %alpha balansert
    rofb=Eta*Ld*(Fcd/ffu)*(Ef*Eps/(Ef*Eps+ffu)); %balansert armeringsforhold

    %shorthands
    x = d;

```

Vedlegg H-4

```

y = Af;

ff=((( ((Ef*Eps)^2)/4)+(Eta*Ld*Fcd*b*x*Ef*Eps/y))^0.5)-(0.5*Ef*Eps));

rof= y/(b*x*1);
Epsf=ff/Ef;

if (rof/rof_b)>=1.4
    z=0.65*y*ff*(x-((x*Ld*(Eps/(Eps+Epsf))/2)))*10^(-6);
    regime=0;
elseif (rof/rof_b)>=1
    z=(0.3+0.25*rof/rof_b)*y*ff*(x-((x*Ld*(Eps/(Eps+Epsf))/2)))*10^(-6);
    regime=1;
else
    z=0.55*y*ffu*(x-(x*Ld*ab)/2)*10^(-6);
    regime=2;
end

%Delta
h=d+c;           %Høyde til tverrsnitt
G=Gp+24*(b/1000)*(h/1000); %Egenlast til tverrsnitt
qk=G+Q;
ql=G+(Q*Lf);
Ecl=Ec/(1+fi);
eta_k=Ef/Ec;
eta_l=Ef/Ecl;
%beregninger
ro= Af/(b*d);
alpha_k= ((-2*eta_k*ro)+((2*eta_k*ro)^2+4*2*eta_k*ro)^0.5)/2;
alpha_l= ((-2*eta_l*ro)+((2*eta_l*ro)^2+4*2*eta_l*ro)^0.5)/2;
Iekv_k=((b*((alpha_k*d)^3))/12)+(b*alpha_k*d*((alpha_k*d/2)^2))+eta_k*Af*(d-
(alpha_k*d)^2);
Iekv_l=((b*((alpha_l*d)^3))/12)+(b*alpha_l*d*((alpha_l*d/2)^2))+eta_l*Af*(d-
(alpha_l*d)^2);
delta_k=((5*qk*(l^4))/(384*Ec*Iekv_k))+(P*1000*(l^3))/(48*Ec*Iekv_k);
delta_l=((5*ql*(l^4))/(384*Ecl*Iekv_l));
delta=(delta_k+delta_l);

%pris
Pris=Af_pris*Af+(Bc_pris*b*d/1000000);

%Dot
%a=gradient(Z)
%b=gradient(Pris)
%c=dot(a,b)
End

```

MnMatrix:

```

function [ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix(d_vector, Af_vector, Ef, Eps, Ld, Fcd,
b, Eta, ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris)

```

```

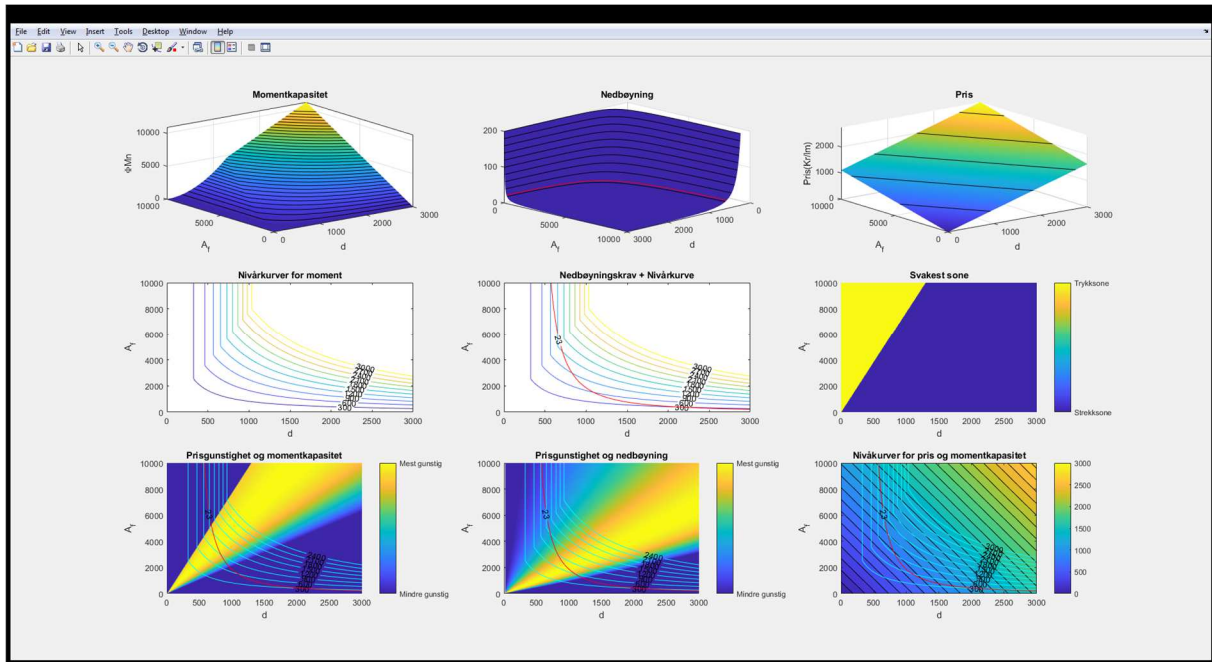
    XX=d_vector;
    YY=Af_vector;
    ZZ=zeros(numel(YY), numel(XX));
    regime=zeros(numel(YY), numel(XX));
    delta=zeros(numel(YY), numel(XX));
    Pris=zeros(numel(YY), numel(XX));

    for j=1:numel(YY)
        Af = YY(j);
        for i=1:numel(XX)
            d = XX(i);
            [ZZ(j, i), regime(j, i),delta(j,i),Pris(j,i)] = Mn(d, Af, Ef, Eps, Ld,
Fcd, b, Eta, ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris);
        end
    end
end

```

end

For stålarmerte tverrsnitt



Mkap steel:

```
%% Momentkapasitet til stål armert tverrsnitt B45
ffu=435; %bruddstyrke til armering
Ef=200000; %E-modulen til armeringen
Eps=0.0035; %Bruddtøyning til betong
Ec=36000; %E-modul til betong
alpha=0.412;
fi=2; %kryptall til betong
Ld=0.8; %Lamda
Eta=1; %Etta
Fcd=25.5; %bruddspenning til betong
b=400; %bredden til tverrsnittet
c=80; %overdekning (h-d)
Gp=7.5*1.25; %påført egenlast
Q=6.75; %nyttelast
P=300; %Punktlast
Lf=0.5; %Langtidsfraksjon
l=8000; %spennvidde i mm
%LK=1/350; %Nedbøyningskrav må skrives manuelt i make_plot
Af_pris=0.110817; %Pris for armering (kr/mm^2)
Bc_pris=1365; %pris for betong (kr/m^3)
```

```
d=0:10:3000;
Af=0:20:10000;
```

```
[ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix_steel(d, Af, Ef, Ld, Fcd, b, Eta,
ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l,Ec,fi,Af_pris,Bc_pris,alpha);
figure()
make_plot_steel(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
```

Make plot steel:

```
function make_plot_steel(d, Af, ZZ, regime,delta,Pris)
[XXX, YYY] = meshgrid(d, Af);

subplot(3,3,1)
surf(XXX, YYY, ZZ, 'EdgeColor', 'none')
```

Vedlegg H-6

```

title('Momentkapasitet')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');
zlabel('\PhiMn');
box on
hold on
contour3(XXX,YYY,ZZ,300:300:10000,'k')

subplot(3,3,2)
surf(XXX,YYY,delta,'EdgeColor','none')
zlim([0 200])
view(135,30)
hold on
contour3(XXX,YYY,delta,0:20:200,'k')
hold on
contour3(XXX,YYY,delta,[23 23],'red')
title('Nedbøyning')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,3)
surf(XXX,YYY,Pris,'EdgeColor','none')
hold on
contour3(XXX,YYY,Pris,'k')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');
zlabel('Pris(Kr/lm)');
title('Pris')

subplot(3,3,4)
contour(XXX,YYY,ZZ,300:300:3000,'showtext','on','LabelSpacing',600)
title('Nivåkurver for moment')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,5)
contour(XXX,YYY,ZZ,300:300:3000,'showtext','on','LabelSpacing',600)
hold on
contour(XXX,YYY,delta,[23 23],'red','showtext','on','LabelSpacing',600)
title('Nedbøyningskrav + Nivåkurve')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,6)
h = pcolor(XXX,YYY,regime);
set(h,'EdgeColor','none')
colorbar('Ticks',[0,1],'TickLabels',{'Strekksone','Trykksone'})
title('Svakest sone')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,7)
[ax, ay] = gradient(ZZ);
[Px,Py] = gradient(Pris);
[ny, nx] = size(ZZ);
KK = zeros(ny, nx);
for i=1:nx
    for j=1:ny
        a = ([ax(j,i), ay(j,i)])/(sqrt((ax(j,i))^2+(ay(j,i))^2));
        b = ([Px(j,i), Py(j,i)])/(sqrt((Px(j,i))^2+(Py(j,i))^2));
        KK(j,i) = dot(a,b);
    end
end
PD = pcolor(XXX,YYY,KK);
shading flat
set(PD,'EdgeColor','none')
colorbar('Ticks',[0.93 1],'TickLabels',{'Mindre gunstig','Mest gunstig'})

```

Vedlegg H-7

```

caxis([0.93 1])
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:2400,'c', 'showtext','on','LabelSpacing',600)
hold on
contour(XXX, YYY, delta,[23 23],'red','showtext','on','LabelSpacing',600)
title('Prisgunstighet og momentkapasitet')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,8)
[dx, dy] = gradient(delta);
[Px,Py] = gradient(Pris);
[ndy, ndx] = size(delta);
DP = zeros(ndy, ndx);
for i=1:ndx
    for j=1:ndy
        d = ([dx(j, i), dy(j, i)]/(sqrt((dx(j,i))^2+(dy(j,i))^2)));
        b = ([Px(j, i), Py(j, i)]/(sqrt((Px(j,i))^2+(Py(j,i))^2)));
        DP(j, i) = dot(b,d);
    end
end
PD = pcolor(XXX,YYY,-DP);
shading flat
set(PD, 'EdgeColor', 'none')
colorbar()
colorbar('Ticks',[0.93 1],'TickLabels',{'Mindre gunstig','Mest gunstig'})
caxis([0.93, 1])
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:2400,'c', 'showtext','on','LabelSpacing',600)
hold on
contour(XXX, YYY, delta,[23 23],'red','showtext','on','LabelSpacing',600)
title('Prisgunstighet og nedbøyning')
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');

subplot(3,3,9)
contourf(XXX, YYY, Pris,0:100:10000)
colorbar()
hold on
contour(XXX, YYY, ZZ, 300:300:3000,'c', 'showtext','on','LabelSpacing',800)
hold on
contour(XXX, YYY, delta,[23 23],'red','showtext','on','LabelSpacing',600)
ylabel('A_{f}');
xlabel('d');
title('Nivåkurver for pris og momentkapasitet')

```

end

Mn steel:

```

function [z, regime,delta,Pris] = Mn_steel(d, Af, Ef, Ld, Fcd, b, Eta, ffu, c, Gp,
Q,P, Lf, l, Ec, fi,Af_pris,Bc_pris,alpha)

```

```

Mcd=Ld*(1-(Ld*alpha/2))*alpha*b*d^2*Eta*Fcd *10^(-6);
Msd = ffu*Af*(1-(Ld*alpha/2))*d*10^(-6);

```

```

if Mcd > Msd
    z=Msd;
    regime=0;
else
    z=Mcd;
    regime=1;
end

```

%Delta

Vedlegg H-8


```

h=d+c;           %Høyde til tverrsnitt
G=Gp+25*(b/1000)*(h/1000); %Egenlast til tverrsnitt
qk=G+Q;
ql=G+(Q*Lf);
Ec1=Ec/(1+fi);
eta_k=Ef/Ec;
eta_l=Ef/Ec1;
%beregninger
ro= Af/(b*d);
alpha_k= ((-2*eta_k*ro)+((2*eta_k*ro)^2+4*2*eta_k*ro)^0.5)/2;
alpha_l= ((-2*eta_l*ro)+((2*eta_l*ro)^2+4*2*eta_l*ro)^0.5)/2;
Iekv_k=((b*((alpha_k*d)^3))/12)+(b*alpha_k*d*((alpha_k*d/2)^2))+eta_k*Af*(d-
(alpha_k*d)^2);
Iekv_l=((b*((alpha_l*d)^3))/12)+(b*alpha_l*d*((alpha_l*d/2)^2))+eta_l*Af*(d-
(alpha_l*d)^2);
delta_k=((5*qk*(l^4))/(384*Ec*Iekv_k))+(P*1000*(l^3))/(48*Ec*Iekv_k);
delta_l=((5*ql*(l^4))/(384*Ec1*Iekv_l));
delta=(delta_k+delta_l);
%pris
Pris=Af_pris*Af+(Bc_pris*b*d/1000000);
end

```

MnMatrix steel:

```

function [ZZ, regime,delta,Pris] = MnMatrix_steel(d_vector, Af_vector, Ef, Ld, Fcd,
b, Eta, ffu,c,Gp,Q,P,Lf,l, Ec,fi,Af_pris,Bc_pris,alpha)

XX=d_vector;
YY=Af_vector;
ZZ=zeros(numel(YY), numel(XX));
regime=zeros(numel(YY), numel(XX));
delta=zeros(numel(YY), numel(XX));
Pris=zeros(numel(YY), numel(XX));

for j=1:numel(YY)
    Af = YY(j);
    for i=1:numel(XX)
        d = XX(i);
        [ZZ(j, i), regime(j, i),delta(j,i),Pris(j,i)] = Mn_steel(d, Af, Ef, Ld,
Fcd, b, Eta, ffu, c, Gp, Q,P, Lf, l, Ec, fi,Af_pris,Bc_pris,alpha);
    end
end

end

```

Vedlegg I – Excel ark for prisoptimale tverrsnitt

Stål									
Materialfaktorer		Faktiske verdier		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,009995455	h	1340	q_{ED}	37,455	G	22,775
E_{fu}	0,218 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,345588641	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,616740088	ϵ_c	0,350 %	d	1100	L	8	P	300
λ	0,8	E_f	0,500 %	A_f	4398,00mm ²	Med	1 199,640		
η	1	α	0,4120			Mn	1 757,6307936		
f_f	500	f_f	435,00						
C_e	0,87	a	362,6						
f_{fd}	435							Ø 25	Ø 20
E_s	200 000							Ø 16	
ρ_{sb}	0,028923			$A_{s,red}$	4398,00mm ²		8,960	13,999	21,874
f_{ck}	45			A_s	4398,00mm ²		4417,86	4398,23	4423,36
f_{cd}	25,50			h	1057		9	14	22
E_{cm}	36000			b	400				
				d	977				

GFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,002225369	h	2110	q_{ED}	45,6822	G	29,631
E_{fu}	1,57 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,434138116	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,181920904	ϵ_c	1,574 %	d	2030	L	8	P	300
λ	0,8	E_f	1,574 %	A_f	1807,00mm ²	Med	1 265,458		
η	1	α	0,181921			Mn	2 462,5269867		
f_f	724	f_f	724,00			φMn	1 354,3898427		
C_e	1	a	295,4						
f_{fu}	724	φ	0,550000						
E_f	46 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,005126			$A_{s,red}$	1807,00mm ²		3,681	5,752	8,987
f_{ck}	45			A_s	1807,00mm ²		1963,50	1884,96	1809,56
f_{cd}	25,50			h	1057		4	6	9
E_{cm}	36000			b	400				
				d	977				

CFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier		Tverrsnittparametere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
E_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,000607301	h	2340	q_{ED}	48,3318	G	31,839
E_{fu}	1,67 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,354912959	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,173461231	ϵ_c	1,668 %	d	2260	L	8	P	300
λ	0,8	E_f	1,668 %	A_f	549,00mm ²	Med	1 286,654		
η	1	α	0,173461			Mn	2 387,8200980		
f_f	2068	f_f	2 068,00			φMn	1 313,3010539		
C_e	1	a	313,6						
f_{fu}	2068	φ	0,550000						
E_f	124 000	FRP brudd							
ρ_{fb}	0,001711			$A_{s,red}$	549,00mm ²		1,118	1,748	2,731
f_{ck}	45			A_s	549,00mm ²		981,75	628,32	603,19
f_{cd}	25,50			h	1057		2	2	3
E_{cm}	36000			b	400				
				d	977				

AFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,000740566	h	2730	q_{ED}	52,8246	G	35,583
ϵ_{fu}	1,80 %	ρ_f/ρ_{fb}	0,260909505	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,162790698	ϵ_c		d	2650	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	1,800 %	A_f	785,00mm ²	Med	1 322,597		
η	1	α	0,162791			Mn	2 275,4064767		
f_f	1300	f_f	1 170,00			ϕMn	1 251,4735622		
C_e	0,9	a	345,1						
f_{fu}	1170	ϕ	0,550000						
E_f	65 000	FRP brudd						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,002838					$A_{s,ned}$	785,00mm ²	1,599	2,499
f_{ck}	45					A_s	785,00mm ²	981,75	942,48
f_{cd}	25,50					h	1057	2	3
E_{cm}	36000					b	400		4
						d	977		

BFRP									
Materialfaktorer		Faktiske verdier		Tverrsnittsparemetere		Lastbetingelser		Karakteristiske laster	
ϵ_{cu3}	0,35 %	ρ_f	0,003631503	h	1810	q_{ED}	42,2262	G	26,751
ϵ_{fu}	2,00 %	ρ_f/ρ_{fb}	1,051813442	b	400	P_{ED}	450	Q	6,75
α_b	0,14893617	ϵ_c	0,350 %	d	1730	L	8	P	300
λ	0,8	ϵ_f	1,946 %	A_f	2513,00mm ²	Med	1 237,810		
η	1	α	0,152432			Mn	3 495,7176188		
f_f	1100	f_f	856,29			ϕMn	1 967,9259810		
C_e	0,8	a	211,0						
f_{fu}	880	ϕ	0,562953						
E_f	44 000	Betong knusing (Transition)						$\phi 25$	$\phi 20$
ρ_{fb}	0,003453					$A_{s,ned}$	2513,00mm ²	5,119	7,999
f_{ck}	45					A_s	2513,00mm ²	2945,24	2513,27
f_{cd}	25,50					h	1057	6	8
E_{cm}	36000					b	400		13
						d	977		

STÅL		E_c :	200000	η_{kon} :	5,55555556	$E_{c,lang}$:	12000
G_x (kN/m):	22,78	E_{cm} :	36000	ρ :	0,00999545	η_{lang} :	16,66666667
Q_x (kN/m):	6,75	A_c :	4398,0	$\alpha_{brusle,kon}$:	0,28232206	$\alpha_{brusle,lang}$:	0,434187211
P_x (kN)	300	b:	400	$I_{rel,kon}$:	1,9221E+10	$I_{rel,lang}$:	42920603075
L (m):	8	d:	1100	EI_{kon} :	6,9195E+14	EI_{lang} :	5,15047E+14
Langtidsfraksj	0,5	φ :	2				
				δ_{kon} (mm):	6,9	δ_{tot} (mm):	9,6
				δ_{lang} (mm):	2,7		
				δ_{kryp} (mm):	0,7		
<hr/>							
GFRP		E_c :	46000	η_{kon} :	1,27777778	$E_{c,lang}$:	12000
G_x (kN/m):	29,63	E_{cm} :	36000	ρ :	0,00222537	η_{lang} :	3,833333333
Q_x (kN/m):	6,75	A_c :	1807,0	$\alpha_{brusle,kon}$:	0,07262263	$\alpha_{brusle,lang}$:	0,122366081
P_x (kN)	300	b:	400	$I_{rel,kon}$:	8610324315	$I_{rel,lang}$:	24030040495
L (m):	8	d:	2030	EI_{kon} :	3,0997E+14	EI_{lang} :	2,8836E+14
Langtidsfraksj	0,5	φ :	2				
				δ_{kon} (mm):	16,6	δ_{tot} (mm):	22,7
				δ_{lang} (mm):	6,1		
				δ_{kryp} (mm):	0,4		
<hr/>							
CFRP		E_c :	124000	η_{kon} :	3,44444444	$E_{c,lang}$:	12000
G_x (kN/m):	31,84	E_{cm} :	36000	ρ :	0,0006073	η_{lang} :	10,33333333
Q_x (kN/m):	6,75	A_c :	549,0	$\alpha_{brusle,kon}$:	0,06262298	$\alpha_{brusle,lang}$:	0,105930913
P_x (kN)	300	b:	400	$I_{rel,kon}$:	8864640966	$I_{rel,lang}$:	24991273124
L (m):	8	d:	2260	EI_{kon} :	3,1913E+14	EI_{lang} :	2,99895E+14
Langtidsfraksj	0,5	φ :	2				
				δ_{kon} (mm):	16,5	δ_{tot} (mm):	22,7
				δ_{lang} (mm):	6,3		
				δ_{kryp} (mm):	0,4		
<hr/>							
AFRP		E_c :	65000	η_{kon} :	1,80555556	$E_{c,lang}$:	12000
G_x (kN/m):	35,58	E_{cm} :	36000	ρ :	0,00074057	η_{lang} :	5,416666667
Q_x (kN/m):	6,75	A_c :	785,0	$\alpha_{brusle,kon}$:	0,05039346	$\alpha_{brusle,lang}$:	0,085648458
P_x (kN)	300	b:	400	$I_{rel,kon}$:	9293061063	$I_{rel,lang}$:	26523290324
L (m):	8	d:	2650	EI_{kon} :	3,3455E+14	EI_{lang} :	3,18279E+14
Langtidsfraksj	0,5	φ :	2				
				δ_{kon} (mm):	16,3	δ_{tot} (mm):	22,8
				δ_{lang} (mm):	6,5		
				δ_{kryp} (mm):	0,3		
<hr/>							
BFRP		E_c :	44000	η_{kon} :	1,22222222	$E_{c,lang}$:	12000
G_x (kN/m):	26,75	E_{cm} :	36000	ρ :	0,0036315	η_{lang} :	3,666666667
Q_x (kN/m):	6,75	A_c :	2513,0	$\alpha_{brusle,kon}$:	0,08988386	$\alpha_{brusle,lang}$:	0,150416966
P_x (kN)	300	b:	400	$I_{rel,kon}$:	8115602301	$I_{rel,lang}$:	22254714017
L (m):	8	d:	1730	EI_{kon} :	2,9216E+14	EI_{lang} :	2,67057E+14
Langtidsfraksj	0,5	φ :	2				
				δ_{kon} (mm):	17,1	δ_{tot} (mm):	23,1
				δ_{lang} (mm):	6,0		
				δ_{kryp} (mm):	0,5		

STÅL

w	0,3
k_b	1
C_c	130
E_s	200000
A_s	4398
d	1100
h	1340

α	0,43418721
M_{bruk}	640
f_{ss}	154,677931
β	1,38560779
dc, max	140

dc (mm)	140
s,max (mm)	122

GFRP

w	0,5
k_b	1,4
C_c	35
E_f	46000
A_f	1807
d	2030
h	2110

α	0,12236608
M_{bruk}	564,048
f_{fs}	160,30519
β	1,04490354
dc, max	49

dc (mm)	40
s,max (mm)	144

CFRP

w	0,5
k_b	1,4
C_c	35
E_f	124000
A_f	549
d	2260
h	2340

α	0,10593091
M_{bruk}	581,712
f_{fs}	486,003727
β	1,03959228
dc, max	44

dc (mm)	40
s,max (mm)	118

AFRP

w	0,54
k_b	1,4
C_c	35
E_f	65000
A_f	785
d	2650
h	2730

α	0,08564846
M_{bruk}	611,664
f_{fs}	302,675109
β	1,03301649
dc, max	40

dc (mm)	40
s,max (mm)	100

BFRP

w	0,5
k_b	1,4
C_c	45
E_f	44000
A_f	2513
d	1730
h	1810

α	0,15041697
M_{bruk}	541,008
f_{fs}	131,010177
β	1,05442996
dc, max	57

dc (mm)	55
s,max (mm)	158

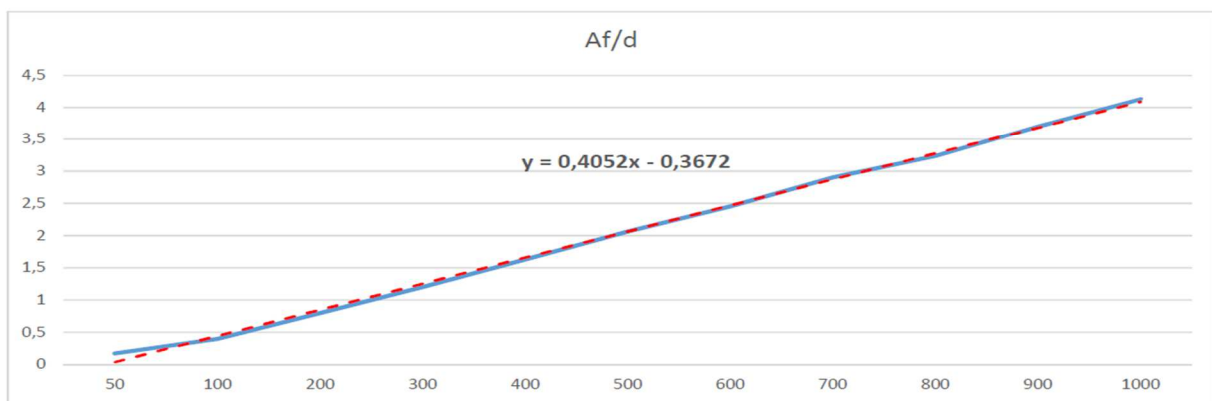
Vedlegg J – Excel ark for prisoptimal funksjon

GFRP

Bredde	d	Af	A _f /d	ρ _f	ρ _{fb}	ρ _f /ρ _{fb}
50	1500	260	0,17333333	0,00346667	0,0051259	0,6762976
100	1500	600	0,4	0,004	0,0051259	0,7803434
200	1500	1200	0,8	0,004	0,0051259	0,7803434
300	1500	1800	1,2	0,004	0,0051259	0,7803434
400	1500	2440	1,62666667	0,00406667	0,0051259	0,7933492
500	1500	3100	2,06666667	0,00413333	0,0051259	0,8063549
600	1500	3680	2,45333333	0,00408889	0,0051259	0,7976844
700	1500	4360	2,90666667	0,00415238	0,0051259	0,8100708
800	1500	4860	3,24	0,00405	0,0051259	0,7900977
900	1350	5000	3,7037037	0,00411523	0,0051259	0,8028225
1000	1210	5000	4,1322314	0,00413223	0,0051259	0,8061399

Gjennomsnitt:

0,00401867	0,00512595	0,78398612
------------	------------	------------

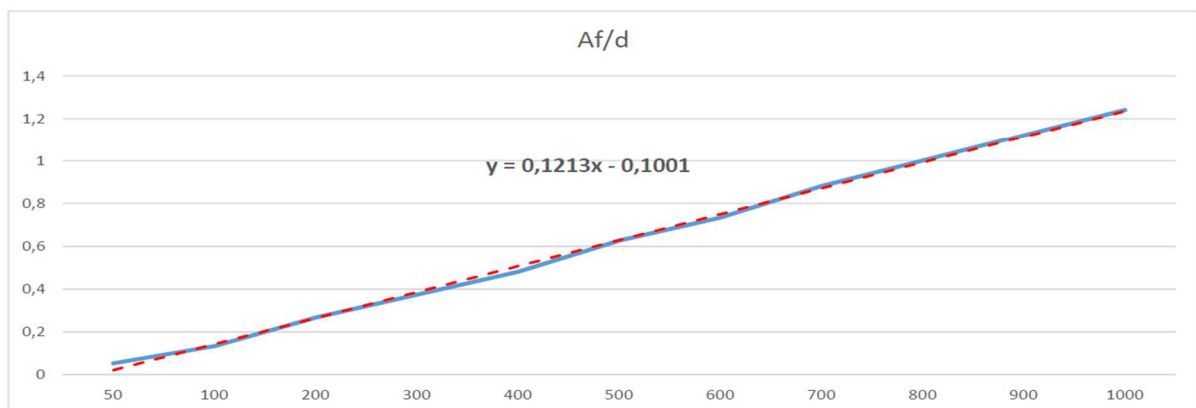


CFRP

Bredde	d	Af	A _f /d	ρ _f	ρ _{fb}	ρ _f /ρ _{fb}
50	1500	80	0,05333333	0,00106667	0,0017111	0,6233711
100	1500	200	0,13333333	0,00133333	0,0017111	0,7792139
200	1500	400	0,26666667	0,00133333	0,0017111	0,7792139
300	1500	560	0,37333333	0,00124444	0,0017111	0,7272663
400	1500	720	0,48	0,0012	0,0017111	0,7012925
500	1500	940	0,62666667	0,00125333	0,0017111	0,732461
600	1500	1100	0,73333333	0,00122222	0,0017111	0,7142794
700	1500	1320	0,88	0,00125714	0,0017111	0,7346874
800	1500	1500	1	0,00125	0,0017111	0,730513
900	1500	1680	1,12	0,00124444	0,0017111	0,7272663
1000	1500	1860	1,24	0,00124	0,0017111	0,7246689

Gjennomsnitt:

0,00124045	0,00171113	0,72493033
------------	------------	------------

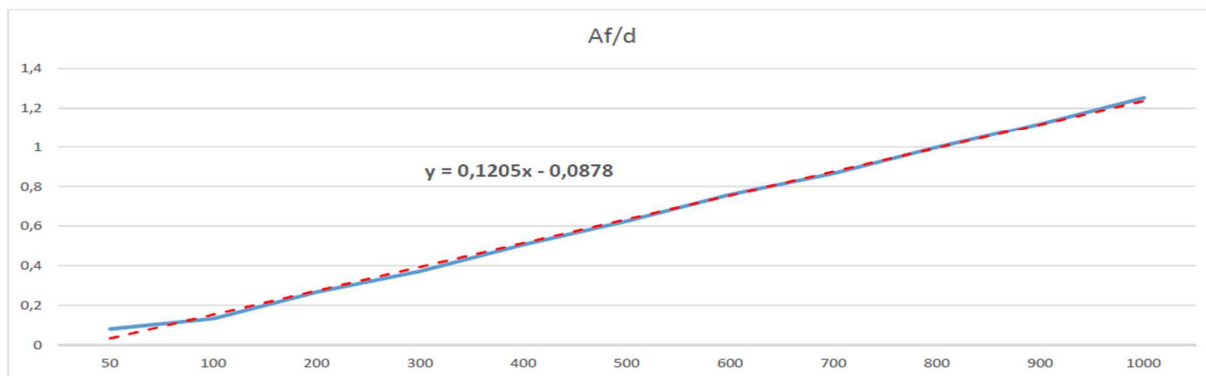


AFRP

Bredde	d	Af	A _f /d	ρ _f	ρ _{fb}	ρ _f /ρ _{fb}
50	1500	120	0,08	0,0016	0,0028384	0,5636975
100	1500	200	0,13333333	0,00133333	0,0028384	0,4697479
200	1500	400	0,26666667	0,00133333	0,0028384	0,4697479
300	1500	560	0,37333333	0,00124444	0,0028384	0,4384314
400	1500	760	0,50666667	0,00126667	0,0028384	0,4462605
500	1500	940	0,62666667	0,00125333	0,0028384	0,441563
600	1500	1140	0,76	0,00126667	0,0028384	0,4462605
700	1500	1300	0,86666667	0,0012381	0,0028384	0,4361945
800	1500	1500	1	0,00125	0,0028384	0,4403887
900	1500	1680	1,12	0,00124444	0,0028384	0,4384314
1000	1500	1880	1,25333333	0,00125333	0,0028384	0,441563

Gjennomsnitt:

0,00129851	0,0028384	0,45748056
------------	-----------	------------



BFRP

Bredde	d	Af	A _f /d	ρ _f	ρ _{fb}	ρ _f /ρ _{fb}
50	1500	360	0,24	0,0048	0,0034526	1,3902521
100	1500	740	0,49333333	0,00493333	0,0034526	1,4288702
150	1500	1100	0,73333333	0,00488889	0,0034526	1,4159975
200	1500	1450	0,96666667	0,00483333	0,0034526	1,3999066
250	1500	1820	1,21333333	0,00485333	0,0034526	1,4056993
300	1500	2180	1,45333333	0,00484444	0,0034526	1,4031248
350	1500	2540	1,69333333	0,0048381	0,0034526	1,4012858
400	1500	2900	1,93333333	0,00483333	0,0034526	1,3999066
450	1500	3280	2,18666667	0,00485926	0,0034526	1,4074157
500	1500	3620	2,41333333	0,00482667	0,0034526	1,3979757
550	1500	3980	2,65333333	0,00482424	0,0034526	1,3972736
600	1500	4340	2,89333333	0,00482222	0,0034526	1,3966885
650	1500	4700	3,13333333	0,00482051	0,0034526	1,3961933
700	1480	5000	3,37837838	0,00482625	0,0034526	1,3978564
750	1390	5000	3,5971223	0,00479616	0,0034526	1,3891408
800	1300	5000	3,84615385	0,00480769	0,0034526	1,3924801
850	1220	5000	4,09836066	0,0048216	0,0034526	1,3965085
900	1155	5000	4,32900433	0,00481	0,0034526	1,3931499
950	1100	5000	4,54545455	0,00478469	0,0034526	1,3858175
1000	1035	5000	4,83091787	0,00483092	0,0034526	1,399207

Gjennomsnitt:

0,24222222	0,00483275	0,00345261	1,3997375
------------	------------	------------	-----------

