

Fiberarmering i kombination med efterspänning

Alexandre Mathern, NCC Sverige AB

David Fall, NCC Sverige AB

Tobias Larsson, NCC Sverige AB

Carlos Gil, Tomas Concrete AB

Daniel Ekström, WSP Group AB

David Dackman, WSP Group AB

Rasmus Rempling, Chalmers

Ignasi Fernandez, Chalmers



Förord

Projektet har genomförts i samarbete med Tomas Concrete, WSP, NCC och Chalmers. Tack riktas till SBUF för finansiering och till de medverkande parterna för deras egeninsatser. Utan dessa medel hade projektet inte varit genomförbart. Rapporten har författats av arbetsgruppen.

Arbetsgrupp:

Alexandre Mathern, NCC Sverige AB

David Fall, NCC Sverige AB

Carlos Gil, Tomas Concrete AB

Daniel Ekström, WSP Group AB

Rasmus Rempling, Chalmers

Ignasi Fernandez, Chalmers

Tobias Larsson, NCC Sverige AB

Projektet har presenterat resultat på ett seminarium, se Bilaga 1. Projektets resultat har presenterats i tre vetenskapliga sammanhang (se tabell nedan) och 3 referensgruppsmöten har genomförts.

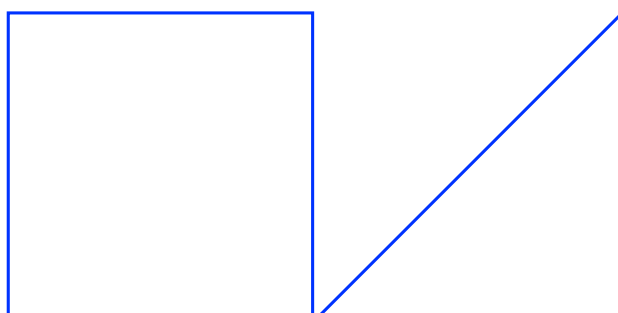
Referensgrupp:

Patrik Groth och Hans Hedlund, Skanska

Martin Laninge, PEAB

Magnus Bäckström, SWECO

Publikationstyp	Journal/konferens	Status
Konferensbidrag	IABSE New Delhi	Publicerad
Konferensbidrag	IABSE San Jose	Abstrakt
Journal artikel	Inte bestämt	Utkast



Sammanfattning

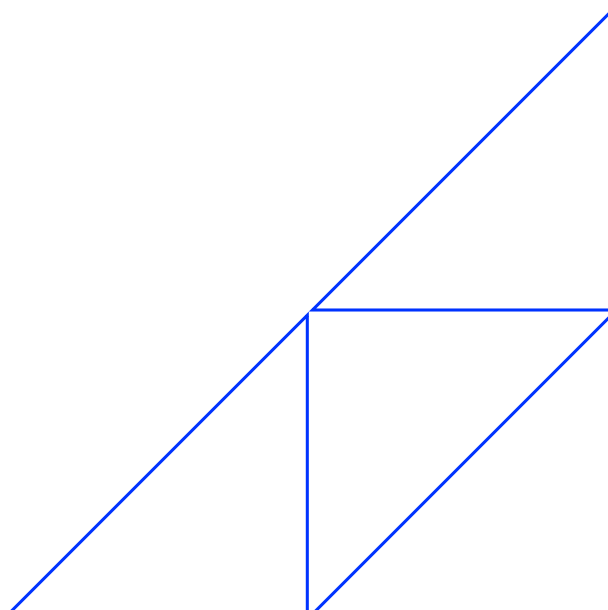
Fiberarmering och spännarmering är två väletablerade tekniker inom byggbranschen; de kombineras dock sällan, troligtvis mest beroende på att fiberarmering inte är inkluderat i gällande Europeisk standard (Eurokod). Under det senaste decenniet har förberedande arbete gjorts inom CEN (CEN ansvarar för Eurokod) för att fiberarmering ska inkluderas i nästa generation av Eurokod. Nästa generation av Eurokod kommer att börja gälla vid årsskiftet 2022/2023, vilket leder till en ökad användning av teknikerna i samverkan. Det råder en brist på erfarenheter och kunskap av fiberarmering (FRC) och efterspänning och deras synergieffekter om de används i samverkan. Beräkningar baserade på konstruktioners bärförmåga och materialtyper finns men ytterligare utvärdering av fiberns kapacitet tillsammans med efterspänning är viktig för att entreprenören ska kunna göra produktivitets- och materialvinster. Att kombinera FRC och efterspänning tros ge betydande förbättringar med avseende på byggtider, minskning av betongvolym, lägre byggkostnader och ökad hållbarhet över hela bygglivscykeln och värdekedjan. Det kan också leda till förbättringar av hälsa och säkerhet i branschen genom att minska behovet av traditionella arbetsintensiva processer, såsom hanteringen av traditionell armering.

Följande referensgruppsmöte har genomförts:

2022-10-21 Uppstartsmöte

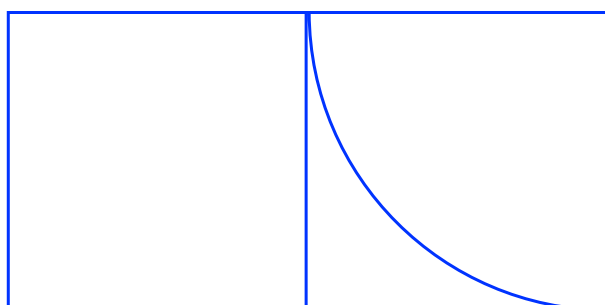
2023-12-04 Resultatredovisning och labbförsök

2024-03-26 Slutmöte



Innehåll

Bakgrund	3
Hållbarhet, klimat och miljö	3
Standarder som styr användandet av fiberarmering	4
Branschförankring och fokus	5
Syfte	5
Genomförande	6
Vetenskaplig ansats	7
Provkroppar	7
Mätprogram	8
Resultat	9
Labbförsök för att karakterisera betong och armeringsmaterialet	9
Labbförsök efterspända balkar	9
Observationer under uppspanning	9
Observationer efter uppspanning	13
Observationer med avseende på synergieffekter av fiberarmering	15
Slutsatser	17
Referenser	18
Bilaga 1: Kommunikation av resultat	19
Seminarium	19



Bakgrund

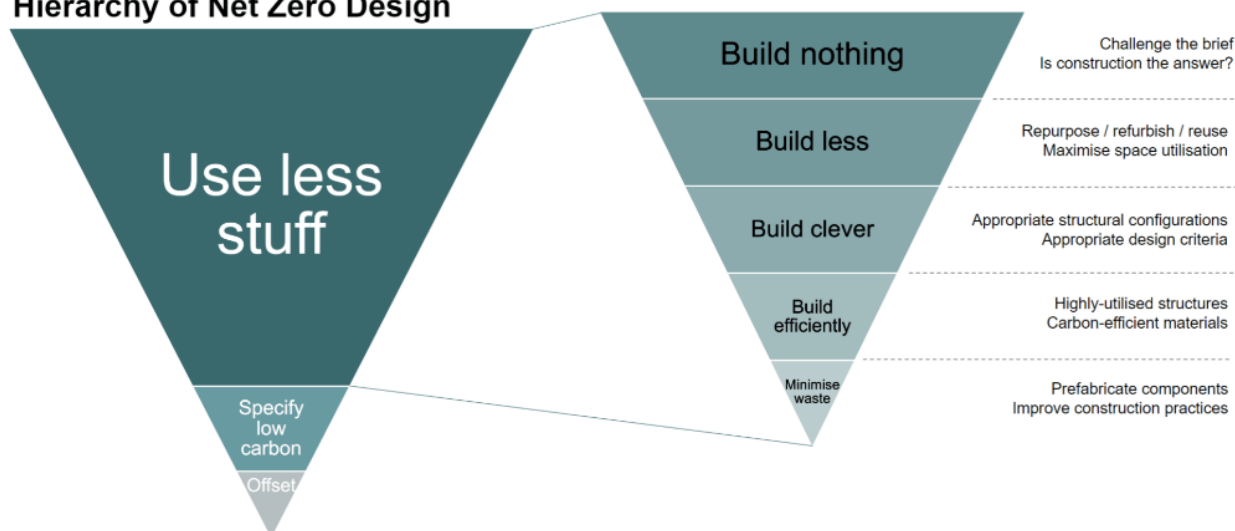
Fiberarmering och spännarmering är två väletablerade tekniker inom byggbranschen; de kombineras dock sällan, troligtvis mest beroende på att fiberarmering inte är inkluderat i gällande Europeisk standard (Eurokod). Under det senaste decenniet har förberedande arbete gjorts inom CEN (CEN ansvarar för Eurokod) för att fiberarmering ska inkluderas i nästa generation av Eurokod. Nästa generation av Eurokod tas i bruk under 2023, vilket möjliggör en ökad användning av teknikerna i kombination.

Det råder en brist på erfarenheter och kunskap av fiberarmering (FRC) och efterspänning i kombination. Beräkningar baserade på konstruktioners bärförmåga och materialtyper finns men ytterligare utvärdering av fiberns kapacitet tillsammans med efterspänning är viktig för att entreprenören ska kunna göra produktivets- och materialvinster. Att kombinera FRC och efterspänning tros ge betydande förbättringar i byggtider, minskning av betongvolym, lägre byggkostnader och ökad hållbarhet över hela bygglivscykeln och värdekedjan. Det kan också leda till förbättringar av hälsa och säkerhet i branschen genom att minska behovet av traditionella arbetsintensiva processer, såsom hanteringen av traditionell armering.

Hållbarhet, klimat och miljö

Hållbarhet, klimat och miljö är ett av SBUF:s fokusområden som detta projektförslag riktar sig till. Att projektera och finna lösningar som minskar påverkan på klimatet är ett av Projektets ambitioner. Genom att studera effekterna på produktivitet och möjligheterna till att minska materialanvändningen bidrar Projektet till de uppsatta målen: minskad klimatpåverkan, minskad energianvändning och lägre kostnad för hela livscykeln. Projektet tar utgångspunkt i nivån "Build Clever" i Net Zero Design hierarkin.

Hierarchy of Net Zero Design



Figur 1: Net Zero Design filosofin

Standarder som styr användandet av fiberarmering

Det nuvarande europeiska ramverket för dimensionering av betongkonstruktioner "EN 1992-1-1 Design av betongkonstruktioner-Del 1-1 Allmänna regler och regler för byggnader (2008), (Eurokod 2), är verifieringsstandarden som används för dimensionering av betongkonstruktioner i CEN:s medlemsländer. Eurokod 2 har varit under revidering 2022, och ett slutgiltigt utkast har varit tillgängligt från augusti 2022; denna version har använts i detta projekt.

Revideringen av gällande Eurokod kommer att inkludera ett komplement för fiberarmerad betong "prEN 1992-1-1:2021-09, Design av betongkonstruktioner, Bilaga L: Stålfiberarmerad betong (2021). Detta nya utkast till Bilaga L inkluderar användningen av stålfiberbetong såväl som efterspänd betong.

I praktiken innebär det att användandet av fiberarmerad betong kommer att öka, vilket påverkar entreprenören när det gäller utförande entreprenader likväl som totalentreprenader.

Eurokod – Det europeiska ramverket

EN 14651(2004) Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength är den främsta europeiska teststandarden för karakterisering av materialegenskaper efter uppsprickning hos fiberarmerad betong.

The International federation for Structural Concrete ("FIB")

FIB är en internationell organisation som består av 41 nationella medlemsföreningar. FIB har utvecklat en omfattande "Förstandard" (ModelCode) som är internationellt erkänd och används som grund för forskning och projektering av betongkonstruktioner.

ModelCode har sedan 2010 inkluderat fiberarmerad betong. Bakgrunden till standarden, tillsammans med resultaten från strukturella tester och praktiska exempel finns i dess bakgrundsdocument och kommer i detta projekt att användas som komplement till den nya generationen av Eurokod. Argumentet för att använda ModelCode i kombination Eurokod är möjligheten att få en bredare förståelse för hur dimensioneringsförfaranden ska tolkas och genomföras.

Nationella ramverk och standarder

Utöver de europeiska förordningarna och FIB ModelCode har de flesta länder också nationella antagna standarder. Sverige och Tyskland har en betongstandard som gäller för fiberarmerad betong: DIN-EN; "Stålfiberarmerad betong" till Eurokod-systemet (DAfStb november 2012); och SS 812310, Svensk standard: Konstruktion av fiberarmerad betongkonstruktion. Svenska Standardinstitutet (2013).

I Norge har riktlinjer nyligen publicerats av den norska betongföreningen NB38 - Fiberarmerad betong i lastbärande konstruktioner. Även Italien och Spanien har fastställt nationella riktlinjer.

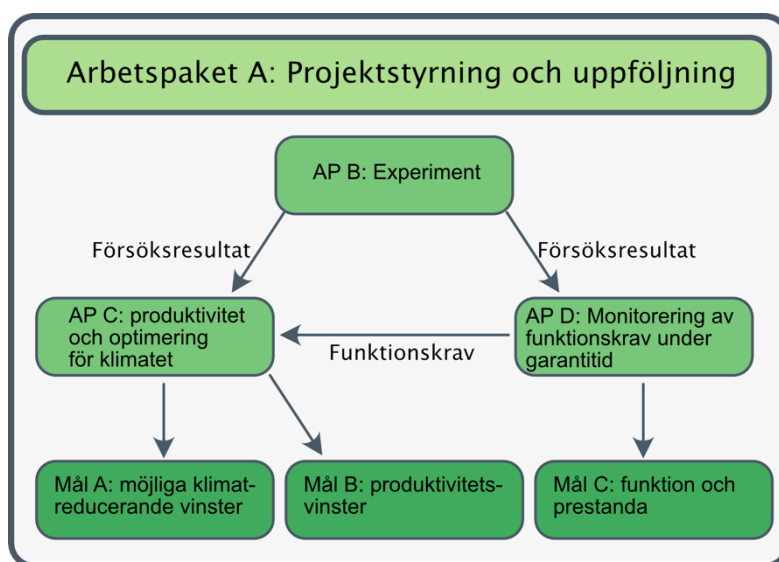
Branschförankring och fokus

En bättre förståelse för de bredare samhällsnyttorna med att använda fiberarmerade och efterspända betongkonstruktioner, kommer att öka deras användning inom branschen. Ett ökat användande leder till slankare och mer hållbara byggnadsverk som minskar både volymen betong och armering. Resultatet ger betydande ekonomiska fördelar på grund av lägre byggkostnader samt högre hållbarhet över hela livscykeln och ett lägre koldioxidavtryck. Minskad användning av armering minskar mängden tungt fysiskt arbete, vilket bidrar till en säkrare och mer jämlik byggbransch.

Syfte

Huvudsyftet med projektet var att undersöka synergieffekter av fiberarmering och efterspänning med avseende på produktionseffektivitet, användbarhetsprestanda samt klimatpåverkan. Ett sekundärt syfte var att undersöka potentialen av att använda nya digitala mättekniker för att utvärdera funktion och prestanda under garantiperioden. Följande delmål definierar syftet:

- I entreprenörens perspektiv, studera möjliga klimatreducerande vinster av tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.
- Utvärdera produktivitetsvinster med tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.
- Studera funktion och prestanda med avseende på tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.



Figur 2: Organisation och interaktion mellan arbetspaket och dess koppling till projektets mål.

Genomförande

Projektet genomfördes under 2023 som ett seniort utvecklingsprojekt av industrin och akademien i samverkan. Projektets parter representerade entreprenör, projekterande konsult, betongleverantör och akademi. Projektets centrerades runt laboratorieförsök. Valet av laboratorieförsök föregicks av en gemensam diskussion mellan parterna för att få största utdelning i projektet. Laboratorieförsöken utfördes på Chalmers Tekniska Högskola.

Genomförandet av projektet definierades av följande arbetspaket och aktiviteter.

Arbetspaket A: Projektstyrning och uppföljning, samt rapportering

Syfte: Syftet med arbetspaketet var att skapa förutsättningar för att projektet genomförs inom tidsram och budget, samt att skapa ett samarbetsklimat som ger förutsättning för kreativitet och öppenhet.

Aktivitet A.1: Organisera och genomföra projektmöten och referensgruppsmöten

Aktivitet A.2: Färdigställa slutrapport

Arbetspaket B: Experiment

Syfte: Syftet med detta arbetspaket var att genomföra de planerade experimenten enligt plan och samla in försöksresultat för analys.

Aktivitet B.1: Dimensionering av provkroppar och planering av experiment.

Aktivitet B.2: Framtagande av provkroppar och monitorering av den strukturella responsen och tidseffekter.

Aktivitet B.3: Analys och utvärdering av experiment

Aktivitet B.4: Delrapport av experimentella data och analys av resultat

Arbetspaket C: Produktivitetsvinster och optimering för klimatet

Syfte: Syftet med detta arbetspaket var att studera synergieffekter som kombinationen av fiberarmerad betong och efterspänning har på produktivitet och klimat.

Aktivitet C.1: Dimensionering och optimeringsberäkningar (mot funktionsmål) av de olika bärande systemen som studeras

Aktivitet C.2: Studie av de potentiella klimatreducerande effekter och produktivitetsvinster av fiberarmerad betong i kombination med efterspänning

Aktivitet C.3: Delrapport

Arbetspaket D: Monitorering av funktionskrav under garantitid

Syfte: Syftet med detta arbetspaket var att studera lämplig metodik för monitorering under garantifas

Aktivitet D.1: Definition av dimensionerande funktionskrav och funktionsmål för uppföljning av funktion under garantifas

Aktivitet D.2: Studie av metodik för uppföljning av funktion med hjälp av monitorering

Aktivitet D.3: Delrapport

Vetenskaplig ansats

Projektets centrala del var en provserie som omfattar fyra stycken balkar. Provserien föregicks av en parallell projektering och dimensionering enligt de dimensioneringsrekommendationer som ges i 2023 "nya" EC version.

Balkarna delades in i två grupper, två balkar gjöts i traditionell betong och två gjöts med stålfiberarmerad betong (0.5% vol). I varje grupp användes en balk som referensbalk och utfördes slakarmerad medans den andra utfördes med efterspänning. Försöket planerades enligt följande steg:

1. En vecka efter gjutning spändes balkarna upp enligt beräknade karakteriska värden last och materialvärden.
2. Balkarna övervakades med injutna sensorer (se mätprogram nedan) under en längre period.
3. Balkarna belastades med en högcyklisk last (ca 60% av brottgränslast) i 7 dagar.
4. Balkarna belastades till brott.

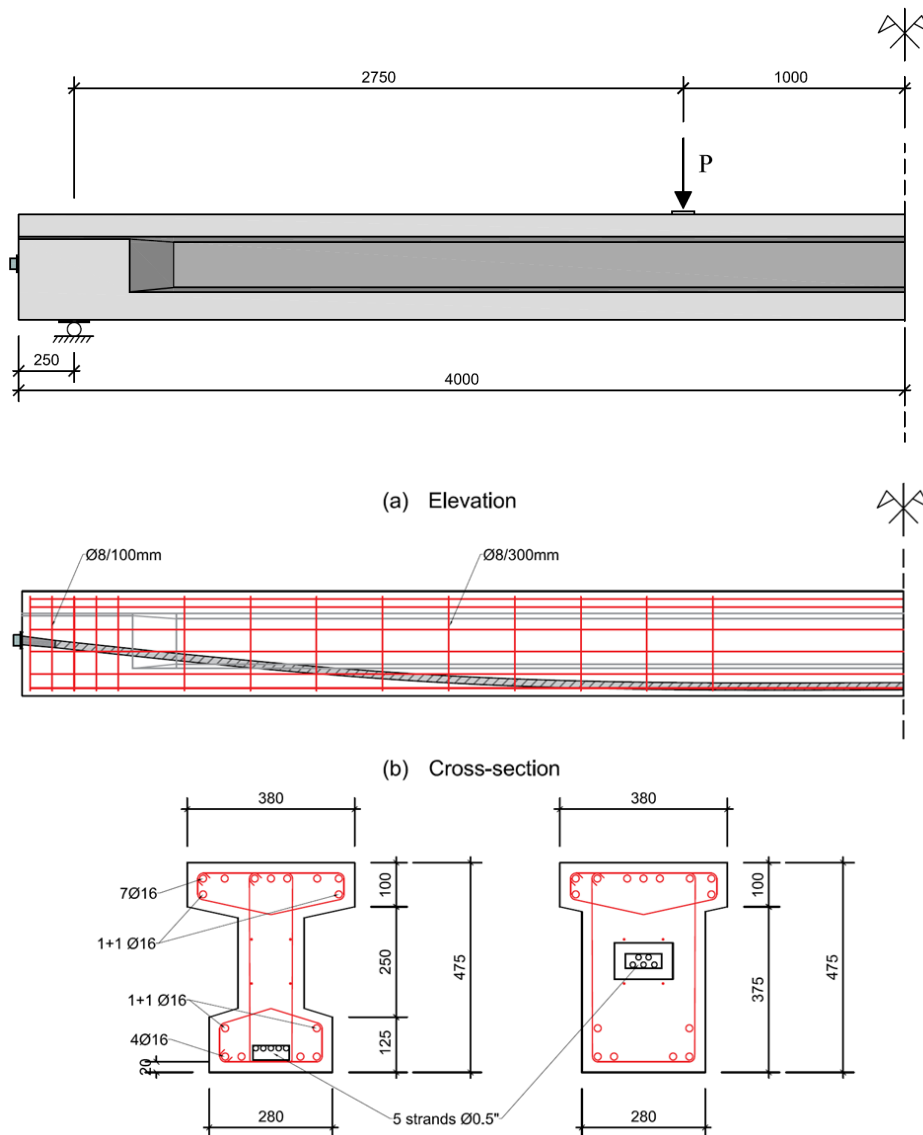
I tabell nedan redovisas försöksprogrammet.

Table 2. Försöksprogram.

	Betong		Fiberarmeradbetong	
	Slakarmerad	Spännarmering	Slakarmerad	Spännarmering
Nomen- clature	RC	P-RC	R-FRC	P-FRC
Långtids- belastning	60 dagar			
Cyklisk belastning och brott	7 dagar cyklisk belastning + belastning till brott			

Provkroppar

Provkropparna i försöksprogrammet redovisas i Figur 3. Provkropparna dimensionerades med karakteristiska värden enligt Eurokods dimensioneringsanvisningar för fiberarmerad betong och efterspända betongkonstruktioner, se Bilaga 2 P-RC och Bilaga 3 P-FRC.



Figur 3: Geometri och armering och profil för efterspänningskablar för balkarna och belastningsuppsättningen. Alla mått i mm.

Mätprogram

Distribuerade optiska fibersensorer (DOFS) var den huvudsakliga typen av sensor som användes för att mäta töjningar i balkarna. Mätssystemet som använder fiberoptiken är väl beprövad på Chalmers och gjuts in i balkarna. Fiberoptiken placerades i flänsarna samt längs efterspänningskabeln. För att ge redundans för mätningarna installerades ytterligare vibrerande trådtöjningsgivare i specifika punkter. Dessutom användes Digital Image Correlation (DIC) för att observera töjnings- och förskjutningsfält vid balkens mittspänn.

Mätprogrammet följde försöksplaneringen och var uppdelat i följande steg:

1. Uppspänning: detta steg definierar balkens nolltillstånd och dess initiala tillstånd i termer av töjningar, applicerad spännkraft (direkt mätt), deformation,

- etc.
2. Tidsberoende effekter: detta steg fokuserar på att mäta kontinuerliga töjningar under en längre period under vilka långtidseffekter pga relaxation, krypning och krympning uppstår.
 3. Provtryckning: detta steg mäter töjning, deformation, last och övervakar sprickbildning mha DIC.

Resultat

Labbförsök för att karakterisera betong och armeringsmaterialen

För att säkerställa korrekta betongegenskaper utfördes kubprov vid två olika tidstillfällen. Det första provet utfördes cirka 28 dagar efter gjutning och det andra 63 dagar efter gjutning. De fem testkuberna gjöts vid samma tillfälle som balkarna och förvarades efter härdning i en vattentank. Kubernas dimension var 150x150x150 mm och provningen utfördes enligt europeisk standard [8]. Vid det första tillfället provades två av kuberna och vid det andra tillfället de återstående tre.

Cylindertryckhållfastheten för betongen beräknades från kubtestet enligt [8]. Standardavvikelsen för 28-dagarsprovet var 1,19 MPa och 1,76 MPa för 64-dagarsprovet.

Armeringen som användes i proverna provades med avseende på sträckgräns och E-modul. Provet utfördes med fem stänger för varje armeringsjärnsstorlek, $\phi 6$ mm, $\phi 8$ mm respektive $\phi 16$ mm. Stängerna provades i ett dragprov och drogs tills brott. Stängerna hade en längd på 400 mm och avståndet mellan infästningspunkterna i provningsmaskinen var 293 mm för de mindre armeringsdimensionerna och 254 mm för $\phi 16$ mm stängerna. Medelvärde för materialegenskaperna för armeringen var: E_s 189, 167, 176 GPa; f_y 566, 500, 528 MPa; och 642, 660, 633 MPa för armeringsdiametrarna 6mm, 8mm respektive 16mm.

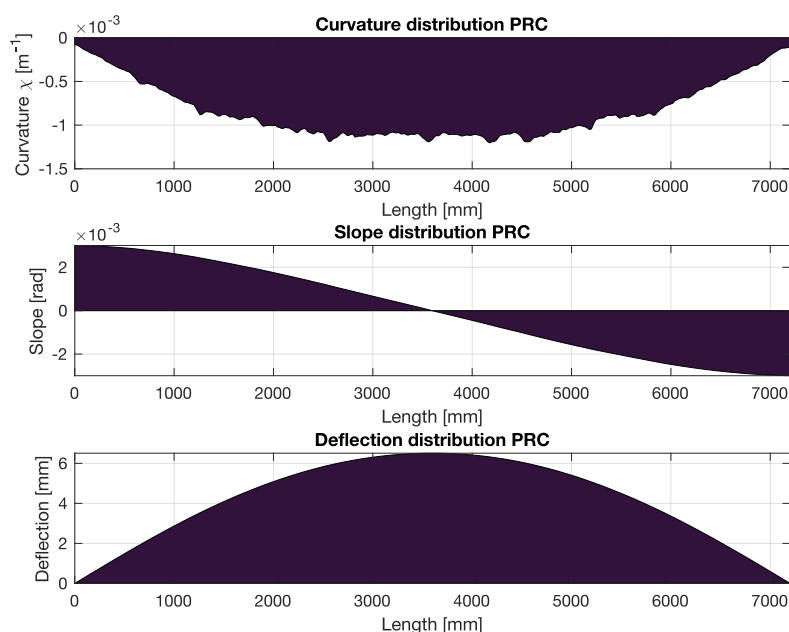
Labbförsök efterspända balkar

Fiberoptiken möjliggör att följa balkens respons under uppspänning och vid prov till brott.

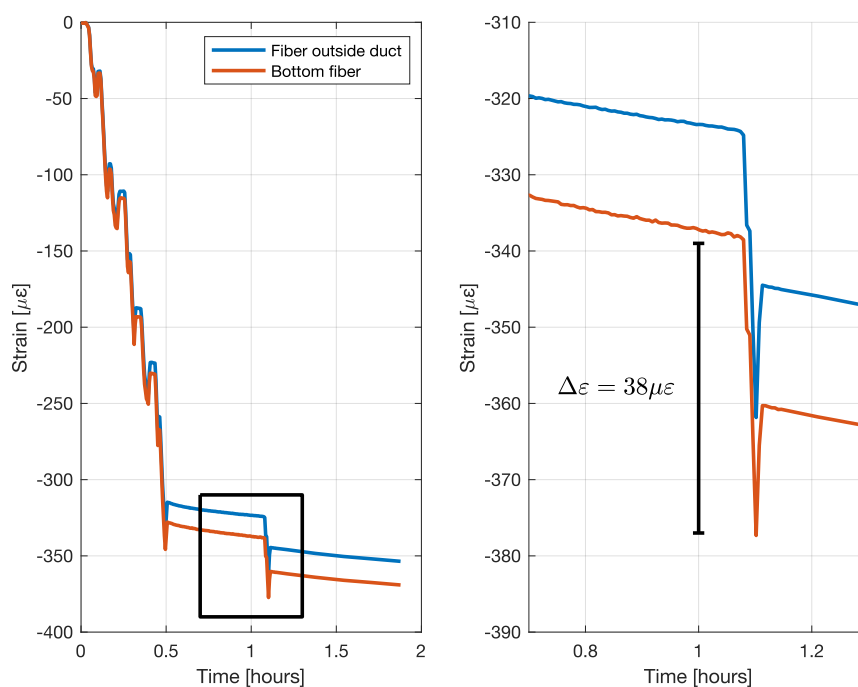
Observationer under uppspänning

I figur 3 presenteras den beräknade nedböjningen och krökningen direkt efter uppspänning. Den respons som observeras i töjningskurvorna stämmer överens med vanliga antaganden. Förspänningskraften orsakar en axiell kraft i hela balken, vilket innebär att där krökningen är noll, dvs där $\epsilon_{top} \approx \epsilon_{bottom}$, finns det fortfarande en trycktöjning. Det finns en viss skillnad mellan höger och vänster fiber, vilket kan vara en effekt av en viss rotation när stålet spänns, men skillnaden anses vara marginell och balken antas bara rak. För fiberoptiken i balkens tyngdpunkt skulle det ideala resultatet vara en konstant kurva, men den uppmätta profilen indikerar en något parabolisk form, vilket innebär att det verkliga naturliga lagret kan vara närmare den övre kanten av provet än förväntat.

Om man tittar på ett litet tidsintervall under uppspänning för PRC-provet, kan ankarglidning observeras. Figur 4 visar töjningsförändring när ankarglidning sker för fiberoptik monterat utanpå foderröret och i tvärsnittens nederkant. Genom att undersöka responsen i mittsektionen kan ett medelvärde av ankarglidningen uppskattas. Denna spänningsförlust är inte densamma som i spännstålet, eftersom förspänningsstålet i detta skede inte är injekterat och har ingen kraftöverföring längs med balken.



Figur 4: Beräknad nedböjning och krökning efter uppspänning.

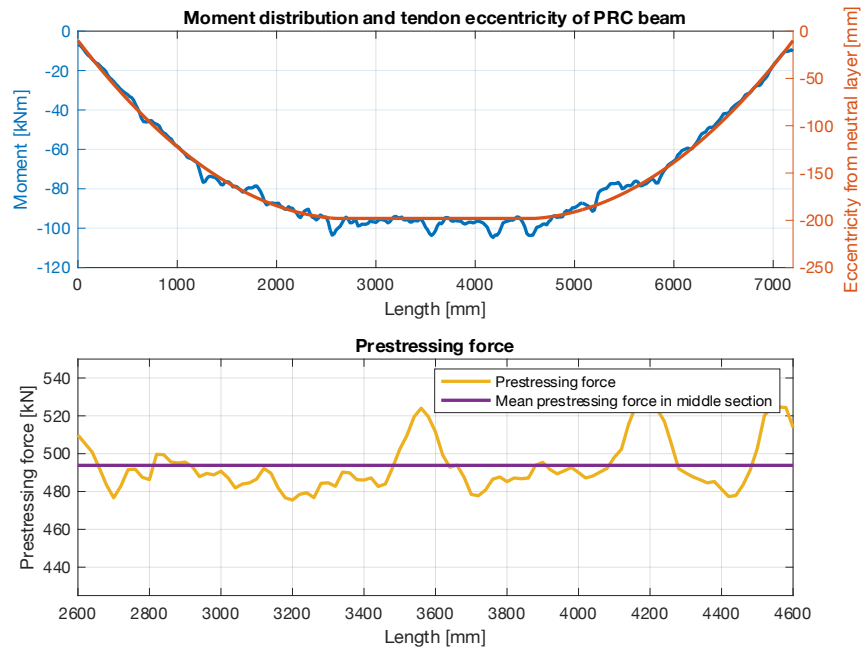


Figur 5: Uppmätta töjningar under uppspänning av den slakarmerade efterspända balken.

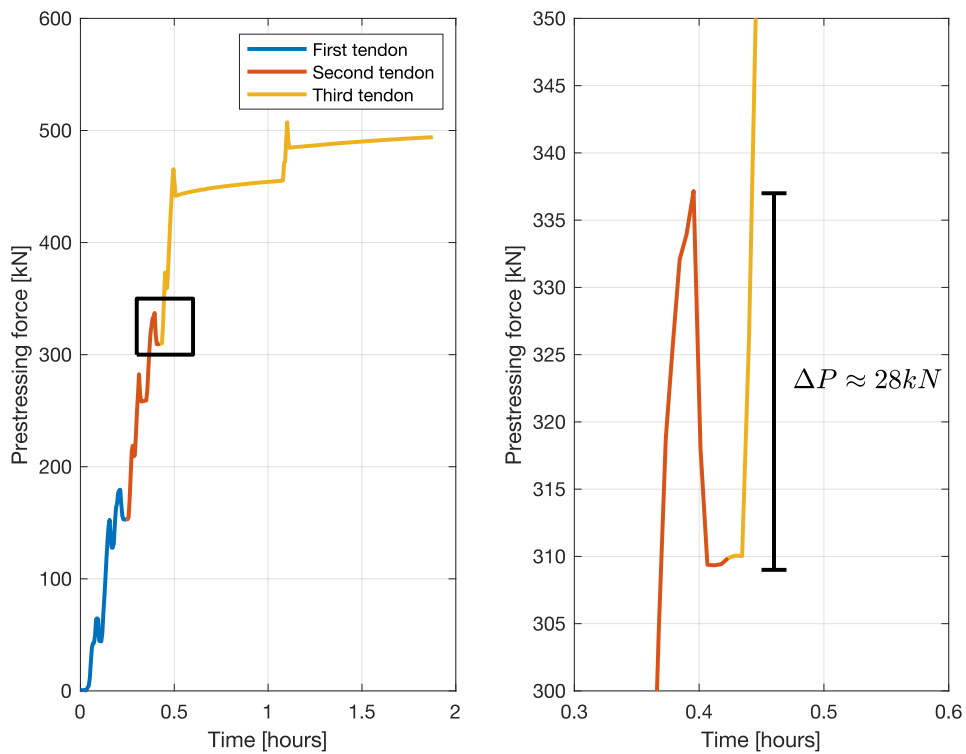
Böjmomentfördelningen beräknades genom att multiplicera krökningen χ med sektionstyvheten EI . Genom att jämföra momentfördelningen med excentriciteten hos spännstålet, se figur 5, fann man att de två graferna hade samma form, vilket innebär att spännkraften, beräknad genom att dividera momentet med excentriciteten, var mer eller mindre konstant över provets längd. På grund av osäkerheter i kraftexcentriciteten i de lutande delarna beräknades endast mittsektionens förspänningskraft, det vill säga mellan punktlasterna. I verkligheten hade momentfördelningen en form av ett tredjegradspolynom, eftersom lutningen på kanalen var noll både i mittsektionen och i båda ändarna på grund av förankringens konfiguration.

Genom att beräkna medelvärdet av förspänningskraften i mittsektionen för varje tidssteg under efterspänningen kunde förspänningskraftens variation visualiseras. Som framgår av figur 6 kunde de olika faserna av spänningen observeras. Precis som i figur 4 kan nu ankarglidningen observeras som en kraftförlust som direkt motsvarar kraftförlusten i spännstålet för mittpartiet.

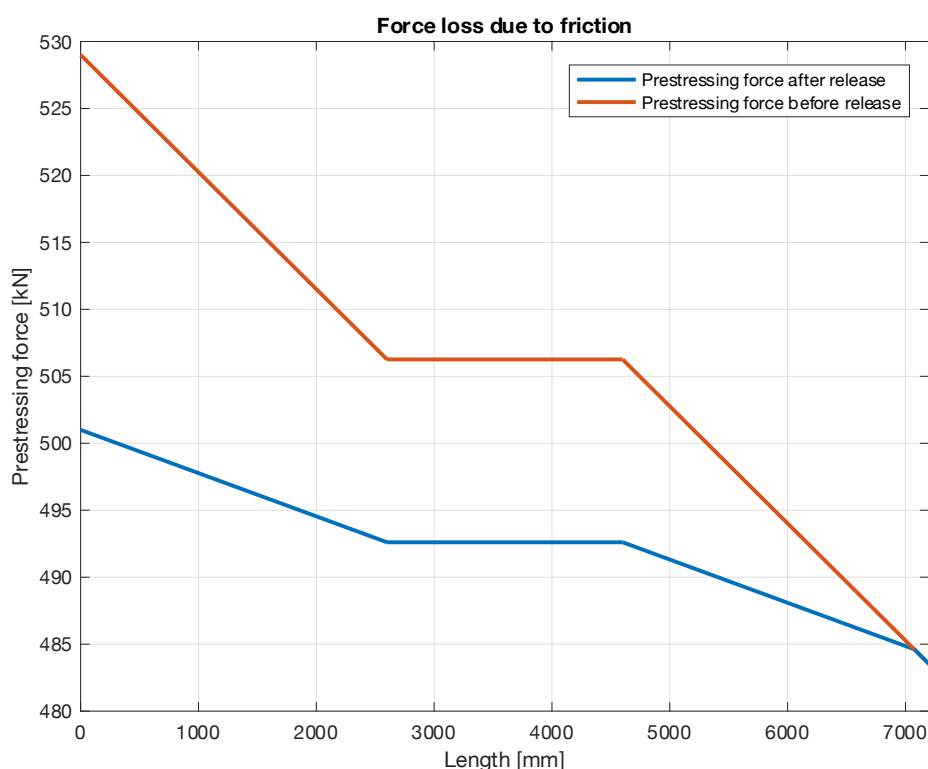
Relationen mellan förspänningskraften vid mittsektionen jämfört med den aktiva uppspänningsänden indikerar att en minskning av förspänningskraften sker. I figur 7 presenteras den totala spännkraftvariationen längs med balken, både före och efter uppspänning. I den passiva änden antas förspänningskraften ha samma kraftminskning som i den aktiva änden, på grund av spännkabelns symmetri. Det kan också ses att ankarglidningen påverkar spännkraften. Ankarglidningen orsakar en minskning av kraften från den aktiva änden till den passiva änden av provet. Vid den passiva änden observeras att de två kurvorna överlappar intill den passiva änden. Detta indikerar att avståndet med avseende på ankarglidning sker nästan över hela balkens längd.



Figur 6: Uppmätt efterspänningskraft och beräknat böjmoment längs balkens längd.



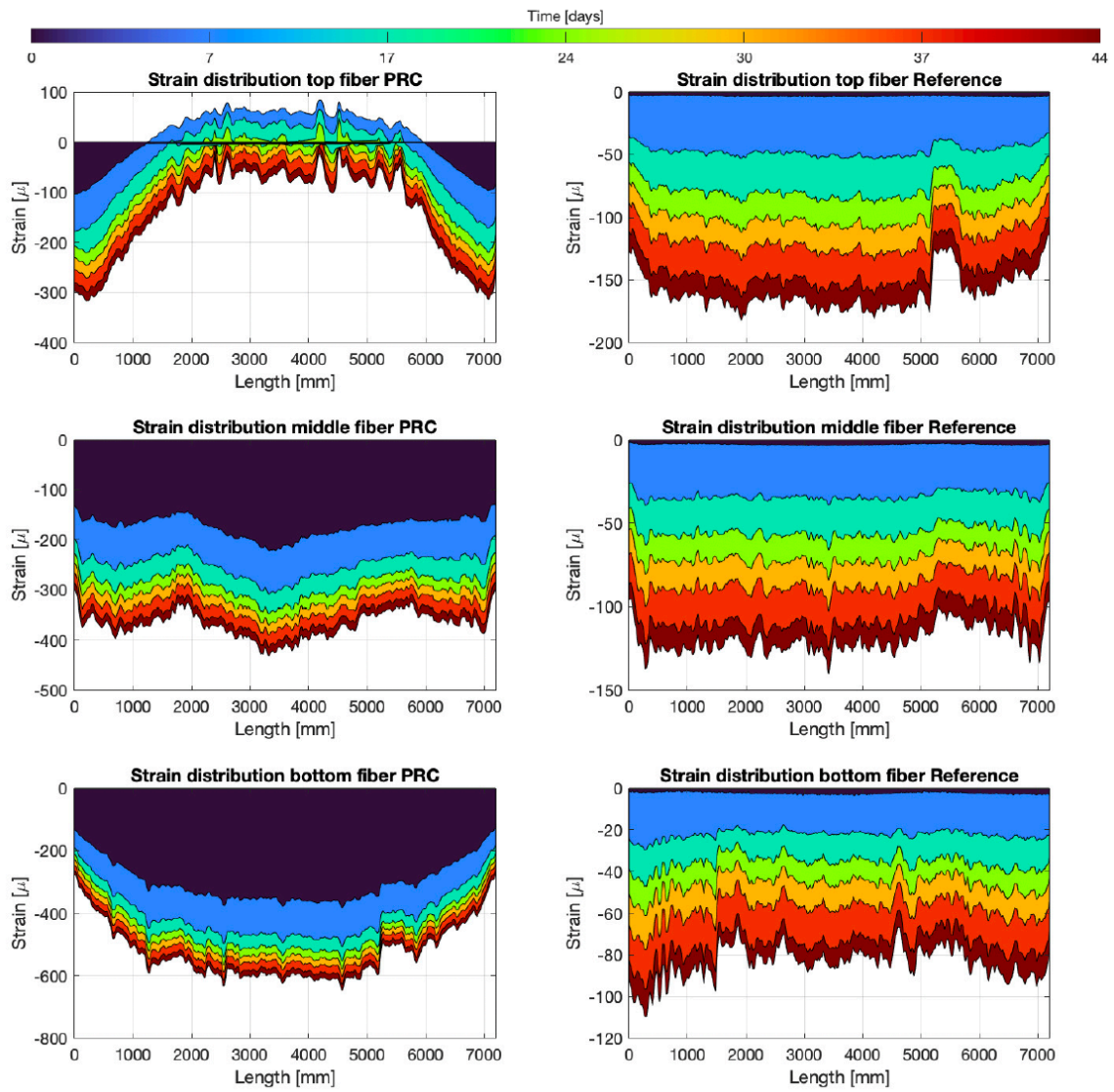
Figur 7: Uppmätt efterspänningskraft över tid.

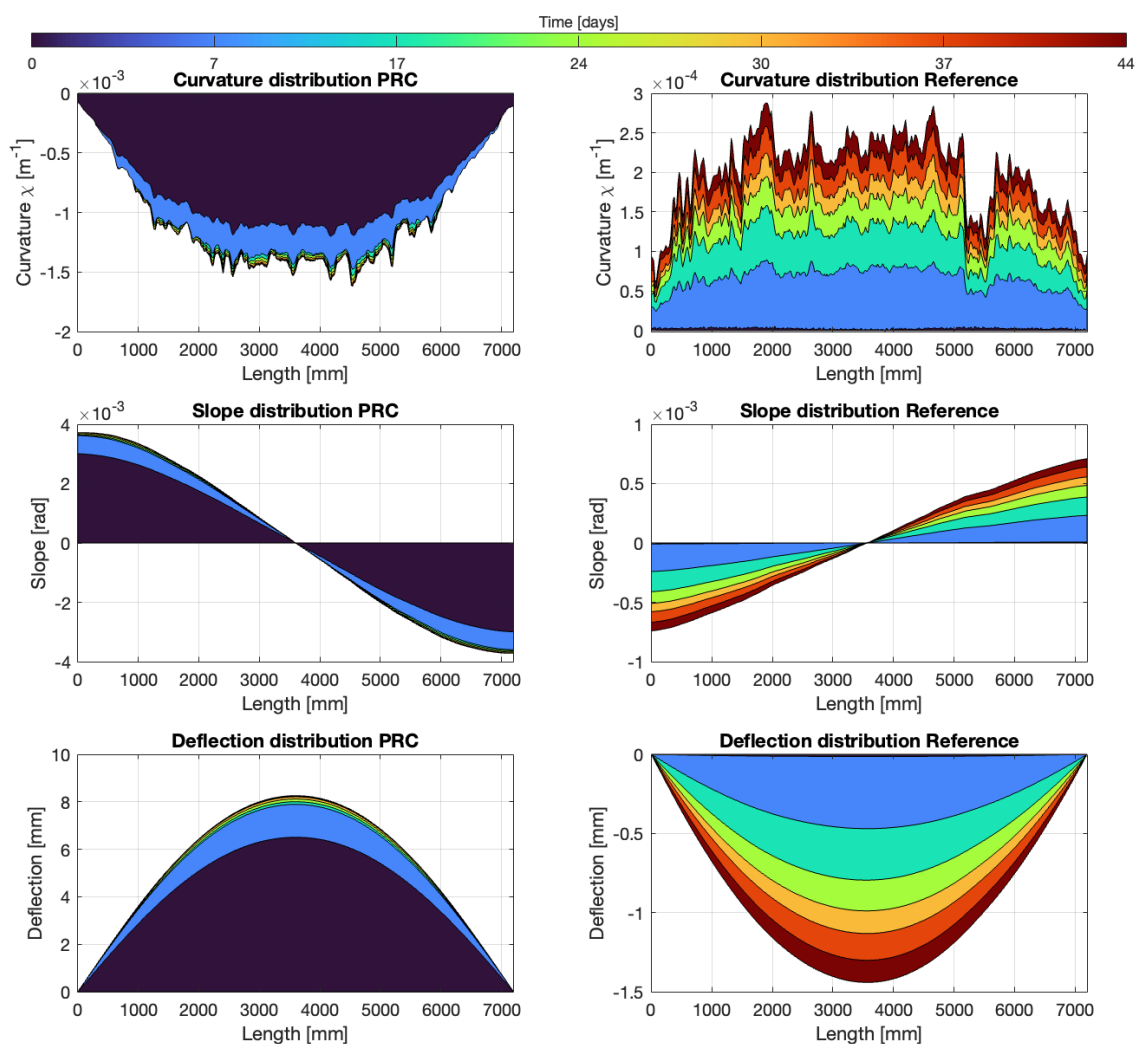


Figur 8: Uppmätt efterspänningskraft längs balkens längd.

Observationer efter uppspanning

Genom att förvara balkarna i en sluten miljö över tid var det möjligt att mäta långtidseffekter. I figur 8 presenteras töjningsvariationen över tid. Den mörkblå färgen motsvarar tiden mellan start och stopp av uppspanningen. Ökningen av krökningen kan tolkas som att tryckspänningen ökar kontinuerligt, vilket bör vara en effekt av främst krympning. Lägg märke till att töjningsfördelningen i den översta fibern i PRC-provet ändras från negativa töjningar till positiva töjningar. För PRC-provet sker en snabb ökning av trycktöjningar de första dagarna. För referensexemplaret är ökningen av trycktöjningar mer eller mindre konstant genom tidsspannet. Om man tittar på krökningen så har PRC-exemplaret en oförändrad form, medan referensexemplaret kröker sig i den övre och nedre delen. Den övre delen kommer att uppleva de största tryckpåkänningarna och den nedre delen att uppleva de minsta tryckkrafterna. Detta tyder på att långtidseffekterna orsakar en ökande nedböjning över tiden, figur 9.

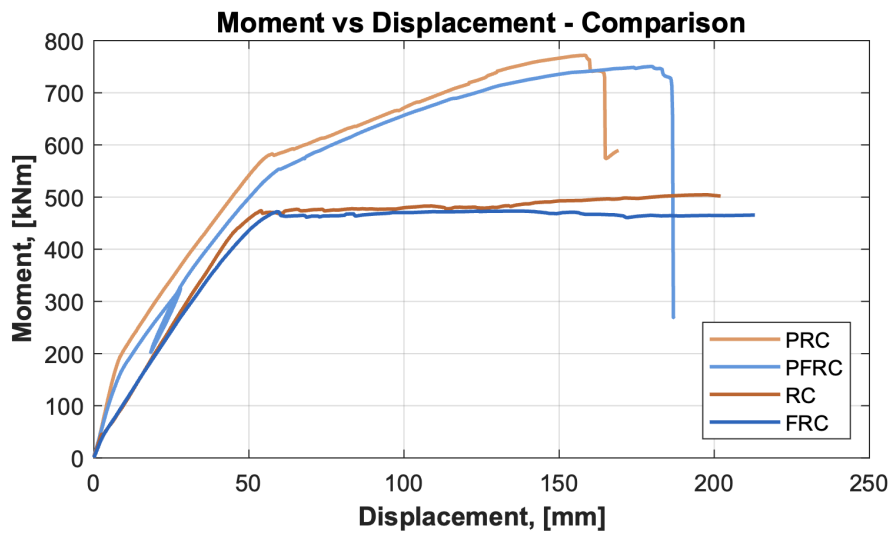




Figur 9: Long-term effects over time.

Observationer med avseende på synergieffekter av fiberarmering

En viktig aspekt för att använda synergieffekter av fiberarmerad betong och efterspanning är att responsen är likvärdig för balkar som är projekterade med eller utan fiberarmering. I Figur 10 presenteras beräknat moment över balkarnas nedböjning. Momentet är beräknat för varje tidssteg baserat på de uppmätta töjningarna av det fiberoptiska systemet. Skillnaden mellan fiberarmerade konstruktioner och slakarmerade konstruktioner utan fibrer observeras tydligt i utveckling av residualkapaciteten för de fiberarmerade konfigurationerna. Denna effekt dominerar i ett brottskede och är viktig men inte avgörande för möjligheten att ersätta armering med fiberarmering. Den viktigaste slutsatsen från dessa försök är att responsen är likvärdig för de olika konfigurationerna.



Figur 10: Beräknat moment och nedböjningsdiagram för alla fyra konfigurationerna.

Slutsatser

Sammanfattningsvis studerar detta projekt synergieffekter av fiberarmering och efterspänning med avseende på produktionseffektivitet, användbarhetsprestanda samt klimatpåverkan.

Det primära syftet var att undersöka synergieffekter av fiberarmering och efterspänning med avseende på produktionseffektivitet, användbarhetsprestanda samt klimatpåverkan. Försöken visar på en respons för de olika konfigurationerna som är likvärdig vilket betyder att det är möjligt att dra slutsatsen att fiberarmering mycket väl kan användas som ett komplement till slakarmering, särskilt i kombination med efterspänning. En sådan användning möjliggör att minska mängden slakarmering i konstruktioner vilket skulle ge synergieffekter på produktionseffektivitet, arbetsmiljö och klimatpåverkan. Här behövs fortsatta studier av kritiska detaljer för att metoden ska användas. När det gäller användbarheten för betongen har inga skillnader observerats för de olika konfigurationerna. När det gäller projektering enligt EuroCode krävs det fortsatt utveckling av tillgången på materialkonfigurationer. Projektets projekteringskedje påvisade också ett starkare inslag av materialkompetens i projektets tidiga skeden.

Ett sekundärt syfte var att undersöka potentialen av att använda nya digitala mättekniker för att utvärdera funktion och prestanda under garantiperioden. Följande delmål definierar syftet. Genom att använda en referensbalk kunde effekterna av förspänning bestämmas noggrant genom att ta bort effekter relaterade till enbart betong, såsom krympning och krypning. När det gäller mätdata från distribuerade optiska fibrer var kvaliteten på utdata framgångsrik. Tidigare forskning har enbart testat användningen av DOFS för armerade betongprover. Resultaten visar att användningen av DOFS är genomförbar för efterspända armerade betongelement.

Referenser

- [1] Engström, B.: Design and analysis of prestressed concrete structures. Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering, Concrete Structures, Report 2011:7, Gothenburg, 2011.
- [2] H. R. Dolan, Charles W. Hamilton, Prestressed Concrete : Building, Design, and Construction. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019.
- [3] B. S. Choo, "25 - reinforced and prestressed concrete," in Advanced Concrete Technology (J. Newman and B. S. Choo, eds.), pp. 3–17, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [4] Berrocal, C. G., Fernandez, I., Bado, M. F., Casas, J. R., Rempling, R. "Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing," Structural Health Monitoring, vol. 20, pp. 3309–3326, Jan. 2021.
- [5] B. Glišić, D. Hubbell, D. H. Sigurdardottir, and Y. Yao, "Damage detection and characterization using long-gauge and distributed fiber optic sensors," Optical Engineering, vol. 52, no. 8, 2013.
- [6] P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. T. Chorpening, M. P. Buric, and P. R. Ohodnicki, "Distributed optical fiber sensing: Review and perspective," Applied Physics Reviews, vol. 6, no. 4, 2019.
- [7] Berrocal, I. Fernandez, and R. Rempling, "Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors," Structure and Infrastructure Engineering, vol. 17, no. 1, pp. 124–139, 2021.
- [8] European Committee for Standardisation, European Standard, EN 12390-3. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. Brussel, June 2019.

Bilaga 1: Kommunikation av resultat

Inom ramen för projektet har resultatet kommunicerats och diskuterats i fackvetenskapliga (vetenskaplig tidskrift, konferens) och populärvetenskapliga (branschseminarium) sammanhang.

Seminarium

Brosamverkan och Konstruktionscentrum bjuder in till seminarium om dimensionering av fiberarmerade efterspända balkar enligt nya EC

Avdelningen för konstruktionsteknik, Chalmers, har tillsammans med WSP och NCC genomfört en studie på dimensionering av fiberarmerade efterspända balkar enligt kommande EC, inklusive labbförsök. Projektet är finansierat av SBUF.

Huvudsyftet med projektet är att undersöka synergieffekter av fiberarmering och efterspänning med avseende på produktionseffektivitet, användbarhetsprestanda samt klimatpåverkan. Ett sekundärt syfte är att undersöka potentialen av att använda nya digitala mättekniker för att utvärdera funktion och prestanda under garantiperioden. Följande mål definierar syftet:

- I entreprenörens perspektiv, studera möjliga klimatreducerande vinster av tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.
- Utvärdera produktivitetsvinster med tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.
- Studera funktion och prestanda med avseende på tekniska lösningar baserade på fiberarmering i kombination med efterspänning.

När: 2023-12-04, klockan 13:00 – 16:00

Anmälan: Sker HÄR senast 2023-11-27, Begränsat antal deltagare till 25st.

Deltagare:

Namn	Fretag
Isak Wallo	Inhouse Tech Göteborg AB
Filip Bozic	Inhouse Tech
Daniel Ekström	WSP Sverige AB
Ludwig Bengtsson	Wsp
Martin Laninge	Brosamverkan
Anna Teike	Trafikverket
Per-Anders Johansson	Bekaert
Leo Adolfsson	Ramboll
Christoffer Jonsson	Ramboll
Tatjana Sundberg	Wsp
Arshad Abosh	NCC Sverige AB
Jesus Armesto	NCC Sverige AB
Niklas Bagge	Multiconsult
Alexander Kjellgren	Skanska Sverige AB

1 Material

1.1 Concrete

$$\rho_c := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

28 days

$$f_{cm.kub} := 66.2 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} := \frac{f_{cm.kub}}{1.2} = 55.2 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{cm} - 8 \text{ MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} \text{ GPa} = 36.7 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} := 0.6 \cdot f_{cm} = 33.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max} := 0.45 \cdot f_{cm} = 24.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct\infty,max} := f_{ctm} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max} := f_{ctm} = 3.9 \text{ MPa}$$

7 days

$$f_{cm7} := 0.87 \cdot f_{cm} = 48 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm7} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{cm7} - 8 \text{ MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$E_{cm7} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm7}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} \text{ GPa} = 35.2 \text{ GPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} := 0.45 \cdot f_{cm7} = 21.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max7} := f_{ctm7} = 3.5 \text{ MPa}$$

1.2 Reinforcing steel

$$f_{ym} := 550 \text{ MPa}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\phi := 16 \text{ mm} \quad A_{s,i} := \frac{\phi^2}{4} \cdot \pi = 201 \text{ mm}^2$$

$$n_s = 3 \quad A_s := n_s \cdot A_{s,i} = 603 \text{ mm}^2$$

$$n'_s = 4 \quad A'_s := n'_s \cdot A_{s,i} = 804 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,tot} := A_s + A'_s = 1407 \text{ mm}^2$$

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

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

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.4$$

$$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

1.3 Prestressing steel

Post-tensioning system - Strand properties.

Steel designation	Y1860S7
Nominal diameter	15.7 mm
Tensile strength, f_{puk}	1860 MPa
Steel area, A_{pi}	150 mm ²
Breaking load, $f_{puk} \cdot A_{pi}$	279 kN
0.1 % proof load	246 kN
Max strand load, $0.8 \cdot f_{puk} \cdot A_{pi}$	221 kN

$$E_p := 195 \text{ GPa}$$

$$\mu := 0.19$$

$$k := 0.0075$$

$$f_{pum} := 1986 \text{ MPa}$$

$$f_{p0.1m} := 0.88 \cdot f_{pum} = 1748 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0.1m} := \frac{f_{p0.1m}}{E_p} = 8.96 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{uk} := 3.5\%$$

$$\chi_{1000} := 2.5\%$$

$$\phi_p := 15.7 \text{ mm}$$

$$A_{p,i} := 150 \text{ mm}^2$$

$$n_p = 4$$

$$A_p := n_p \cdot A_{p,i} = 600 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_p := \frac{E_p}{E_{cm}} = 5.3$$

$$P_{i,max} := 0.8 \cdot f_{pum} \cdot A_{p,i} = 238.3 \text{ kN}$$

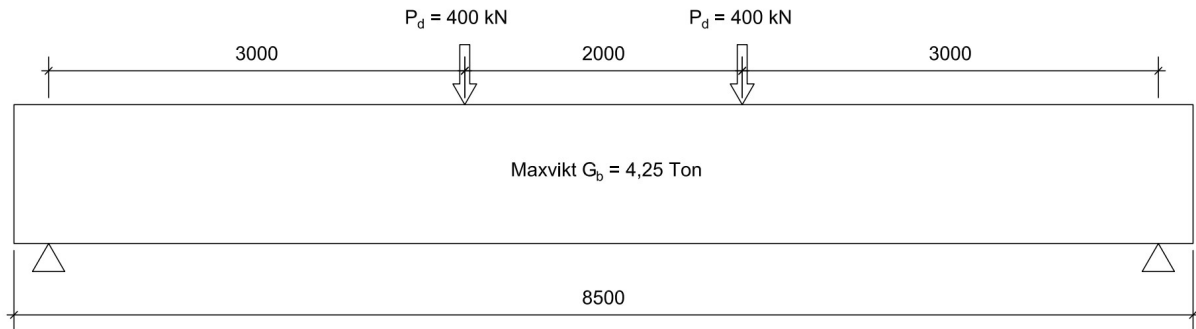
$$h_{duct} := 21 \text{ mm}$$

$$b_{duct} := 71 \text{ mm}$$

$$t_{duct} := 2 \text{ mm}$$

$$A_{duct} := (b_{duct} + 2 \cdot t_{duct}) \cdot (h_{duct} + 2 \cdot t_{duct}) = 1875 \text{ mm}^2$$

2 Geometry



$$l_{tot} := 8.5 \text{ m}$$

$$l := 8 \text{ m}$$

$$l_1 := 3 \text{ m}$$

$$l_2 := 2 \text{ m}$$

$$l_3 := 3 \text{ m}$$

$$b_{tf} = 320 \text{ mm}$$

$$h_{tf} = 130 \text{ mm}$$

Top flange

$$b_w = 150 \text{ mm}$$

$$h_w = 515 \text{ mm}$$

Web

$$h := h_{tf} + h_w = 645 \text{ mm}$$

Total height

$$d := h - c - \phi_w - \frac{\phi}{2} = 609 \text{ mm}$$

$$d' := c + \phi_w + \frac{\phi}{2} = 36 \text{ mm}$$

Effective height

3 Sectional constants

$$e_p = 314 \text{ mm} \quad P_{i,i} = 102 \text{ kN} \quad P_{i,l} := P_{i,i} \cdot n_p = 408 \text{ kN} \quad \text{Eccentricity of tendon and prestressing (iterative)}$$

3.1 Areas and centroids

$$A_{yf} := b_{yf} \cdot h_{yf} = 41600 \text{ mm}^2 \quad y_{yf} := \frac{h_{yf}}{2} = 65 \text{ mm} \quad \text{Top flange}$$

$$A_w := b_w \cdot h_w = 77250 \text{ mm}^2 \quad y_w := h_{yf} + \frac{h_w}{2} = 388 \text{ mm} \quad \text{Web}$$

$$A_{duct} = 1875 \text{ mm}^2 \quad y_{duct.net} := x_{net_it} + e_p = 584.1 \text{ mm} \quad \text{Ducts}$$

$$y_{duct,l} := x_{l_it} + e_p = 595.4 \text{ mm}$$

$$A_c := A_{yf} + A_w = 0.12 \text{ m}^2$$

$$\rho_c \cdot A_c \cdot l_{tot} < 4.5 \text{ tonne} = 1$$

$$A_{net} := A_c - A_{duct} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.12 \text{ m}^2$$

$$A_l := A_c + (\alpha_p - 1) \cdot A_p + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.13 \text{ m}^2$$

$$x_c := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w}{A_c} = 275 \text{ mm}$$

$$x_{net} := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w - A_{duct} \cdot y_{duct.net} + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_{net}} = 270 \text{ mm}$$

$$x_l := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot y_{duct,l} + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_l} = 281 \text{ mm}$$

$$e_{p,max} := h - x_c - c - \phi_w - \phi - t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 314 \text{ mm}$$

$$e_{net} := h - x_{net} - c - \phi_w - \phi - t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 318 \text{ mm}$$

$$e_l := h - x_l - c - \phi_w - \phi - 2 t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 305 \text{ mm}$$

$$d_p := x_c + e_p = 0.6 \text{ m}$$

3.2 Second moment of inertia

$$I_{f_c} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_c - y_{f_c})^2 \quad I_{f_{c.net}} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_{net} - y_{f_c})^2 \quad I_{f_{c.I}} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_I - y_{f_c})^2$$

$$I_{w_c} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_c - y_w)^2 \quad I_{w_{c.net}} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_{net} - y_w)^2 \quad I_{w_{c.I}} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_I - y_w)^2$$

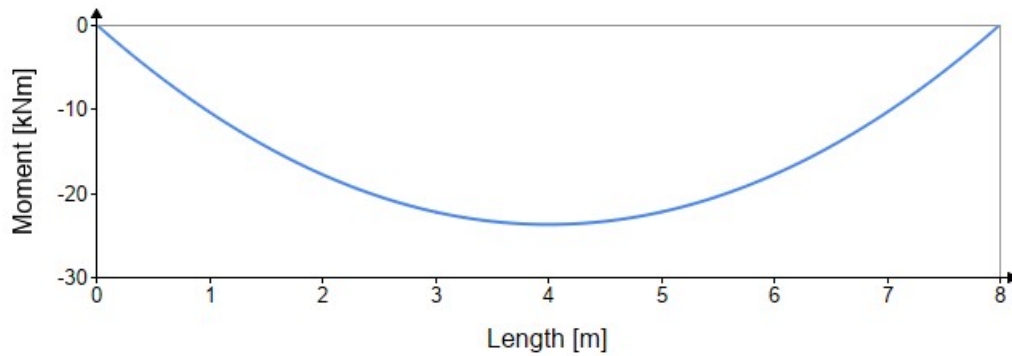
$$I_c := I_{f_c} + I_{w_c} = 0.00458 \text{ m}^4$$

$$I_{net} := I_{f_{c.net}} + I_{w_{c.net}} - A_{duct} \cdot (x_{net} - y_{duct.net})^2 = 0.0044 \text{ m}^4$$

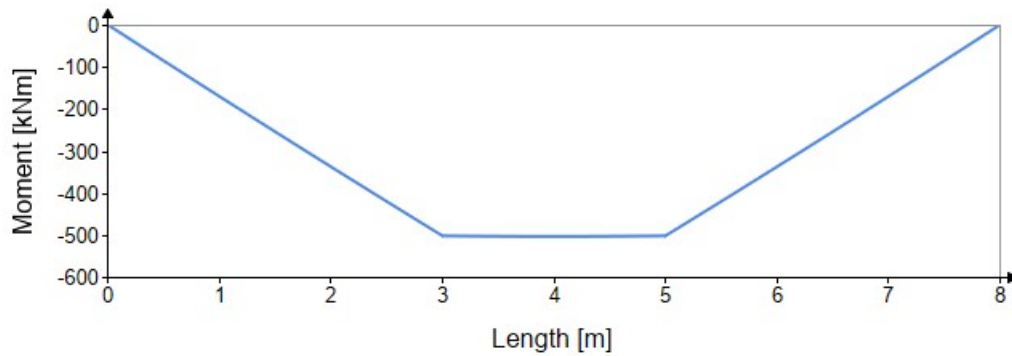
$$I_I := I_{f_{c.I}} + I_{w_{c.I}} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot (y_{duct.I} - x_I)^2 = 0.00484 \text{ m}^4$$

3 Load effects

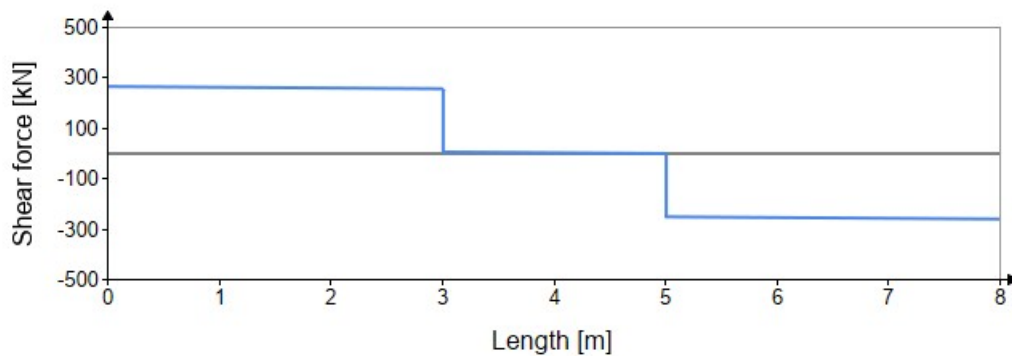
Moment distribution - self weight



Moment distribution - SLS



Shear force distribution - Pu



$$M_{g0,max} = 23.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{qp,max} = 503.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed,max} = 262.8 \text{ kN} \quad M_{Ed,max} = 776.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{for} \quad P_u = 251 \text{ kN}$$

4 Accurate design

4.1 Tendon force

$$\mu = 0.19 \quad k = 0.0075 \quad \alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{e_p}{l_1}\right) = 6^\circ$$

$$P_i := P_{i,l} \cdot e^{-\mu \cdot \left(a + k \cdot \frac{l}{2m}\right)} = 397.7 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cpi} := \frac{-P_i}{A_{net}} + \frac{-P_i \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot e_{net} = -10.7 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0i} := \frac{P_i}{E_p \cdot A_p} - \frac{\sigma_{cpi}}{E_{cm}} = 3.69 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{0i} := E_p \cdot \varepsilon_{p0i} \cdot A_p = 432 \text{ kN}$$

4.2 Before grouting

$$\sigma_{cti} := \frac{-P_{0i}}{A_{net}} + \frac{-P_{0i} \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot -x_{net} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max7} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti} \leq \sigma_{cti,max7} = 1$$

$$\sigma_{cci} := \frac{-P_{0i}}{A_{net}} + \frac{-P_{0i} \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot (h - x_{net}) = -13.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} = 21.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} \geq |\sigma_{cci}| = 1$$

4.3 After grouting

$$RH := 50$$

Relaxation class 2

$$\chi_{1000} = 2.5\% \quad \mu := 0.7$$

$$\chi_t(t) := 0.66 \cdot \chi_{1000} \cdot e^{9.1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-3}$$

$$t_\infty := 500000 \quad t := 100 \cdot 24 = 2400$$

$$\chi_\infty := \chi_t(t_\infty) = 0.039 \quad \chi_t := \chi_t(t) = 0.0117$$

Shrinkage

$$\varepsilon_{cdi} := 0.280 \cdot 10^{-3} \quad \text{Class N}$$

$$\beta_{RH} := 1.36 \quad \text{RH} = 50\%$$

$$u := 2 \cdot \left(\frac{b_f}{2} + h_f + h_w + \frac{b_w}{2} \right) = 1.8 \text{ m}$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 135 \text{ mm}$$

$$k_h := \begin{cases} \text{if } h_0 < 0.1 \cdot m & \\ \quad \parallel & \\ \quad \parallel 1 & \\ \text{else if } 0.1 \cdot m \leq h_0 \leq 0.2 \cdot m & \\ \quad \parallel & \\ \quad \parallel 1.0 - 0.15 \cdot \frac{(h_0 - 100 \cdot \text{mm})}{100 \cdot \text{mm}} & \\ \text{else if } 0.2 \cdot m \leq h_0 \leq 0.3 \cdot m & \\ \quad \parallel & \\ \quad \parallel \left(0.85 - 0.1 \cdot \frac{(h_0 - 200 \cdot \text{mm})}{100 \cdot \text{mm}} \right) & \\ \text{else if } 0.3 \cdot m \leq h_0 \leq 0.5 \cdot m & \\ \quad \parallel & \\ \quad \parallel \left(0.75 - 0.05 \cdot \frac{(h_0 - 300 \cdot \text{mm})}{200 \cdot \text{mm}} \right) & \\ \text{else if } h_0 > 0.5 \cdot m & \\ \quad \parallel & \\ \quad \parallel 0.7 & \end{cases} = 0.95$$

$$\varepsilon_{cd\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 3.61 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca\infty} := 0.1 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cs\infty} := \varepsilon_{cd\infty} + \varepsilon_{ca\infty} = 4.61 \cdot 10^{-4}$$

$$t := 100 \quad t_s := 4$$

$$\beta_{ds} := \frac{t - t_s}{t - t_s + 0.04 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0}{\text{mm}} \right)^3}} = 0.6$$

$$\beta_{as} := 1 - e^{-0.2t^{0.5}} = 0.86$$

$$\varepsilon_{cs} := \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cd\infty} + \beta_{as} \cdot \varepsilon_{ca\infty} = 3.05 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{cs.p} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_p = 36.6 \text{ kN}$$

$$F_{cs.s} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_s = 36.7 \text{ kN}$$

$$F'_{cs.s} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A'_s = 49 \text{ kN}$$

Creep

$$\varphi_{RH} := \left(1 + \frac{1 - RH\%}{0.1 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_0}{mm}}} \right) \cdot \left(\frac{35 \cdot MPa}{f_{cm}} \right)^{0.7} \cdot \left(\frac{35 \cdot MPa}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.31$$

$$\beta_{f_{cm}} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{MPa}}} = 2.3$$

$$t = 100 \quad t_0 := 28$$

$$\beta_{t_0} := \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} = 0.49$$

$$\alpha_3 := \left(\frac{35}{\frac{f_{cm}}{MPa}} \right)^{0.2} = 0.9$$

$$\beta_H := \min \left(1.5 \cdot \left(1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right) \cdot \frac{h_0}{mm} + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right) = 430.9$$

$$\beta_c := \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right) = 0.1$$

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 1.45$$

$$\varphi := \varphi_0 \cdot \beta_c = 0.2$$

$$\alpha_{s,ef} := \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi) = 6.6$$

$$\alpha_{p,ef} := \frac{E_p \cdot (1 - \chi_t)}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi) = 6.3$$

4.4 Effective sectional constants

$$A_{I,ef} := A_c + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.13 \text{ m}^2$$

$$x_{I,ef} := \frac{A_{tf} \cdot y_{tf} + A_w \cdot y_w + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p \cdot y_{duct,I} + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_{I,ef}} = 283 \text{ mm}$$

$$I_{tf,I,ef} := \frac{b_{tf} \cdot h_{tf}^3}{12} + A_{tf} \cdot (x_{I,ef} - y_{tf})^2$$

$$I_{w,I,ef} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_{I,ef} - y_w)^2$$

$$I_{I,ef} := I_{tf,I,ef} + I_{w,I,ef} + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p \cdot (y_{duct,I} - x_{I,ef})^2 = 0.005 \text{ m}^4$$

$$e_{p,ef} := d_p - x_{I,ef} = 306 \text{ mm}$$

$$e_{s,ef} := d - x_{I,ef} = 326 \text{ mm}$$

$$e'_{s,ef} := x_{I,ef} - d' = 247 \text{ mm}$$

$$\sigma_{cc,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{qt,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot -x_{I,ef} = -25.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{q,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot (h - x_{I,ef}) = 25.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} = 33.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} > |\sigma_{cc,t}| = 1$$

$$\sigma_{ct\infty,max} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct\infty,max} > \sigma_{ct,t} = 0$$

Cracking allowed

$$\sigma_{cp,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{qt,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot (d_p - x_{I,ef}) = 20.9 \text{ MPa}$$

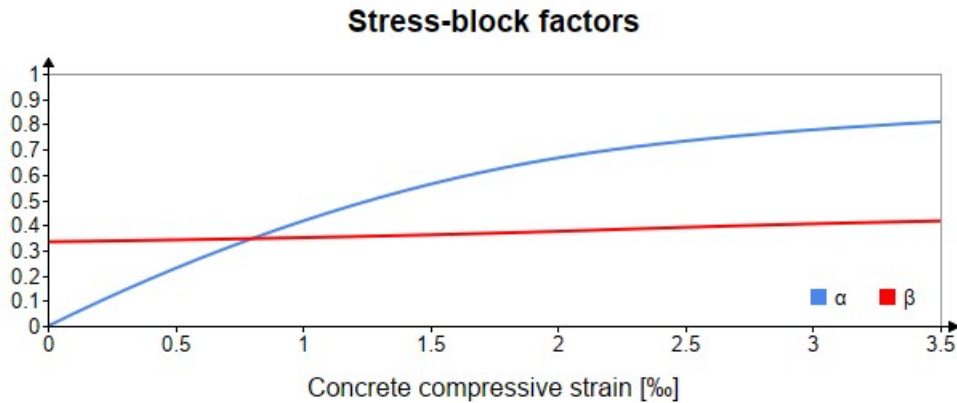
$$\sigma_{p0,t} := \frac{(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p})}{A_p} + \alpha_{p,ef} \cdot \sigma_{cp,t} = 783 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0,t} := \frac{\sigma_{p0,t}}{E_p} = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta\varepsilon_p := \varepsilon_{pd} - \varepsilon_{p0,t} = 4.9 \cdot 10^{-3}$$

22/10/2024

4.5 Moment capacity



$$\varepsilon_{cc} := \varepsilon_{cu} = 3.5 \cdot 10^{-3} \quad \alpha := \alpha_R(\varepsilon_{cc}) = 0.81 \quad \beta := \beta_R(\varepsilon_{cc}) = 0.42$$

$$x := 100 \text{ mm}$$

$$x := \text{root} \left(\alpha \cdot f_{cm} \cdot b_{ef} \cdot x + \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cc} \cdot E_s \cdot A'_s - f_{p0.1m} \cdot A_p - f_{ym} \cdot A_s, x \right) = 76 \text{ mm}$$

$$z := d - \beta \cdot x = 577 \text{ mm}$$

$$x < h_f = 1$$

$$\begin{aligned} \varepsilon'_s &:= \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cc} = 1.8 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_{sy} &= 2.75 \cdot 10^{-3} & \varepsilon'_s < \varepsilon_{sy} &= 1 \\ \varepsilon_s &:= \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cc} = 2.5 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{sy} &= 2.75 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} &= 0 \\ \varepsilon_p &:= \frac{d_p-x}{x} \cdot \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{p0.t} = 2.8 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{p0.1m} &= 9 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_p > \varepsilon_{p0.1m} &= 1 \end{aligned}$$

$$M_{Rd} := \alpha \cdot f_{cm} \cdot b_{ef} \cdot x \cdot (d_p - \beta \cdot x) + \varepsilon'_s \cdot E_s \cdot A'_s \cdot (d_p - d') + f_{ym} \cdot A_s \cdot (d - d_p) = 777 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed,max} = 777 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed,max} = 1$$

Minimum reinforcement amount

$$A_{s,min} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{ym}} \cdot b_w \cdot d = 169 \text{ mm}^2 \quad A_{s,max} := 0.04 \cdot A_c = 4754 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 603 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max} = 1$$

Shear between web and flanges

$$\Delta x := \frac{l}{4} = 2 \text{ m}$$

$$F_{c1} := \frac{M_{Ed}(\Delta x)}{z} = 900 \text{ kN}$$

$$\Delta F_1 := \frac{b_{ef} - b_w}{2 \cdot b_{ef}} \cdot F_{c1} - \frac{V_{Ed}(\Delta x)}{2} = 110.6 \text{ kN}$$

$$v_{Ed1} := \frac{\Delta F_1}{h_{ef} \cdot \Delta x} = 0.4 \text{ MPa} \quad 0.4 \cdot f_{ctm} = 1.6 \text{ MPa} \quad v_{Ed1} < 0.4 \cdot f_{ctm} = 1$$

$$F_{c2} := \frac{M_{Ed,max}}{z} = 1345 \text{ kN}$$

$$\Delta F_2 := \frac{b_{ef} - b_w}{2 \cdot b_{ef}} \cdot (F_{c2} - F_{c1}) = 118 \text{ kN}$$

$$v_{Ed2} := \frac{\Delta F_2}{h_{ef} \cdot \Delta x} = 0.5 \text{ MPa} \quad 0.4 \cdot f_{ctm} = 1.6 \text{ MPa} \quad v_{Ed2} < 0.4 \cdot f_{ctm} = 1$$

4.6 Crack width

$$x_{II} = 168 \text{ mm}$$

$$A_{cc} := b_{yf} \cdot h_{yf} + b_w \cdot (x_{II} - h_{yf}) = 0.047 \text{ m}^2$$

$$A_{II} := A_{cc} + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s + \alpha_s \cdot A_s + \alpha_p \cdot A_p = 0.057 \text{ m}^2$$

$$x_{tp} := \frac{\frac{b_{yf} \cdot h_{yf}^2}{2} + b_w \cdot (x_{II} - h_{yf}) \cdot \left(\frac{x_{II} - h_{yf}}{2} + h_{yf} \right) + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot d' + \alpha_s \cdot A_s \cdot d + \alpha_p \cdot A_p \cdot d_p}{A_{II}} = 132 \text{ mm}$$

$$I_{II} := \frac{b_{yf} \cdot h_{yf}^3}{12} + b_{yf} \cdot h_{yf} \cdot \left(\frac{h_{yf}}{2} - x_{tp} \right)^2 + \frac{b_w \cdot (x_{II} - h_{yf})^3}{12} + b_w \cdot (x_{II} - h_{yf}) \cdot \left(\frac{x_{II} - h_{yf}}{2} + h_{yf} - x_{tp} \right)^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot (x_{tp} - d')^2 + \alpha_s \cdot A_s \cdot (d - x_{tp})^2 + \alpha_p \cdot A_p \cdot (d_p - x_{tp})^2 \quad \downarrow = 0.0017 \text{ m}^4$$

$$e_{II} := d_p - x_{tp} = 457 \text{ mm}$$

$$\sigma_c(z) := \frac{-P_i}{A_{II}} + \frac{-P_i \cdot e_{II} + M_{qp,max}}{I_{II}} \cdot z$$

$$\sigma_c(x_{II} - x_{tp}) = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c(-x_{tp}) = -32 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s := \alpha_s \cdot \sigma_c(d - x_{tp}) = 457 \text{ MPa}$$

$$a_y := c + \frac{\phi}{2} = 28 \text{ mm}$$

$$h_{c,eff} := \min\left(a_y + 5 \cdot \phi, 10 \cdot \phi, 3.5 \cdot a_y, h - x_{II}, \frac{h}{2}\right) = 98 \text{ mm} \quad A_{eff} := h_{c,eff} \cdot b_w = 0.01 \text{ m}^2$$

$$\xi := 0.5 \quad \xi_l := \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi}{\phi_p}} = 0.7$$

$$\rho_{p,ef} := \frac{A_s + \xi_l \cdot A_p}{A_{eff}} = 0.07$$

$$k_{fl} := \frac{h - h_{c,eff}}{h} = 0.8$$

$$k_b := 0.9$$

$$k_w := 1.7$$

$$k_{lr} := \frac{h - x_{II}}{h - a_y - x_{II}} = 1.1$$

$$s_{r,max} := k_w \cdot k_{lr} \cdot \min\left(\left(1.5 \cdot c + \frac{k_{fl} \cdot k_b \cdot \phi}{7.2 \cdot \rho_{p,ef}}\right), \frac{1.3}{k_w} \cdot (h - x_{II})\right) = 98 \text{ mm}$$

$$k_t := 0.6$$

$$\Delta\varepsilon := \max\left(\frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,ef}} \cdot (1 + \alpha_s \cdot \rho_{p,ef})}{E_s}, (1 - k_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}\right) = 2.1 \cdot 10^{-3}$$

$$w_k := \Delta\varepsilon \cdot s_{r,max} = 0.2 \text{ mm}$$

4.7 Shear capacity

$$P_d := \sigma_{p0,t} \cdot A_p = 470 \text{ kN} \quad \alpha_p := \text{atan} \left(\frac{e_p}{l_1} \right) = 6^\circ$$

$$V_{ipd} := P_d \cdot \tan(\alpha_p) = 49.2 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.net} := V_{Ed.max} - V_{ipd} = 213.7 \text{ kN}$$

$$\tau_{Ed.net} := \frac{V_{Ed.net}}{b_w \cdot z} = 2.5 \text{ MPa} \quad \tau_{Ed} := \frac{V_{Ed.max}}{b_w \cdot z} = 3 \text{ MPa}$$

Shear capacity of cracked concrete without shear reinforcement

$$a_{cs} := \frac{M_{Ed.max}}{V_{Ed.max}} = 3 \text{ m}$$

$$k_l := \min \left(\frac{0.7}{a_{cs}} \cdot \left(e_p + \frac{d}{3} \right) \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z}, 0.25 \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z} \right) = 0.2$$

$$k_{vp} := 1 + \frac{-P_i \cdot d}{V_{Ed.max} \cdot 3 \cdot a_{cs}} = 0.9$$

$$d := \frac{d^2 \cdot A_s + d_p^2 \cdot A_p}{d \cdot A_s + d_p \cdot A_p} = 599 \text{ mm}$$

$$\rho_l := \frac{d \cdot A_s + d_p \cdot A_p}{b_w \cdot d^2} = 0.0133$$

$$\sigma_{cp} := \min \left(\frac{P_i}{A_c}, 0.2 \cdot f_{cm} \right) = 3.3 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rdc.0} := 0.66 \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{cm}}{\text{MPa}} \cdot \frac{40 \text{ mm}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} = 1.1 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rd.c} := \tau_{Rdc.0} + k_l \cdot \sigma_{cp} = 1.7 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{Ed.net}}{\tau_{Rd.c}} = 147\%$$

Shear capacity of cracked concrete with shear reinforcement

$$\theta := 21.8 \text{ deg}$$

$$s_w := 210 \text{ mm}$$

$$A_{sw} := \frac{\phi_w^2}{4} \cdot \pi = 50 \text{ mm}^2$$

$$\rho_w := \frac{2 \cdot A_{sw}}{b_w \cdot s_w} = 0.00319$$

$$\tau_{Rd.sy} := \rho_w \cdot f_{ym} \cdot \cot(\theta) = 4.4 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{Ed.net}}{\tau_{Rd.sy}} = 56\%$$

$$n_w := 2 \cdot \left(\frac{l_l}{s_w} + 1 \right) = 30.6$$

$$l_w = 1.5 \text{ m}$$

Minimum shear reinforcement amount

$$\rho_{w.min} := 0.08 \cdot \frac{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}}{\frac{f_{ym}}{\text{MPa}}} = 0.0011$$

$$\alpha := 90^\circ$$

$$s_{w.max} := \frac{2 \cdot A_{sw}}{b_w \cdot \sin(\alpha) \cdot \rho_{w.min}} = 620 \text{ mm}$$

$$s_{l.max} := 0.75 \cdot d \cdot (1 + \cot(\alpha)) = 449 \text{ mm}$$

$$s_w < \min(s_{w.max}, s_{l.max}) = 1$$

4.8 Anchorage zone

$$\gamma_p := 1.2$$

$$P := \gamma_p \cdot P_{i,1} = 489.6 \text{ kN}$$

$$0.2 \cdot h = 129 \text{ mm}$$

$$h_p := 80 \text{ mm}$$

$$b_p := 120 \text{ mm}$$

$$\sigma_{cc} := \frac{P}{h_p \cdot b_p} = 51 \text{ MPa} \quad f_{cm} = 55.2 \text{ MPa} \quad 3 \cdot f_{cm} = 165.5 \text{ MPa}$$

Vertical reinforcement

$$a := h_p = 80 \text{ mm} \quad h = 645 \text{ mm} \quad b := \frac{h}{2} = 323 \text{ mm}$$

$$T := \frac{1}{4} \cdot \frac{b-a}{b} \cdot P = 92 \text{ kN}$$

$$A_v := \frac{T}{f_{ym}} = 167 \text{ mm}^2$$

$$n_v := \text{ceil} \left(\frac{A_v}{2 \cdot \frac{(8 \text{ mm})^2}{4} \cdot \pi} \right) = 2$$

4.9 Buckling

$$l_0 := l_{tot} = 8500 \text{ mm}$$

$$i := \sqrt{\frac{I_c}{A_c}} = 196.3 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{l_0}{i} = 43.3$$

$$n := \frac{P}{f_{cm} \cdot A_c} = 0.07$$

$$\lambda_{lim} := \frac{10.8}{\sqrt{n}} = 39.5$$

$$A := \frac{1}{1 + 0.2 \cdot \varphi} = 0.96$$

$$\omega := \frac{A_s \cdot f_{ym}}{A_c \cdot f_{cm}} = 0.1$$

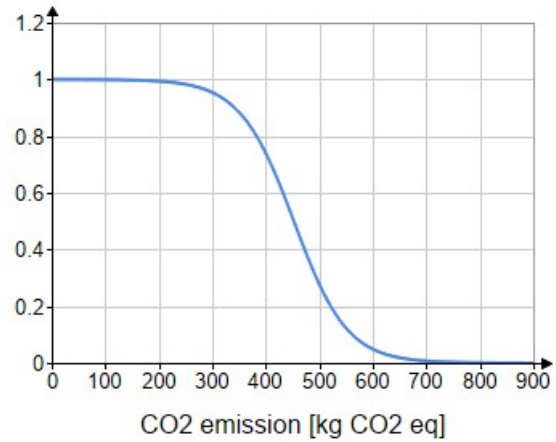
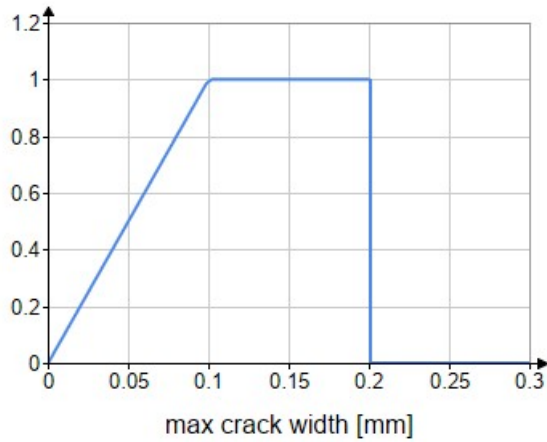
$$B := \sqrt{1 + 2 \cdot \omega} = 1.05$$

$$C := 0.7$$

$$\lambda_{lim} := \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} = 51.6$$

$$\lambda < \lambda_{lim} = 1$$

5 Evaluation



$$w_k = 0.2 \text{ mm} \quad \beta_1(w_k) = 1$$

$$V_{conc} := A_c \cdot l_{tot} = 1.01 \text{ m}^3$$

$$GWP_{conc} := 340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad V_{conc} \cdot GWP_{conc} = 343.5 \text{ kg}$$

$$V_{steel} := A_{s,tot} \cdot l_{tot} + A_{sw} \cdot l_w \cdot n_w + A_p \cdot l_p + A_{sv} \cdot l_v \cdot n_v = 0.0195 \text{ m}^3$$

$$W_{steel} := V_{steel} \cdot \rho_s = 0.153 \text{ tonne}$$

$$GWP_{steel} := 370 \frac{\text{kg}}{\text{tonne}} \quad W_{steel} \cdot GWP_{steel} = 56.7 \text{ kg}$$

$$\beta_2(V_{conc} \cdot GWP_{conc} + W_{steel} \cdot GWP_{steel}) = 0.73$$

$$\beta_1(w_k) \cdot \beta_2(V_{conc} \cdot GWP_{conc} + W_{steel} \cdot GWP_{steel}) = 0.73$$

1 Material

1.1 Concrete

$$\rho_c := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

28 days

$$f_{cm.kub} := 66.2 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} := \frac{f_{cm.kub}}{1.2} = 55.2 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{cm} - 8 \text{ MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} \text{ GPa} = 36.7 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} := 0.6 \cdot f_{cm} = 33.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max} := 0.45 \cdot f_{cm} = 24.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct\infty,max} := f_{ctm} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max} := f_{ctm} = 3.9 \text{ MPa}$$

7 days

$$f_{cm7} := 0.87 \cdot f_{cm} = 48 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm7} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{cm7} - 8 \text{ MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$E_{cm7} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm7}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} \text{ GPa} = 35.2 \text{ GPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} := 0.45 \cdot f_{cm7} = 21.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max7} := f_{ctm7} = 3.5 \text{ MPa}$$

1.2 Reinforcing steel

$$f_{ym} := 550 \text{ MPa}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\phi := 16 \text{ mm} \quad A_{s,i} := \frac{\phi^2}{4} \cdot \pi = 201 \text{ mm}^2$$

$$n_s = 3 \quad A_s := n_s \cdot A_{s,i} = 603 \text{ mm}^2$$

$$n'_s = 4 \quad A'_s := n'_s \cdot A_{s,i} = 804 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,tot} := A_s + A'_s = 1407 \text{ mm}^2$$

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

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

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.4$$

$$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

1.3 Steel fiber reinforcement

$$\rho_{fs} := \begin{bmatrix} 25 \\ 30 \\ 35 \\ 40 \\ 45 \\ 50 \end{bmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad f_{ts1} := \begin{bmatrix} 1.6 \\ 1.82 \\ 2.01 \\ 2.18 \\ 2.33 \\ 2.45 \end{bmatrix} \text{ MPa} \quad f_{ts3} := \begin{bmatrix} 1.28 \\ 1.45 \\ 1.6 \\ 1.73 \\ 1.84 \\ 1.94 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

$$i_{fs} = 3$$

$$\rho_{fs} := \rho_{fs_{i_{fs}}} = 35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f_{ts1} := f_{ts1_{i_{fs}}} = 2.01 \text{ MPa}$$

$$f_{ts3} := f_{ts3_{i_{fs}}} = 1.6 \text{ MPa}$$

$$f_{tR1} := \frac{f_{ts1}}{0.45} = 4.5 \text{ MPa}$$

1.4 Prestressing steel

Post-tensioning system - Strand properties.

Steel designation	Y1860S7
Nominal diameter	15.7 mm
Tensile strength, f_{puk}	1860 MPa
Steel area, A_{pi}	150 mm ²
Breaking load, $f_{puk} \cdot A_{pi}$	279 kN
0.1 % proof load	246 kN
Max strand load, $0.8 \cdot f_{puk} \cdot A_{pi}$	221 kN

$$E_p := 195 \text{ GPa}$$

$$\mu := 0.19$$

$$k := 0.0075$$

$$f_{pum} := 1986 \text{ MPa}$$

$$f_{p0.1m} := 0.88 \cdot f_{pum} = 1748 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0.1m} := \frac{f_{p0.1m}}{E_p} = 8.96 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{uk} := 3.5\%$$

$$\chi_{1000} := 2.5\%$$

$$\phi_p := 15.7 \text{ mm}$$

$$A_{p,i} := 150 \text{ mm}^2$$

$$n_p = 4$$

$$A_p := n_p \cdot A_{p,i} = 600 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_p := \frac{E_p}{E_{cm}} = 5.3$$

$$P_{i,max} := 0.8 \cdot f_{pum} \cdot A_{p,i} = 238.3 \text{ kN}$$

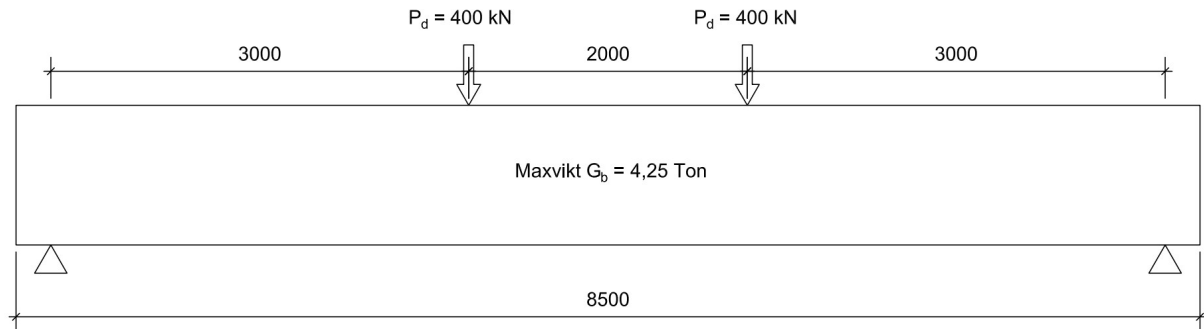
$$h_{duct} := 21 \text{ mm}$$

$$b_{duct} := 71 \text{ mm}$$

$$t_{duct} := 2 \text{ mm}$$

$$A_{duct} := (b_{duct} + 2 \cdot t_{duct}) \cdot (h_{duct} + 2 \cdot t_{duct}) = 1875 \text{ mm}^2$$

2 Geometry



$$l_{tot} := 8.5 \text{ m}$$

$$l := 8 \text{ m}$$

$$l_1 := 3 \text{ m}$$

$$l_2 := 2 \text{ m}$$

$$l_3 := 3 \text{ m}$$

$$b_{tf} = 320 \text{ mm}$$

$$h_{tf} = 130 \text{ mm}$$

Top flange

$$b_w = 150 \text{ mm}$$

$$h_w = 460 \text{ mm}$$

Web

$$h := h_{tf} + h_w = 590 \text{ mm}$$

Total height

$$d := h - c - \phi_w - \frac{\phi}{2} = 554 \text{ mm}$$

$$d' := c + \phi_w + \frac{\phi}{2} = 36 \text{ mm}$$

Effective height

3 Sectional constants

$$e_p = 284 \text{ mm} \quad P_{i,i} = 97 \text{ kN} \quad P_{i,l} := P_{i,i} \cdot n_p = 388 \text{ kN} \quad \text{Eccentricity of tendon and prestressing (iterative)}$$

3.1 Areas and centroids

$$A_{yf} := b_{yf} \cdot h_{yf} = 41600 \text{ mm}^2 \quad y_{yf} := \frac{h_{yf}}{2} = 65 \text{ mm} \quad \text{Top flange}$$

$$A_w := b_w \cdot h_w = 69000 \text{ mm}^2 \quad y_w := h_{yf} + \frac{h_w}{2} = 360 \text{ mm} \quad \text{Web}$$

$$A_{duct} = 1875 \text{ mm}^2 \quad y_{duct.net} := x_{net_it} + e_p = 529.5 \text{ mm} \quad \text{Ducts}$$

$$y_{duct,l} := x_{l_it} + e_p = 540.3 \text{ mm}$$

$$A_c := A_{yf} + A_w = 0.11 \text{ m}^2$$

$$\rho_c \cdot A_c \cdot l_{tot} < 4.5 \text{ tonne} = 1$$

$$A_{net} := A_c - A_{duct} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.11 \text{ m}^2$$

$$A_l := A_c + (\alpha_p - 1) \cdot A_p + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.12 \text{ m}^2$$

$$x_c := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w}{A_c} = 249 \text{ mm}$$

$$x_{net} := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w - A_{duct} \cdot y_{duct.net} + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_{net}} = 245 \text{ mm}$$

$$x_l := \frac{A_{yf} \cdot y_{yf} + A_w \cdot y_w + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot y_{duct,l} + (\alpha_s - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_l} = 256 \text{ mm}$$

$$e_{p,max} := h - x_c - c - \phi_w - \phi - t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 284 \text{ mm}$$

$$e_{net} := h - x_{net} - c - \phi_w - \phi - t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 289 \text{ mm}$$

$$e_l := h - x_l - c - \phi_w - \phi - t_{duct} - \frac{h_{duct}}{2} = 278 \text{ mm}$$

$$d_p := x_c + e_p = 0.5 \text{ m}$$

3.2 Second moment of inertia

$$I_{f_c} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_c - y_{f_c})^2 \quad I_{f_{c.net}} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_{net} - y_{f_c})^2 \quad I_{f_{c.I}} := \frac{b_{f_c} \cdot h_{f_c}^3}{12} + A_{f_c} \cdot (x_I - y_{f_c})^2$$

$$I_{w_c} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_c - y_w)^2 \quad I_{w_{c.net}} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_{net} - y_w)^2 \quad I_{w_{c.I}} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_I - y_w)^2$$

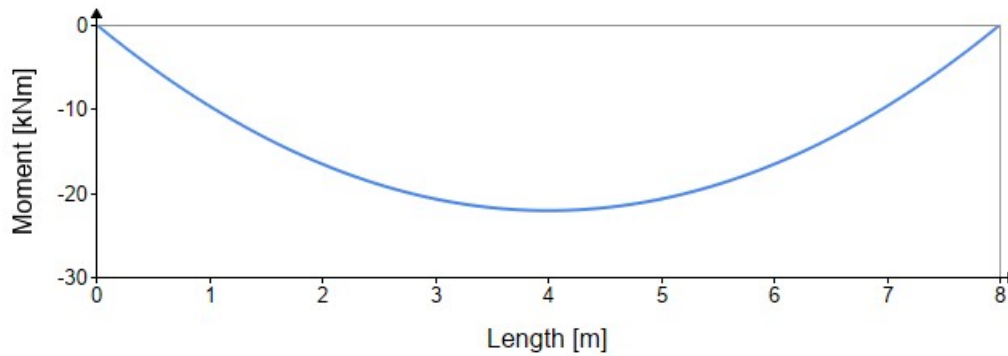
$$I_c := I_{f_c} + I_{w_c} = 0.00353 \text{ m}^4$$

$$I_{net} := I_{f_{c.net}} + I_{w_{c.net}} - A_{duct} \cdot (x_{net} - y_{duct.net})^2 = 0.00338 \text{ m}^4$$

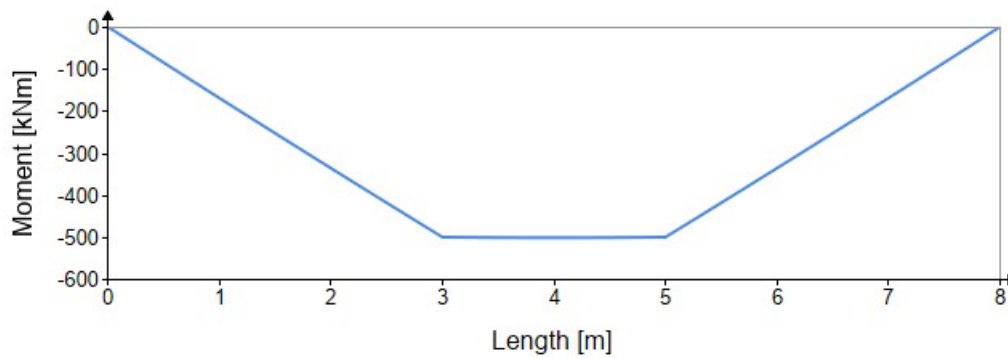
$$I_I := I_{f_{c.I}} + I_{w_{c.I}} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot (y_{duct.I} - x_I)^2 = 0.00375 \text{ m}^4$$

3 Load effects

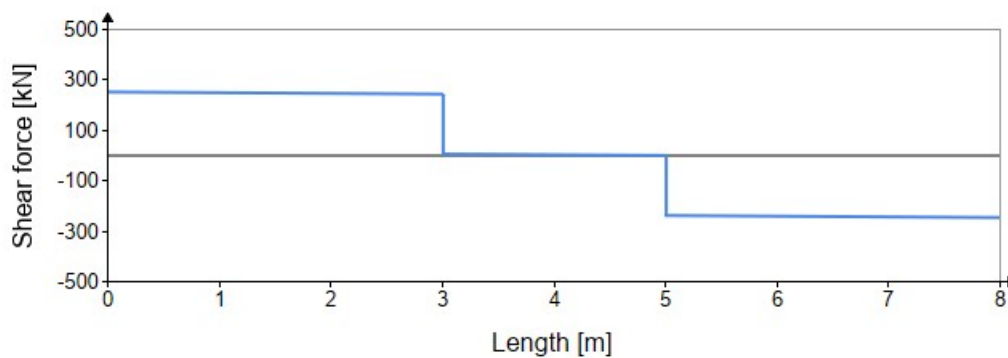
Moment distribution - self weight



Moment distribution - SLS



Shear force distribution - Pu



$$M_{g0,max} = 22.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{qp,max} = 502.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed,max} = 249.1 \text{ kN} \quad M_{Ed,max} = 736.1 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{for} \quad P_u = 238 \text{ kN}$$

4 Accurate design

4.1 Tendon force

$$\mu = 0.19 \quad k = 0.0075 \quad \alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{e_p}{l_1}\right) = 5.4^\circ$$

$$P_i := P_{i,1} \cdot e^{-\mu \cdot \left(a + k \cdot \frac{l}{2m}\right)} = 378.9 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cpi} := \frac{-P_i}{A_{net}} + \frac{-P_i \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot e_{net} = -10.7 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0i} := \frac{P_i}{E_p \cdot A_p} - \frac{\sigma_{cpi}}{E_{cm}} = 3.53 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{0i} := E_p \cdot \varepsilon_{p0i} \cdot A_p = 413 \text{ kN}$$

4.2 Before grouting

$$\sigma_{cti} := \frac{-P_{0i}}{A_{net}} + \frac{-P_{0i} \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot -x_{net} = 3.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti,max7} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cti} \leq \sigma_{cti,max7} = 1$$

$$\sigma_{cci} := \frac{-P_{0i}}{A_{net}} + \frac{-P_{0i} \cdot e_{net} + M_{g0,max}}{I_{net}} \cdot (h - x_{net}) = -13.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} = 21.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cci,max7} \geq |\sigma_{cci}| = 1$$

4.3 After grouting

$$RH := 50$$

Relaxation class 2

$$\chi_{1000} = 2.5\% \quad \mu := 0.7$$

$$\chi_t(t) := 0.66 \cdot \chi_{1000} \cdot e^{9.1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-3}$$

$$t_\infty := 500000 \quad t := 100 \cdot 24 = 2400$$

$$\chi_\infty := \chi_t(t_\infty) = 0.039 \quad \chi_t := \chi_t(t) = 0.0117$$

Shrinkage

$$\varepsilon_{cdi} := 0.280 \cdot 10^{-3} \quad \text{Class N}$$

$$\beta_{RH} := 1.36 \quad \text{RH} = 50\%$$

$$u := 2 \cdot \left(\frac{b_f}{2} + h_f + h_w + \frac{b_w}{2} \right) = 1.7 \text{ m}$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 134 \text{ mm}$$

$$k_h := \begin{cases} \text{if } h_0 < 0.1 \cdot m & \\ \quad \parallel 1 & \\ \text{else if } 0.1 \cdot m \leq h_0 \leq 0.2 \cdot m & \\ \quad \parallel 1.0 - 0.15 \cdot \frac{(h_0 - 100 \cdot \text{mm})}{100 \cdot \text{mm}} & \\ \text{else if } 0.2 \cdot m \leq h_0 \leq 0.3 \cdot m & \\ \quad \parallel \left(0.85 - 0.1 \cdot \frac{(h_0 - 200 \cdot \text{mm})}{100 \cdot \text{mm}} \right) & \\ \text{else if } 0.3 \cdot m \leq h_0 \leq 0.5 \cdot m & \\ \quad \parallel \left(0.75 - 0.05 \cdot \frac{(h_0 - 300 \cdot \text{mm})}{200 \cdot \text{mm}} \right) & \\ \text{else if } h_0 > 0.5 \cdot m & \\ \quad \parallel 0.7 & \end{cases} = 0.95$$

$$\varepsilon_{cd\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 3.61 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca\infty} := 0.1 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cs\infty} := \varepsilon_{cd\infty} + \varepsilon_{ca\infty} = 4.61 \cdot 10^{-4}$$

$$t := 100 \quad t_s := 4$$

$$\beta_{ds} := \frac{t - t_s}{t - t_s + 0.04 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0}{\text{mm}} \right)^3}} = 0.61$$

$$\beta_{as} := 1 - e^{-0.2t^{0.5}} = 0.86$$

$$\varepsilon_{cs} := \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cd\infty} + \beta_{as} \cdot \varepsilon_{ca\infty} = 3.06 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{cs.p} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_p = 36.7 \text{ kN}$$

$$F_{cs.s} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A_s = 36.9 \text{ kN}$$

$$F'_{cs.s} := E_s \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A'_s = 49.2 \text{ kN}$$

Creep

$$\varphi_{RH} := \left(1 + \frac{1 - RH\%}{0.1 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_0}{mm}}} \right) \cdot \left(\frac{35 \cdot MPa}{f_{cm}} \right)^{0.7} \cdot \left(\frac{35 \cdot MPa}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.31$$

$$\beta_{f_{cm}} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{MPa}}} = 2.3$$

$$t = 100 \quad t_0 := 28$$

$$\beta_{t_0} := \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} = 0.49$$

$$\alpha_3 := \left(\frac{35}{\frac{f_{cm}}{MPa}} \right)^{0.2} = 0.9$$

$$\beta_H := \min \left(1.5 \cdot \left(1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right) \cdot \frac{h_0}{mm} + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right) = 429.4$$

$$\beta_c := \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right) = 0.1$$

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 1.45$$

$$\varphi := \varphi_0 \cdot \beta_c = 0.2$$

$$\alpha_{s,ef} := \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi) = 6.6$$

$$\alpha_{p,ef} := \frac{E_p \cdot (1 - \chi_t)}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi) = 6.3$$

4.4 Effective sectional constants

$$A_{I,ef} := A_c + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A_{s,tot} = 0.12 \text{ m}^2$$

$$x_{I,ef} := \frac{A_{tf} \cdot y_{tf} + A_w \cdot y_w + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p \cdot y_{duct,I} + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A'_s \cdot d' + (\alpha_{s,ef} - 1) \cdot A_s \cdot d}{A_{I,ef}} = 257 \text{ mm}$$

$$I_{tf,I,ef} := \frac{b_{tf} \cdot h_{tf}^3}{12} + A_{tf} \cdot (x_{I,ef} - y_{tf})^2$$

$$I_{w,I,ef} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot (x_{I,ef} - y_w)^2$$

$$I_{I,ef} := I_{tf,I,ef} + I_{w,I,ef} + (\alpha_{p,ef} - 1) \cdot A_p \cdot (y_{duct,I} - x_{I,ef})^2 = 0.004 \text{ m}^4$$

$$e_{p,ef} := d_p - x_{I,ef} = 276 \text{ mm}$$

$$e_{s,ef} := d - x_{I,ef} = 297 \text{ mm}$$

$$e'_{s,ef} := x_{I,ef} - d' = 221 \text{ mm}$$

$$\sigma_{cc,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{qt,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot -x_{I,ef} = -30.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{q,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot (h - x_{I,ef}) = 31.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} = 33.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc\infty,max} > |\sigma_{cc,t}| = 1$$

$$\sigma_{ct\infty,max} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct\infty,max} > \sigma_{ct,t} = 0$$

Cracking allowed

$$\sigma_{cp,t} := \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \downarrow + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} - F'_{cs,s} \end{matrix}}{A_{I,ef}} + \frac{\begin{matrix} -(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p}) \cdot e_{p,ef} \downarrow \\ + F_{cs,s} \cdot e_{s,ef} - F'_{cs,s} \cdot e'_{s,ef} \downarrow \\ + M_{g0,max} + M_{qt,max} \end{matrix}}{I_{I,ef}} \cdot (d_p - x_{I,ef}) = 25.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p0,t} := \frac{(1-\chi_t) \cdot (P_{0i} - F_{cs,p})}{A_p} + \alpha_{p,ef} \cdot \sigma_{cp,t} = 784 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0,t} := \frac{\sigma_{p0,t}}{E_p} = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta\varepsilon_p := \varepsilon_{pd} - \varepsilon_{p0,t} = 4.9 \cdot 10^{-3}$$

4.5 Moment capacity

$$\varepsilon_{cc} := 6 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda := 0.8 \quad \eta := 1.0$$

$$x := 100 \text{ mm}$$

$$x := \text{root} \left(\begin{array}{l} \eta \cdot f_{cm} \cdot b_{ef} \cdot \lambda \cdot x + f_{ym} \cdot A'_s - f_{p0.1m} \cdot A_p \downarrow, x \\ -f_{ym} \cdot A_s - f_{ts3} \cdot b_w \cdot (h - x) \end{array} \right) = 75 \text{ mm}$$

$$z := d - \frac{\lambda \cdot x}{2} = 524 \text{ mm}$$

$$\lambda \cdot x < h_{ef} = 1$$

$$\begin{array}{lll} \varepsilon'_s := \frac{x - d'}{x} \cdot \varepsilon_{cc} = 3.1 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_{sy} = 2.75 \cdot 10^{-3} & \varepsilon'_s > \varepsilon_{sy} = 1 \\ \varepsilon_s := \frac{d - x}{x} \cdot \varepsilon_{cc} = 3.8 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{sy} = 2.75 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_s > \varepsilon_{sy} = 1 \\ \varepsilon_p := \frac{d_p - x}{x} \cdot \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{p0.1} = 4.1 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{p0.1m} = 9 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_p > \varepsilon_{p0.1m} = 1 \end{array}$$

$$M_{Rd} := \eta \cdot f_{cm} \cdot b_{ef} \cdot \lambda \cdot x \cdot \left(d_p - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) + f_{ym} \cdot A'_s \cdot (d_p - d') + f_{ym} \cdot A_s \cdot (d - d_p) \downarrow = 736 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$-f_{ts3} \cdot b_w \cdot (h - x) \cdot \left(d_p - x - \frac{h - x}{2} \right)$$

$$M_{Ed,max} = 736 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed,max} = 1$$

Minimum reinforcement amount

$$A_{s,min} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{ym}} \cdot b_w \cdot d = 154 \text{ mm}^2 \quad A_{s,max} := 0.04 \cdot A_c = 4424 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 603 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,max} = 1$$

Shear between web and flanges

$$\Delta x := \frac{l}{4} = 2 \text{ m}$$

$$F_{c1} := \frac{M_{Ed}(\Delta x)}{z} = 940 \text{ kN}$$

$$\Delta F_1 := \frac{b_{ef} - b_w}{2 \cdot b_{ef}} \cdot F_{c1} - \frac{V_{Ed}(\Delta x)}{2} = 128 \text{ kN}$$

$$v_{Ed1} := \frac{\Delta F_1}{h_{ef} \cdot \Delta x} = 0.5 \text{ MPa} \quad 0.4 \cdot f_{ctm} = 1.6 \text{ MPa} \quad v_{Ed1} < 0.4 \cdot f_{ctm} = 1$$

$$F_{c2} := \frac{M_{Ed,max}}{z} = 1405 \text{ kN}$$

$$\Delta F_2 := \frac{b_{ef} - b_w}{2 \cdot b_{ef}} \cdot (F_{c2} - F_{c1}) = 123 \text{ kN}$$

$$v_{Ed2} := \frac{\Delta F_2}{h_{ef} \cdot \Delta x} = 0.5 \text{ MPa} \quad 0.4 \cdot f_{ctm} = 1.6 \text{ MPa} \quad v_{Ed2} < 0.4 \cdot f_{ctm} = 1$$

4.6 Crack width

$$\sigma_c = 34 \text{ MPa} \quad x_{II} = 174 \text{ mm}$$

$$\sigma_s := \alpha_s \cdot \frac{(d - x_{II})}{x_{II}} \cdot \sigma_c = 410 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_s := \alpha_s \cdot \frac{(x_{II} - d')}{x_{II}} \cdot \sigma_c = 148 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p0} := \frac{P_{0i}}{A_p} = 689 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p := \alpha_p \cdot \frac{(d_p - x_{II})}{x_{II}} \cdot \sigma_c + \sigma_{p0} = 1067 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_s \cdot A'_s + b_{fy} \cdot h_{fy} \cdot \frac{\sigma_c + \frac{x_{II} - h_{fy}}{x_{II}} \cdot \sigma_c}{2} - \sigma_p \cdot A_p - \sigma_s \cdot A_s - f_{ts1} \cdot b_w \cdot (h - x_{II}) = 0 \text{ kN}$$

$$\sigma'_s \cdot A'_s \cdot (d_p - d') + b_{fy} \cdot h_{fy} \cdot \frac{\sigma_c + \frac{x_{II} - h_{fy}}{x_{II}} \cdot \sigma_c}{2} \cdot \left(d_p - \frac{h_{fy}}{2} \right) + \sigma_s \cdot A_s \cdot (d - d_p) \uparrow = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$+ f_{ts1} \cdot b_w \cdot (h - x_{II}) \cdot \left(d_p - x_{II} - \frac{h - x_{II}}{2} \right) - M_{qp,max}$$

$$a_y := c + \frac{\phi}{2} = 28 \text{ mm}$$

$$h_{c,eff} := \min\left(a_y + 5 \cdot \phi, 10 \cdot \phi, 3.5 \cdot a_y, h - x_{II}, \frac{h}{2}\right) = 98 \text{ mm} \quad A_{eff} := h_{c,eff} \cdot b_w = 0.01 \text{ m}^2$$

$$\xi := 0.5$$

$$\xi_l := \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi}{\phi_p}} = 0.7$$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_s + \xi_l \cdot A_p}{A_{eff}} = 0.07$$

$$\alpha_f := \min\left(\frac{f_{tsI}}{f_{ctm}}, 1\right) = 0.5$$

$$k_{fl} := \frac{h - h_{c,eff}}{h} = 0.8 \quad k_b := 0.9$$

$$s_{r,max} := \min\left(1.7 \cdot \left(1.5 \cdot c + \frac{k_{fl} \cdot k_b}{7.2} \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 - \alpha_f)\right), 1.3 \cdot (h - x_{II})\right) = 71 \text{ mm}$$

$$k_t := 0.6$$

$$\Delta\varepsilon := \max\left(\frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_s \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}, (1 - k_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}\right) = 1.8 \cdot 10^{-3}$$

$$w_k := \Delta\varepsilon \cdot s_{r,max} = 0.129 \text{ mm}$$

4.7 Shear capacity

$$P_d := \sigma_{p0,t} \cdot A_p = 470 \text{ kN} \quad \alpha_p := \text{atan} \left(\frac{e_p}{l_1} \right) = 5.4^\circ$$

$$V_{ipd} := P_d \cdot \tan(\alpha_p) = 44.6 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.net} := V_{Ed.max} - V_{ipd} = 204.4 \text{ kN}$$

$$\tau_{Ed.net} := \frac{V_{Ed.net}}{b_w \cdot z} = 2.6 \text{ MPa} \quad \tau_{Ed} := \frac{V_{Ed.max}}{b_w \cdot z} = 3.2 \text{ MPa}$$

Shear capacity of cracked concrete without shear reinforcement

$$\eta_{cF} := \max \left(1.2 - 0.5 \cdot \frac{f_{ts3}}{\text{MPa}}, 0.4 \right) = 0.4$$

$$\eta_F := 1$$

$$a_{cs} := \frac{M_{Ed.max}}{V_{Ed.max}} = 3 \text{ m}$$

$$k_l := \min \left(\frac{0.7}{a_{cs}} \cdot \left(e_p + \frac{d}{3} \right) \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z}, 0.25 \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z} \right) = 0.2$$

$$k_{vp} := 1 + \frac{-P_i \cdot d}{V_{Ed.max} \cdot 3 \cdot a_{cs}} = 0.9$$

$$d := \frac{d^2 \cdot A_s + d_p^2 \cdot A_p}{d \cdot A_s + d_p \cdot A_p} = 544 \text{ mm}$$

$$\rho_l := \frac{d \cdot A_s + d_p \cdot A_p}{b_w \cdot d^2} = 0.0146$$

$$\sigma_{cp} := \min \left(\frac{P_i}{A_c}, 0.2 \cdot f_{cm} \right) = 3.4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rdc.0} := 0.66 \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{cm}}{\text{MPa}} \cdot \frac{40 \text{ mm}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} = 1.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rdc} := \tau_{Rdc.0} + k_l \cdot \sigma_{cp} = 1.7 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rd.cf} := \eta_{cF} \cdot \tau_{Rdc} + \eta_F \cdot f_{ts3} = 2.3 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{Ed.net}}{\tau_{Rd.cf}} = 114\%$$

Shear capacity of cracked concrete with shear reinforcement

$$\theta := 21.8 \text{ deg}$$

$$s_w := 400 \text{ mm}$$

$$A_{sw} := \frac{\phi_w^2}{4} \cdot \pi = 50 \text{ mm}^2$$

$$\rho_w := \frac{2 \cdot A_{sw}}{b_w \cdot s_w} = 0.00168$$

$$\tau_{Rd.sy} := \rho_w \cdot f_{ym} \cdot \cot(\theta) = 2.3 \text{ MPa}$$

$$\eta_{sw} := 0.75$$

$$\tau_{Rd.sF} := (\eta_{sw} \cdot \rho_w \cdot f_{ym} + \eta_F \cdot f_{ts3}) \cdot \cot(\theta) = 5.7 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{Ed.net}}{\tau_{Rd.sF}} = 45\%$$

$$n_w := 2 \cdot \left(\frac{l_l}{s_w} + 1 \right) = 17$$

$$l_w = 1.3 \text{ m}$$

Minimum shear reinforcement amount

$$\rho_{w.min} := 0.08 \cdot \frac{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}}{\frac{f_{ym}}{\text{MPa}}} = 0.0011$$

$$\alpha := 90^\circ$$

$$s_{w.max} := \frac{2 \cdot A_{sw}}{b_w \cdot \sin(\alpha) \cdot \rho_{w.min}} = 620 \text{ mm}$$

$$s_{l.max} := 0.75 \cdot d \cdot (1 + \cot(\alpha)) = 408 \text{ mm}$$

$$s_w < \min(s_{w.max}, s_{l.max}) = 1$$

4.8 Anchorage zone

$$\gamma_p := 1.2$$

$$P := \gamma_p \cdot P_{i,1} = 465.6 \text{ kN}$$

$$0.2 \cdot h = 118 \text{ mm}$$

$$h_p := 110 \text{ mm}$$

$$b_p := 110 \text{ mm}$$

$$\sigma_{cc} := \frac{P}{h_p \cdot b_p} = 38.5 \text{ MPa} \quad f_{cm} = 55.2 \text{ MPa} \quad 3 \cdot f_{cm} = 165.5 \text{ MPa}$$

Vertical reinforcement

$$a := h_p = 110 \text{ mm} \quad h = 590 \text{ mm} \quad b := \frac{h}{2} = 295 \text{ mm}$$

$$T := \frac{1}{4} \cdot \frac{b-a}{b} \cdot P = 73 \text{ kN}$$

$$A_v := \frac{T}{f_{ym}} = 133 \text{ mm}^2$$

$$n_v := \text{ceil} \left(\frac{A_v}{2 \cdot \frac{(8 \text{ mm})^2}{4} \cdot \pi} \right) = 2 \quad \frac{h}{2} = 295 \text{ mm}$$

4.9 Buckling

$$l_0 := l_{tot} = 8500 \text{ mm}$$

$$i := \sqrt{\frac{I_c}{A_c}} = 178.8 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{l_0}{i} = 47.6$$

$$n := \frac{P}{f_{cm} \cdot A_c} = 0.08$$

$$\lambda_{lim} := \frac{10.8}{\sqrt{n}} = 39.1$$

$$A := \frac{1}{1 + 0.2 \cdot \varphi} = 0.96$$

$$\omega := \frac{A_s \cdot f_{ym}}{A_c \cdot f_{cm}} = 0.1$$

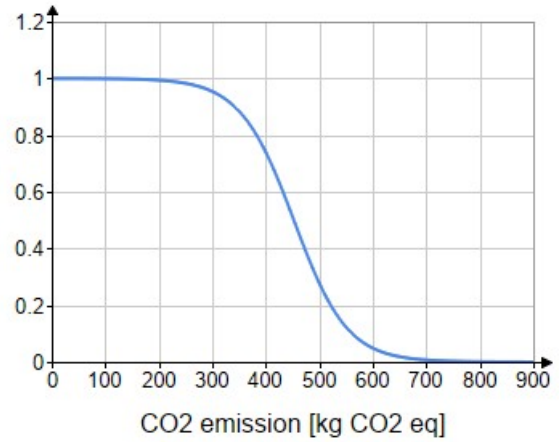
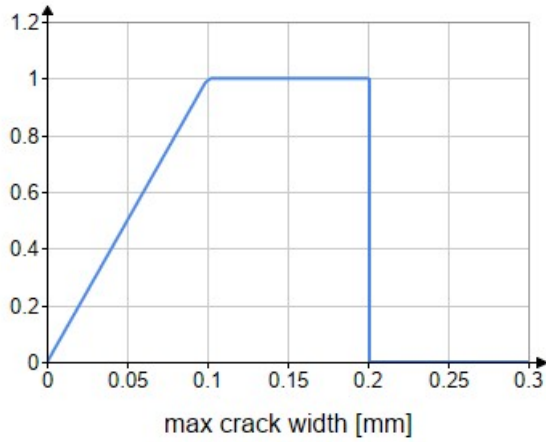
$$B := \sqrt{1 + 2 \cdot \omega} = 1.05$$

$$C := 0.7$$

$$\lambda_{lim} := \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} = 51.2$$

$$\lambda < \lambda_{lim} = 1$$

5 Evaluation



$$w_k = 0.129 \text{ mm} \quad \beta_1(w_k) = 1$$

$$V_{conc} := A_c \cdot l_{tot} = 0.94 \text{ m}^3$$

$$GWP_{conc} := 340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad V_{conc} \cdot GWP_{conc} = 319.6 \text{ kg}$$

$$V_{steel} := A_{s,tot} \cdot l_{tot} + A_{sw} \cdot l_w \cdot n_w + A_p \cdot l_p + A_{sv} \cdot l_v \cdot n_v = 0.0183 \text{ m}^3$$

$$W_{steel} := V_{steel} \cdot \rho_s + V_{conc} \cdot \rho_{fs} = 0.177 \text{ tonne}$$

$$GWP_{steel} := 370 \frac{\text{kg}}{\text{tonne}} \quad W_{steel} \cdot GWP_{steel} = 65.4 \text{ kg}$$

$$\beta_2(V_{conc} \cdot GWP_{conc} + W_{steel} \cdot GWP_{steel}) = 0.79$$

$$\beta_1(w_k) \cdot \beta_2(V_{conc} \cdot GWP_{conc} + W_{steel} \cdot GWP_{steel}) = 0.79$$